



Zbigniew Pater
Grzegorz Samołyk

Podstawy technologii obróbki plastycznej metali



PODRECZNIKI

Podstawy technologii obróbki plastycznej metali

Podręczniki – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Zbigniew Pater
Grzegorz Samołyk

Podstawy technologii obróbki plastycznej metali



Politechnika Lubelska
Lublin 2013

Recenzent:

dr hab. inż. Andrzej Gontarz, prof. Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-89-1

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Od Autorów	11
1. Wiadomości podstawowe	13
1.1. Definicja obróbki plastycznej, klasyfikacje	13
1.2. Budowa metali	19
1.3. Mechanizmy odkształceń plastycznych	25
1.4. Zjawiska towarzyszące obróbce plastycznej	30
1.4.1. Energia zmagazynowana	30
1.4.2. Umocnienie	31
1.4.3. Zdrowienie	33
1.4.4. Rekrytalizacja i rozrost ziaren	34
1.4.5. Starzenie odkształceniowe	35
1.4.6. Zmiana struktury	35
1.5. Charakterystyka wybranych metali i ich stopów	36
1.5.1. Stal w obróbce plastycznej	36
1.5.2. Metale i stopy żelazne w obróbce plastycznej	42
2. Nagrzewanie metali i stopów	53
2.1. Zakres temperatury kształtowania	54
2.2. Czas nagrzewania materiału wsadowego	55
2.3. Utlenianie i odwęglanie stali	56
2.4. Zjawiska towarzyszące procesowi nagrzewania	58
2.5. Zjawiska towarzyszące odkształceniom plastycznym na gorąco i półgorąco	60
2.6. Metody nagrzewania	62
2.6.1. Nagrzewanie w elektrycznych piecach oporowych	62
2.6.2. Nagrzewanie w elektrolicie	62
2.6.3. Nagrzewanie indukcyjne	63
2.6.4. Nagrzewanie kontaktowo-oporowe	64

2.7.	Piece do nagrzewania	65
2.7.1.	Piece płomieniowe	65
2.7.2.	Elektryczne urządzenia grzewcze	67
3.	Cięcie	69
3.1.	Metody cięcia	69
3.2.	Przebieg cięcia blachy za pomocą dwóch elementów tnących	70
3.3.	Powierzchnia rozdzielania	73
3.4.	Luz w procesie cięcia	74
3.5.	Siła i praca cięcia	76
3.5.1.	Cięcie krawędziami równoległymi	77
3.5.2.	Cięcie krawędziami pochylonymi	78
3.6.	Wady elementów ciętych	79
3.7.	Cięcie na nożycach	81
3.8.	Cięcie na wykrojnikach	82
3.8.1.	Operacje cięcia	82
3.8.2.	Wykrojniki	83
3.8.3.	Wyglądanie	89
3.9.	Cięcie dokładne (gładkie) blach	91
3.10.	Cięcie gumą	94
3.11.	Cięcie prętów	95
4.	Gięcie	97
4.1.	Charakterystyka metod gięcia	97
4.2.	Przebieg procesu gięcia	99
4.2.1.	Stan naprężenia i odkształcenia	99
4.2.2.	Związek między momentem gnącym a krzywizną	101
4.2.3.	Praca gięcia	102
4.2.4.	Siła gięcia	104
4.3.	Własności wyrobów giętych	105
4.3.1.	Wytrzymałość na gięcie	105
4.3.2.	Dokładność zarysu	106
4.3.3.	Odkształcenia przekroju poprzecznego	107
4.3.4.	Najmniejszy promień gięcia	108
4.3.5.	Długość materiału wyjściowego do gięcia	109
4.4.	Wady przedmiotów giętych	110
4.5.	Procesy technologiczne	111
4.5.1.	Wyginanie	111
4.5.2.	Zaginanie	113

4.5.3.	Zwijanie	116
4.5.4.	Owijanie	118
4.5.5.	Gięcie za pomocą trzech walców	119
4.5.6.	Prostowanie walcami	120
4.5.7.	Profilowanie taśm walcami	121
5.	Kształtowanie przedmiotów o powierzchni nierozwijalnej	123
5.1.	Kształtowanie wytłoczek przez rozciąganie	124
5.1.1.	Przebieg procesu	125
5.1.2.	Graniczna wysokość wypuklenia	126
5.2.	Kształtowanie wytłoczek przez ciągnięcie	127
5.2.1.	Wytłaczanie	128
5.2.2.	Przetłaczanie	140
5.3.	Kształtowanie ciśnieniem cieczy	148
5.4.	Wyoblanie i zginięcie obrotowe	149
5.5.	Operacje wykańczające	151
6.	Kucie swobodne	153
6.1.	Asortyment wyrobów kutych swobodnie	154
6.2.	Podstawowe operacje kucia swobodnego	155
6.2.1.	Spęczanie	155
6.2.2.	Wydłużanie	160
6.2.3.	Dziurowanie	167
6.2.4.	Gięcie	173
6.2.5.	Cięcie	173
6.2.6.	Skręcanie	175
6.2.7.	Zgrzewanie	176
6.3.	Wady odkuwek kutych swobodnie	177
7.	Kucie matrycowe	179
7.1.	Charakterystyka procesu	180
7.1.1.	Definicje, klasyfikacja	180
7.1.2.	Kinematyka płynięcia materiału	182
7.1.3.	Porównanie kucia na młotach z kuciem na prasach	186
7.2.	Odkuwki matrycowe	191
7.2.1.	Ogólny podział odkuwek	191
7.2.2.	Podział odkuwek na grupy z przeznaczeniem na maszynę kuźniczą	193
7.2.3.	Wady odkuwek	195
7.2.4.	Rysunek odkuwki	198

7.3.	Rowek na wypływkę	216
7.3.1.	Projektowanie rowka dla odkuwek stalowych	218
7.3.2.	Projektowanie rowka dla odkuwek z metali nieżelaznych	221
7.4.	Wsad na odkuwki matrycowe	223
7.4.1.	Opracowanie przedkuwki idealnej	224
7.4.2.	Wykonanie przedkuwki rzeczywistej	229
7.5.	Konstrukcja matryc	230
7.5.1.	Matryce dla kucia na młotach	231
7.5.2.	Matryce dla kucia na prasach korbowych	240
7.5.3.	Matryce dla kucia na prasach śrubowych	246
8.	Operacje zamykające procesy kucia	249
8.1.	Prostowanie odkuwek	249
8.1.1.	Metody prostowania	250
8.1.2.	Konstrukcja narzędzi do prostowania	251
8.2.	Dogniatanie odkuwek	251
8.2.1.	Metody dogniatania	252
8.2.2.	Konstrukcja narzędzi do dogniatania	253
8.3.	Okrawanie wypływki i przebijanie otworów	255
8.3.1.	Charakterystyka ogólna	255
8.3.2.	Konstrukcja okrojników	256
8.3.3.	Konstrukcja wycinarek	260
8.4.	Czyszczenie odkuwek ze zgorzeliny	261
8.4.1.	Oczyszczanie mechaniczne	262
8.4.2.	Oczyszczanie chemiczne	263
8.5.	Obróbka cieplna odkuwek	265
9.	Wyciskanie	269
9.1.	Wprowadzenie	269
9.2.	Klasyfikacja procesów wyciskania	270
9.2.1.	Podział ze względu na płynięcie materiału względem ruchu stempla	270
9.2.2.	Podział ze względu na temperaturę materiału	271
9.2.3.	Podział ze względu na zastosowane oprzyrządowanie	274
9.2.4.	Specjalne metody wyciskania	274
9.3.	Charakterystyka procesu wyciskania	277
9.3.1.	Stan naprężenia i odkształcenia	277
9.3.2.	Wpływ wybranych czynników procesu wyciskania na jego przebieg	279

9.4. Siła wyciskania	282
9.5. Tarcie i smarowanie w procesie wyciskania	284
9.6. Kształtowanie odkuwki	285
9.6.1. Podział odkuwek na grupy	286
9.6.2. Wady wyrobów wyciskanych	287
10. Walcowanie kuźnicze	289
10.1. Walcowanie wzdłużne	290
10.1.1. Parametry charakteryzujące walcowanie wzdłużne	290
10.1.2. Zjawiska zachodzące w strefie walcowania	291
10.1.3. Walcowanie przedkuwek	293
10.2. Walcowanie poprzeczno-klinowe	299
10.2.1. Parametry charakteryzujące proces WPK	300
10.2.2. Metody WPK	301
10.2.3. Ograniczenia procesu WPK	303
10.2.4. Projektowanie narzędzi klinowych	305
10.2.5. Przykład zastosowania technologii WPK w produkcji wałka pośredniego	306
10.3. Walcowanie skośne	312
10.3.1. Kalibrowanie walca	312
10.3.2. Przebieg kształtowania	314
11. Nagniatanie	317
11.1. Wygładzanie powierzchni	317
11.1.1. Metody wygładzania	317
11.1.2. Odkształcenia warstwy wierzchniej	319
11.1.3. Własności wyrobów	323
11.2. Kształtowanie warstwy zewnętrznej	326
11.2.1. Przegląd metod kształtowania	326
11.2.2. Kształtowanie gwintów	326
11.2.3. Kształtowanie uzębień	330
Literatura	333

Od Autorów

Obróbka plastyczna to technika wytwarzania, w której zmianę kształtu i wymiarów przedmiotu obrabianego osiąga się wskutek odpowiedniego oddziaływania narzędzi na obrabiany materiał. Charakterystyczne jest, iż w trakcie kształtowania tą techniką materiał doznaje odkształceń trwałych oraz na ogół uzyskiwana jest poprawa jego własności mechanicznych. Procesy kształtowania plastycznego mogą być realizowane na zimno, na półgorąco (ciepło) oraz na gorąco.

Obróbka plastyczna (kuźnictwo) zaliczana jest do najstarszych technik wytwarzania. Pierwszym metalem obrabianym kuciem była miedź (ok. 4.500 lat p.n.e), którą kształtowano za pomocą młotków wykonywanych z wytrzymałych kamieni. Później zastąpiono je młotkami z brązu i ostatecznie z żelaza (najstarszy pochodzący z wykopalisk liczy sobie ok. 3.000 lat). Pierwszymi kutymi seryjnie wyrobami były monety (VII w. p.n.e – Lidia), wykonywane z elektronu (stop srebra i złota). W średniowieczu miał miejsce rozwój kuźnictwa, co wiązało się z upowszechnieniem koła wodnego stosowanego m.in. do napędu miechów kuźniczych, młotów (od XIV w.) oraz walcarek (od XVII w.). Dalszy rozwój obróbki plastycznej związany był z wykorzystaniem pary wodnej do napędu maszyn (1783 r. – walcarka napędzana silnikiem parowym; 1839 r. – młot parowy; 1861 r. – prasa hydrauliczna). W wieku XX powstało szereg nowych procesów kształtowania plastycznego, do realizacji których budowane były maszyny wyposażane w indywidualne silniki elektryczne. Więcej informacji na temat historii obróbki plastycznej znaleźć można w podręczniku pt.: *„Wybrane zagadnienia z historii techniki”* [56].

Niniejsze opracowanie ma za zadanie zaznajomić Czytelnika z podstawami technologii obróbki plastycznej metali. Ze względu na ograniczoną objętość w podręczniku opisano tylko wybrane procesy kształtowania plastycznego, realizowane w zakładach przemysłowych z branży przetwórstwa metali i stopów (kuźnie). Pominięte zostały zaś procesy kształtowania hutniczego (walcowanie, ciągnienie), których celem jest otrzymywanie półwyrobów (procesy te znajdują się w będącym w przygotowaniu podręczniku pt.: *„Podstawy metalurgii i odlewnictwa”*). Ponadto, w opracowaniu ograniczono do minimum informacje na tematy teorii plastyczności i maszyn służących do kształtowania plastycznego

– zostały one bowiem szczegółowo podane w podręcznikach „Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali” [59] oraz „Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej” [86], opublikowanych w Wydawnictwach Politechniki Lubelskiej.

Podręcznik przeznaczony jest dla studentów wyższych szkół technicznych studiujących na kierunkach: „Mechanika i budowa maszyn”, „Inżynieria materiałowa”, „Metalurgia”, „Inżynieria produkcji”. W celu rozszerzenia wiadomości z omawianego zakresu zaleca się Czytelnikom korzystanie z literatury specjalistycznej, której zestaw podano na końcu opracowania.

Na zakończenie Autorzy wyrażają podziękowanie wszystkim osobom, których uwagi przyczyniły się do podniesienia jakości materiału zawartego w podręczniku. Szczególne podziękowania kierowane są do Recenzenta, którego cenne spostrzeżenia i uwagi wpłynęły na nadanie opracowaniu jego obecnej postaci.

1. Wiadomości podstawowe

1.1. Definicja obróbki plastycznej, klasyfikacje

Obróbka plastyczna metali jest jedną z podstawowych i najbardziej rozpowszechnionych metod technologicznych stosowanych w procesie wytwarzania przedmiotów (części) z metali i ich stopów. Podstawowym pojęciem stosowanym w inżynierii produkcji oraz technologii budowy maszyn jest metoda wytwarzania. Zgodnie z definicją encyklopedyczną, jest to sposób nadawania lub zmieniania kształtu i własności wyrobu (ciała stałego, materiału inżynierskiego), jego dzielenia lub łączenia oraz wytwarzania powłok na powierzchni wyrobu. W praktyce metody wytwarzania dzieli się na trzy zasadnicze grupy (rodzaje) sposobów, mianowicie [75, 78, 98]:

- ❑ kształtowanie pierwotne – do tej grupy zalicza się wszystkie sposoby, których istota sprowadza się do nadawania kształtu wyrobowi poprzez wytworzenie spójności między cząsteczkami materiału – przykładowo, są to metody wytapiania (np. metali i ich stopów w postaci wlewków lub kęsów i kęsik), odlewania (np. metali i ich stopów, polimerów, materiałów ceramicznych z użyciem form), prasowania proszków (również z uwzględnieniem procesu ich spiekania);
- ❑ kształtowanie plastyczne – są to sposoby polegające na nadaniu nowego kształtu przedmiotowi przez plastyczną zmianę jego pierwotnej postaci, przy czym spójność i masa materiału nie ulega zmianie – jest to realizowane poprzez wprowadzenie materiału wyrobu w stan plastyczny (w wyniku oddziaływania na niego narzędzi) oraz następnie wywołaniu w nim odkształceń trwałych;
- ❑ łączenie – są to sposoby polegające na wytworzeniu spójności pomiędzy co najmniej dwoma przedmiotami, względnie pomiędzy ciałem stałym a cząstkami innego materiału, które mogą znajdować się w dowolnym stanie skupienia;
- ❑ dzielenie – polega na zmianie kształtu przedmiotu (ciała stałego) z celowym naruszeniem spójności materiału;

- ❑ powlekanie – są to sposoby polegające na wytwarzaniu na powierzchni przedmiotu warstw składających się z cząstek innego materiału;
- ❑ zmiana własności fizyko-chemicznych – polega za zmienieniu pierwotnych własności materiału poprzez odpowiednie przemieszczanie lub wydzielanie cząstek, najczęściej wchodzących w skład tego materiału lub przyłączanie nowych cząstek, przeważnie innego materiału.

Podsumowując, **obróbka plastyczna** metali i ich stopów jest metodą wytwarzania, w której z materiału pierwotnego powstaje wyrób o zmienionym kształcie i własnościach fizyko-chemicznych poprzez użycie takich sposobów jak kształtowanie plastyczne, dzielenie lub łączenie. Przy czym, również w przypadku dwóch ostatnich sposobów, efekt końcowy uzyskiwany jest w wyniku wywołana (przeważnie miejscowo) odkształceń plastycznych materiału. Zmiana własności fizyko-chemicznych sprowadza się głównie do zmiany struktury metalu, co wpływa zasadniczo na własności mechaniczne, oraz zmiany topologii powierzchni wyrobu (np. chropowatość). Efektem obróbki plastycznej jest również wywołanie naprężeń własnych w materiale.

Technologia obróbki plastycznej metali jest bardzo obszernym zagadnieniem. W celu uporządkowania wiedzy na jej temat wprowadzono szereg klasyfikacji – w opracowaniu tym zostaną przytoczone jedynie ważniejsze. Podstawowym podziałem obróbki plastycznej jest jej klasyfikacja ze względu na zachowanie lub utratę spójności kształtowanego materiału. Oczywiście jest to klasyfikacja nadrzędna, bazująca na wcześniej omówionych sposobach wytwarzania – stąd, wyróżnia się następujące grupy sposobów obróbki plastycznej [11, 15, 16, 75, 98]:

- ❑ cięcie plastyczne – podczas którego następuje podzielenie materiału z naruszeniem jego spójności w wyniku miejscowej koncentracji naprężeń, przy czym pękanie materiału jest zawsze poprzedzane odkształceniami plastycznymi;
- ❑ kształtowanie plastyczne – podczas którego powstaje zmiana kształtu przedmiotu i konstytuowanie się własności jego materiału przy jednoczesnym zachowaniu spójności;
- ❑ łączenie plastyczne – podczas którego następuje połączenie dwóch części materiału w jeden przedmiot w sposób bezpośredni lub za pomocą dodatkowej części łącznej (np. tzw. nitowanie plastyczne), przy czym w strefie połączenia materiał wszystkich części odkształca się plastycznie.

Drugą ważną klasyfikacją nadrzędną technologii obróbki plastycznej jest jej podział ze względu na temperaturę kształtowanego materiału. Zgodnie z tym podziałem wyróżnia się obróbkę plastyczną [3, 11, 15, 16, 75, 98]:

- ❑ na zimno – podczas której występuje zgniot i umocnienie materiału, ale z uwagi na niską temperaturę (poniżej temperatury rekryształizacji) w materiale nie zachodzi ani zdrowienie ani rekryształizacja;
- ❑ na półgorąco (ciepło) – materiał kształtowany jest podgrzany do takiej temperatury, przy której częściowo zachodzi jego rekryształizacja, zgniot lub zdrowienie oraz umocnienie;
- ❑ na gorąco – materiał kształtowany jest podgrzany do temperatury w zakresie powyżej temperatury rekryształizacji, a poniżej wartości określonej przez linię solidusu, w efekcie czego szybko postępująca rekryształizacja powoduje, że materiał odkształcony nie umacnia się.
- ❑ ze stanu półpłynnego (*thixoforming*) – materiał kształtowany jest podgrzany do temperatury w zakresie określonym linią solidusu i likwidusu (tj. znajduje się w postaci dwufazowej, z wyraźnym udziałem fazy płynnej), a następnie jest odkształcany plastycznie, najczęściej metodą kucia, aż do zakończenia całkowitej przemiany fazowej w ciało stałe.

Zdecydowana większość metod obróbki plastycznej metali zaliczana jest do sposobu kształtowania plastycznego. Różnice pomiędzy poszczególnymi metodami wynikają najczęściej z postaci i kształtu materiału wsadowego, sposobu działania sił, rodzaju wywoływanych naprężeń oraz charakteru odkształceń plastycznych. Przykładowo, ze względu na charakter odkształceń plastycznych materiału, kształtowanie plastyczne dzieli się na [11, 16, 75, 98]:

- ❑ postaciowe – w którym, następuje zmiana kształtu przedmiotu (dwóch wymiarów) bez zamierzonej zmiany grubości (trzeciego wymiaru); występuje podczas tłoczenia blach i foli oraz odkształcania płyt;
- ❑ objętościowe – w którym następuje przemieszczenie masy materiału, powodujące zamierzoną zmianę wszystkich wymiarów przedmiotu; występuje podczas odkształcania brył.

Natomiast ze względu na sposób działania sił oraz rodzaj wywołanych naprężeń w materiale, rozróżnia się kształtowanie plastyczne [11, 16, 75, 98]:

- ❑ ściskaniem – gdy w materiale występuje jedno- lub wieloosiowe naprężenie ściskające;
- ❑ rozciąganiem – gdy w materiale panuje jedno- lub wieloosiowe naprężenie rozciągające;
- ❑ rozciąganiem i ściskaniem – kiedy w materiale występuje złożony stan naprężeń, na który składają się naprężenia rozciągające i ściskające;
- ❑ zginaniem – z zastosowaniem momentu zginającego;
- ❑ ścinaniem (tj. za pomocą sił stycznych) – z zastosowaniem naprężenia stycznego.

Sposoby kształtowania plastycznego metali i ich stopów można również podzielić na metody obróbki plastycznej. Podział ten bazuje na klasyfikacji

ze względu na szereg cech charakterystycznych, które wynikają głównie z postaci materiału kształtowanego, sposobu przyłożenia siły oraz kształtu i ruchu narzędzi. Zatem, w obrębie kształtowania plastycznego ściskaniem wyróżnia się takie metody jak [11, 15, 16, 65, 75, 98]:

- ❑ kucie – polega na statycznym lub dynamicznym kształtowaniu (zgniataniu) materiału w sposób swobodny, półswobodny lub matrycowy za pomocą poruszających się liniowo względem siebie narzędzi, nieodwzorujących lub odwzorujących kształt wyrobu;
- ❑ walcowanie – polega na zgniataniu materiału w sposób ciągły lub okresowy za pomocą jednego lub wielu napędzanych narzędzi, które są w kształcie obracających się walców lub rolek, albo w kształcie cyklicznie poruszających się szczęk wklęsłych lub płaskich, przy czym narzędzia dodatkowo mogą wprowadzać wyrób w ruch obrotowy, postępowy lub śrubowy;
- ❑ przepychanie – polega na zgniataniu materiału poprzez przeciskanie wyrobu przez otwór w narzędziu lub przestrzeń (szczelinę) utworzoną przez narzędzia, albo przez przeciskanie narzędzia przez wyrób; przepychanie materiału zamkniętego w matrycy przez otwór lub szczelinę kształtującą nazywane jest wyciskaniem;
- ❑ nagniatanie – polega na kształtowaniu warstwy powierzchniowej materiału poprzez miejscowe zgniatanie narzędziem wnikałym lub przesuwającym się wzdłuż powierzchni wyrobu.

Natomiast w obszarze kształtowania plastycznego rozciąganiem wyodrębnia się metody:

- ❑ wydłużanie – polega na kształtowaniu wzdłużnym wyrobu poprzez przyłożenie do materiału sił rozciągających;
- ❑ rozciąganie – polega na zwiększeniu przekroju poprzecznego wyrobu o kształcie naczynia lub tulei poprzez przyłożenie do materiału sił rozciągających;
- ❑ wyciąganie – polega na kształtowaniu płytkich wypukłości i wgłębień, kształtowaniu przestrzennym lub gięciu wyrobu w postaci blachy, folii lub płyty za pomocą sił rozciągających, w efekcie czego następuje zwiększenie dwóch wymiarów (powierzchni) kosztem zmniejszenia trzeciego wymiaru (grubości).

W obrębie kształtowania plastycznego rozciąganiem i ściskaniem wyróżnia się metody:

- ❑ tłoczenie – polega na kształtowaniu wykroju blachy, folii lub płyty w wyrób w kształcie naczynia za pomocą narzędzi wywierających nacisk lub kształtowaniu przedmiotu w kształcie naczynia lub powłoki w wyrób o mniejszym obwodzie, przy czym nie następuje zamierzona zmiana grubości ścianki;

- ❑ ciągnienie – polega na kształtowaniu materiału pełnego (drułu, prętów) lub drążonego (rur) za pomocą przeciągania go przez otwór narzędzia, zwężającego się w kierunku ciągnięcia, albo pomiędzy zespołem napędzanych walców; przy czym w przypadku wyrobów drążonych możliwe jest użycie dodatkowego narzędzia wewnętrznego w postaci trzpienia;
- ❑ wyoblanie – polega na kształtowaniu wykroju blachy, folii lub płyty w wyrób w kształcie osiowo-symetrycznego naczynia lub powłoki bez zamierzonej zmiany grubości, albo kształtowaniu przedmiotu w postaci naczynia lub powłoki w wyrób o mniejszym obwodzie za pomocą miejscowego wywierania nacisku przez narzędzie (wyoblak ślizgowy lub rolka wyoblająca) na materiał wirujący wraz z narzędziem odwzorowującym kształt wyrobu (wzornikiem);
- ❑ wywijanie – polega na kształtowaniu obrzeża (w kształcie pierścienia lub powierzchni stożkowej) wokół wyciętego otworu w blasze, folii lub płycie, albo kształtowaniu płaskiego kołnierza z pierścienia w naczyniu, powłoce lub tulei poprzez nacisk narzędzia wykonującego ruch postępowy.

W obszarze kształtowania plastycznego zginaniem wyodrębnia się metody:

- ❑ gięcie postępowe – polega na kształtowaniu gięciem materiału w jednej płaszczyźnie za pomocą narzędzia wykonującego ruch postępowy, gdzie wyrób w postaci odcinka blachy, płyty, pręta, rury lub kształtownika jest podparty na dwóch prostoliniowych krawędziach;
- ❑ gięcie obrotowe – polega na kształtowaniu gięciem materiału w jednej płaszczyźnie, w sposób swobodny lub na wzorniku, za pomocą narzędzia wykonującego ruch obrotowy, gdzie wyrób w postaci odcinka blachy, płyty, pręta, rury lub kształtownika jest zamocowany jednym lub dwoma końcami;
- ❑ gięcie walcami – polega na kształtowaniu ciągłym lub okresowym materiału za pomocą obracających się narzędzi w kształcie walców lub rolek, gdzie zmiana krzywizny wyrobu zachodzi w jednej płaszczyźnie lub po linii śrubowej;
- ❑ gięcie przez przeciąganie – polega na kształtowaniu ciągłym lub okresowym materiału, gdzie moment gnący jest wynikiem przeciągania materiału przez otwór w narzędziu lub szczelinę powstałą pomiędzy obracającymi się walcami.

W obrębie kształtowania plastycznego ścinaniem wyróżnia się metody:

- ❑ przesadzanie – polega na kształtowaniu materiału siłami stycznymi powodującymi równoległe przesunięcie jednej części materiału względem drugiej w kierunku działania siły;
- ❑ skręcanie – polega na kształtowaniu materiału siłami stycznymi powodującymi względny obrót przylegających przekrojów wokół jednej osi.

Kolejna klasyfikacja technologii obróbki plastycznej metali związana jest z prędkością odkształcania. Wiadomo, że procesy technologiczne są realizowane za pomocą maszyn, które różnią się między sobą również charakterem (np. dynamiką, prędkością) ruchu elementów roboczych. Nawiązując zatem do prędkości odkształcania $\dot{\epsilon}$ można wyróżnić następujące sposoby obróbki plastycznej:

- ❑ pełzanie (tj. powolne odkształcanie plastyczne materiału pod wpływem długotrwałego stałego obciążenia, wywołującego w materiale naprężenie poniżej granicy plastyczności w danej temperaturze) – ten sposób występuje, gdy prędkość odkształcania $\dot{\epsilon}$ wynosi $10^{-10} \div 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;
- ❑ płynięcie nadplastyczne (doprowadzające do wielkich odkształceń plastycznych) – występuje, gdy $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \div 10^{-1} \text{ s}^{-1}$;
- ❑ statyczne kształtowanie plastyczne – występuje, gdy prędkość odkształcania $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \div 10^1 \text{ s}^{-1}$ i jest osiągana np. na prasach hydraulicznych – $3 \div 6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, korbowych – $1 \div 5 \text{ s}^{-1}$ lub ciernych – $0,2 \div 1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$;
- ❑ dynamiczne kształtowanie plastyczne – prędkość odkształcania wynosi $\dot{\epsilon} = 10^1 \div 10^2 \text{ s}^{-1}$ i jest osiągana np. na młotach – $0,1 \div 2,5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ lub podczas ciągnięcia łańcuchowego lub bębnowego – $0,01 \div 6 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$;
- ❑ kształtowanie dużymi mocami, gdzie prędkość odkształcania $\dot{\epsilon}$ osiąga wartość $10^2 \div 10^4 \text{ s}^{-1}$ – np. kształtowanie elektrohydrauliczne, magnetyczne, wybuchowe, na młotach szybkobieżnych – $0,4 \div 1,4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ lub podczas ciągnięcia na wielociągach – $0,1 \div 6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.

Ostania klasyfikacja obróbki plastycznej, jaka zostanie przytoczona w tej części podrödziału, dotyczy cięcia plastycznego (mechanicznego). Podział ten jest realizowany ze względu na sposób działania siły na materiał. Zatem wyróżnia się następujące metody cięcia mechanicznego:

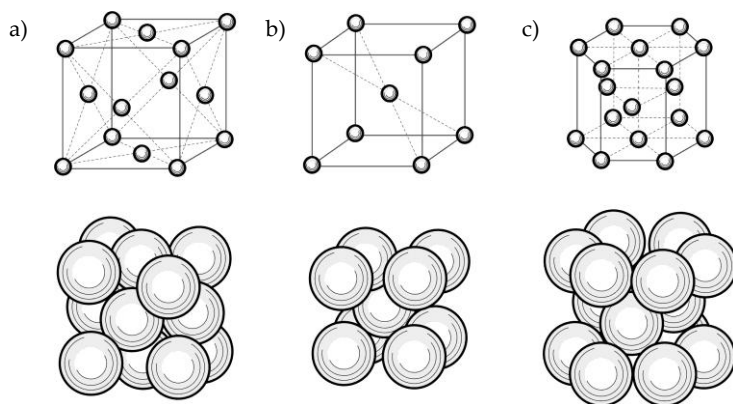
- ❑ cięcie czołowe (lub poprzeczne) – jest to takie cięcie plastyczne, gdzie na materiał jest wywierany nacisk pochodzący od czołowych powierzchni dwóch narzędzi rozmieszczonych przysobnie i zbliżających się do siebie, przy czym w materiale powstają skoncentrowane naprężenia styczne;
- ❑ cięcie klinowe (lub nożowe) – jest to takie cięcie plastyczne, w którym na materiał jest wywierany nacisk pochodzący od klinowej powierzchni jednego narzędzia zbliżającego się do przeciwległej płaskiej lub klinowej powierzchni drugiego narzędzia, rozmieszczonego przeciwsobnie;
- ❑ łamanie – polega na dzieleniu przez zaginanie materiału jednostronnie utwierdzonego albo przez gięcie swobodne materiału na dwóch podporach;
- ❑ rozrywanie – polega na dzieleniu przez rozciąganie materiału do chwili przekroczenia granicy spójności;
- ❑ skręcanie – polega na dzieleniu przez przyłożenie momentu sił, wywołującego naprężenia skrętne, do chwili przekroczenia granicy spójności.

1.2. Budowa metali

Wszystkie metale oraz ich stopy mają budowę krystaliczną, która charakteryzuje się regularnym rozmieszczeniem rdzeni atomowych (atomów). Oczywiście takie stwierdzenie jest uogólnione, ponieważ w rzeczywistości rdzenie te mają postać jonów dodatnich, a przestrzeń między nimi jest wypełniona swobodnymi elektronami walencyjnymi – tzw. „*chmurą elektronów*”. Dzięki takiemu układowi, pomiędzy rdzeniami atomowymi powstaje nieukierunkowane wiązanie metaliczne (którego energia szacowana jest na poziomie $100 \div 800$ kJ/mol). Jednocześnie układ ten sprawia, że metale wykazują następujące podstawowe cechy istotne w technologii obróbki plastycznej, mianowicie [67, 82, 98]:

- ❑ plastyczność, czyli zdolność do trwałej zmiany postaci lub kształtu oraz własności fizyko-chemicznych, przy czym należy pamiętać, że plastyczność jest stanem w jaki wprowadza się metal i zależy od jego własności (np. ciągliwość) i warunków w jakich się znajduje (np. obciążenie, temperatura);
- ❑ dobra przewodność cieplna i elektryczna – własność szczególnie istotna, gdy odkształcany materiał należy podgrzać lub poddać obróbce cieplnej;
- ❑ specyficzny połysk metaliczny podwyższający walory estetyczne.

Budowę krystaliczną wszystkich metali przedstawia się za pomocą elementarnej komórki sieciowej (rys. 1.1). Ogólnie, metale mogą występować przyjmując aż siedem różnych postaci sieci elementarnej (wg systematyki Bravais’a), jednakże prawie wszystkie metale techniczne krystalizują bazując tylko na trzech odmianach komórki elementarnej. Dlatego też, szerzej omówione zostaną tylko te układy, które przedstawiono na rys. 1.1. Są nimi następujące sieci krystaliczne:



Rys. 1.1. Podstawowe postacie elementarnych komórek sieciowych w jakich krystalizują się metale techniczne (opis w tekście)

- ❑ Regularna ściennie (płasko) centrowana, oznaczana symbolem A1 (RSC) – tworzy ją 14 rdzeni atomowych. Spośród nich, osiem rdzeni jest usytuowanych w narożach, natomiast sześć – w środku geometrycznym ścian bocznych wyimaginowanego sześcianu (rys. 1.1a). Ta odmiana sieci występuje w większości metali technicznych (m.in. w żelazie γ , aluminium, niklu, miedzi, srebrze, złocie, platynie i ołowiu). Metale te wykazują szczególnie dobrą plastyczność na gorąco, a niekiedy również na zimno. Ponadto, metale o takiej budowie są bardzo dobrymi przewodnikami ciepła i prądu elektrycznego.
- ❑ Regularna przestrzennie centrowana, nazywana jako A2 (RPC) – jest utworzona przez 9 rdzeni atomowych, przy czym tylko jeden rdzeń atomowy znajduje się w środku geometrycznym tej elementarnej komórki. Pozostałe rdzenie znajdują się w narożach sześcianu (rys. 1.1b). Tego rodzaju układ występuje w takich metalach jak żelazo α , chrom, wolfram, molibden i tytan β . Metale tej grupy są mniej ciągliwe niż metale mające sieć A1 – nadają się praktycznie tylko do obróbki plastycznej na gorąco.
- ❑ Heksagonalna o gęstym ułożeniu atomów, oznaczana symbolem A3 (HZ) – jest utworzona aż przez 19 rdzeni atomowych o gęstym ułożeniu, z których 12 znajduje się w narożach graniastosłupa o podstawie sześciokąta foremnego. Kolejne dwa atomy są ułożone w środku geometrycznym podstaw, natomiast trzy pozostałe rdzenie są usytuowane we wnętrzu omawianej elementarnej komórki sieciowej (rys. 1.1c). Sieć A3 występuje m.in. w tytanie α , kobaltcie α i cynku. Metale o takiej sieci mają znacznie gorsze własności plastyczne niż metale o sieci A1 i A2. Tylko nieliczne z nich mogą być obrabiane plastycznie (np. tytan), przy czym ich technologia obróbki jest zaliczana do bardzo trudnych.

Kolejną ważną własnością metali jest zdolność do przebudowy sieci krystalicznej pod wpływem zmian temperatury i ciśnienia. W niektórych przypadkach przemiany te mogą być spowodowane również przez odkształcenia plastyczne lub kombinację odkształceń (zazwyczaj o charakterze dynamicznym) w połączeniu z oddziaływaniem wysokim ciśnieniem. W takich warunkach powstają na ogół struktury bardziej zwarte (zwykle typu A1 lub A3) od tych, które istnieją w warunkach normalnych. Omawiane przemiany nazywane są alotropowymi, natomiast występowanie metalu w postaci różnych odmian krystalicznych nosi nazwę alotropii lub polimorfizmu. Analogicznie również odmiany krystaliczne tego samego metalu są nazywane alotropowymi.

Odmiany alotropowe spotyka się w wielu metalach. Przykładowo żelazo (włącznie z jego stopami), kobalt, tytan oraz cyna mają po dwie odmiany (najczęściej oznaczane literami α oraz β , a w przypadku żelaza – α i γ), natomiast chrom ma już trzy odmiany (α , β , γ). Oczywiście poszczególne postacie alotropowe różnią się między sobą własnościami fizykochemicznymi –

szczególnie mechanicznymi, np. gęstością. Niektóre własności wybranych postaci alotropowych metali przedstawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1.

Niektóre wartości fizyczne wybranych postaci alotropowych metali [11, 21, 52, 67, 82, 99]

Nazwa	Sieć	Parametr sieci [nm]			Temp. topnienia [°C]	Gęstość w 20°C [g/cm ³]	Zakres temp. w jakiej występuje [°C]
		w temp. [°C]	szer.	wys.			
Żelazo α	A2	20	0,2861	-	1534	7,87	do 910 oraz pow.1390
Żelazo γ	A1	950	0,3649	-	-	-	910 ÷ 1390
Kobalt α	A3	20	0,2507	0,4081	-	8,90	do 400
Kobalt β	A1	-	0,3537	-	1495	-	pow. 400
Tytan α	A3	20	0,2950	0,4683	-	4,54	do 882
Tytan β	A2	900	0,3283	-	1668	-	pow. 882
Aluminium	A1	25	0,4041	-	660	2,70	
Magnez	A3	20	0,3209	0,521	650	1,74	
Miedź	A1	18	0,3607	-	1083	8,96	

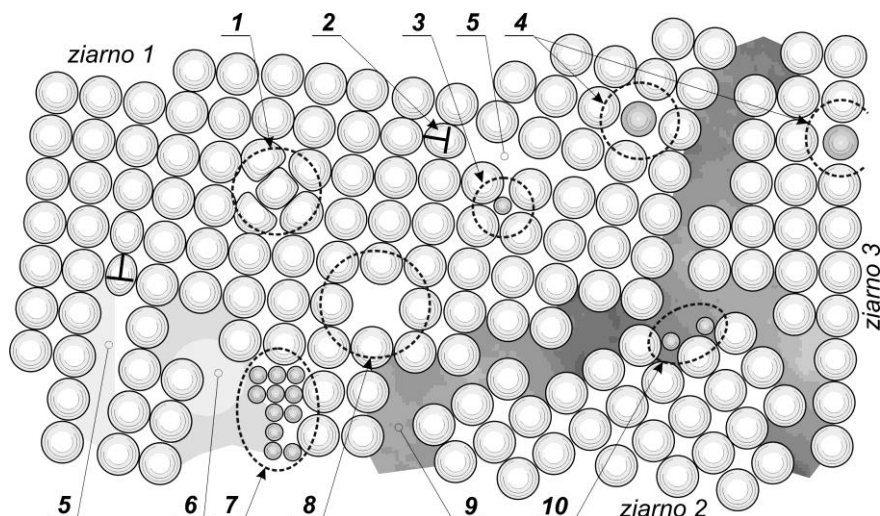
Przemiana alotropowa pociąga za sobą chwilową (zazwyczaj skokową) zmianę niektórych własności. Tę cechę przemiany wykorzystuje się do przeprowadzania odkształceń plastycznych w obrębie tego szczególnego momentu. Przykładem może być proces kucia stali eutektoidalnej i nadeutektoidalnej podczas odwracalnej przemiany fazowej – stal ferromagnetyczna przemienia się w paramagnetyczną. Oczywiście takich przykładów jest znacznie więcej. Obecnie wiele ośrodków naukowych w Polsce i na świecie prowadzi badania nad wykorzystaniem przemiany alotropowej w procesie obróbki plastycznej metali.

Metale w stanie stałym mogą występować jako monokryształy (tylko w warunkach laboratoryjnych) lub polikryształy. Monokryształy charakteryzują się prawidłowym rozmieszczeniem przestrzennym atomów z zachowaniem jednokowej orientacji wszystkich elementarnych komórek sieciowych w całej objętości kryształu. Dlatego też, monokryształy są ciałami anizotropowymi, natomiast metale polikrystaliczne (tj. składające się z ziaren monokrystalicznych) – ciałami izotropowymi. Jednak obróbka plastyczna, w której następuje zgniot może

przyczynić się do tego, że również metale polikrystaliczne będą wykazywały anizotropię, w szczególności własności mechanicznych.

Metale techniczne otrzymywane konwencjonalnymi metodami metalurgicznymi zawsze mają budowę polikrystaliczną. Oznacza to, że metale składają się ze wspomnianych ziaren, z których każde ma w przybliżeniu prawidłową strukturę krystaliczną. Na rys. 1.2 przedstawiono schematycznie strukturę polikrystaliczną metali rzeczywistych. Cechą charakterystyczną takiej struktury jest przypadkowe ułożenie monokryształów (ziaren), co decyduje m.in. o izotropii w przypadku ogólnym. Z taką budową omawianych materiałów związane są następujące pojęcia [67, 82, 99]:

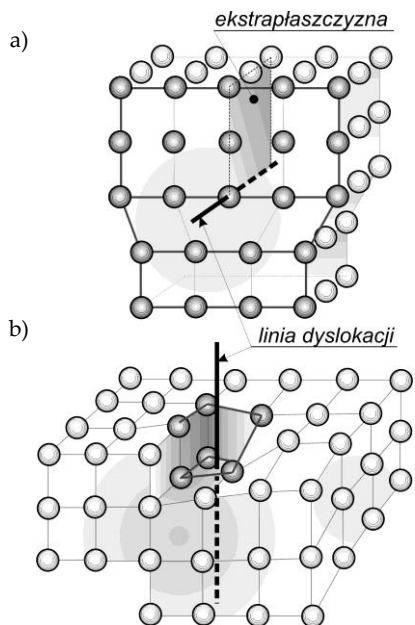
- ❑ Dezorientacja krystaliczna, wyrażana w mierze kątowej, która określa kąt utworzony między głównymi kierunkami orientacji krystalicznej dwóch sąsiadujących ziaren.
- ❑ Granica ziaren oddziela ziarna różniące się między sobą orientacją krystaliczną lub w przypadku stopów – dodatkowo również ziarna różniące się między sobą składem chemicznym. Jest to strefa charakteryzująca się występowaniem atomowego niedopasowania struktury krystalicznej sąsiednich ziaren. W zależności od wielkości dezorientacji krystalicznej wyróżnia się granice wąskokątowe (wartość kąta dezorientacji w zakresie $10\div 20^\circ$ (szczegół 5 na rys. 1.2) i szerokokątowe (rys. 1.2 – szczegół 9). Przy przejściu z jednego do drugiego ziarna, płaszczyzny i kierunki krystalograficzne



Rys. 1.2. Model struktury polikrystalicznej, gdzie: 1 – atom własny międzywęzłowy, 2 – dodatkowe atomy wywołujące dyslokację, 3 – atom obcy międzywęzłowy, 4 – atom obcy w położeniu węzłowym, 5 – układ dyslokacji tworzący granicę wąskokątową, 6 – pustka, 7 – wtrącenie lub wydzielanie, 8 – wakans, 9 – szerokokątowa granica ziarna, 10 – atomy obce na granicy ziarna

tracą swoją ciągłość, co wpływa na hamowanie poślizgu – a w rezultacie wywołuje umocnienie materiałów polikrystalicznych.

- Defekty punktowe sieci krystalicznej, które są zaburzeniami w periodycznym układzie atomów. Wywierają one znaczący wpływ zarówno na własności poszczególnych kryształów, jak i ogólne cechy metalu. Można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje defektów punktowych: wakanse (rys. 1.2 – szczegół 8), atomy własne międzywęzłowe (rys. 1.2 – szczegół 1) oraz atomy domieszek, które z kolei są albo substytucyjne (rys. 1.2 – szczegół 4) lub międzywęzłowe (rys. 1.2 – szczegół 3). Generalnie, tego typu wady sieci krystalicznej wywołują w niej lokalne naprężenia o charakterze ściskającym (np. atomy własne międzywęzłowe) lub rozciągającym (np. wakanse). Defekty te mogą powstawać również w wyniku odkształceń plastycznych realizowanych przy temperaturze z zakresu $0,2 \div 0,4 T_{\text{topnienia}}$.



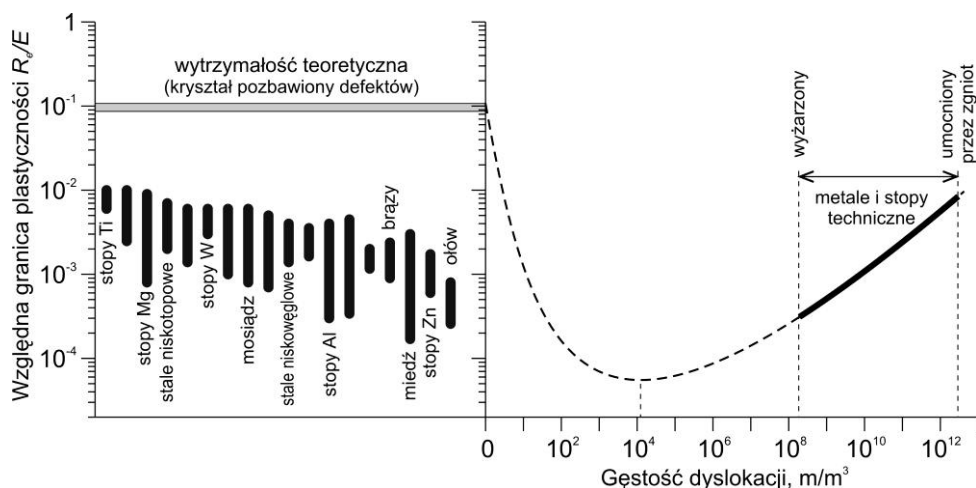
Rys. 1.3. Schemat dyslokacji krawędziowej (a) oraz dyslokacji śrubowej (b)

- Defekty liniowe sieci krystalicznej (nazywane dyslokacjami) są sprężystą wadą sieci krystalicznej rozciągającą się wzdłuż linii. W tej grupie wyróżnić można dwie odmiany tego typu defektu. Dyslokacja krawędziowa (rys. 1.2 – szczegół 2 oraz rys. 1.3a) powstaje w wyniku zagęszczenia atomów (tworzących ekstrapłaszczyznę) po jednej stronie płaszczyzny ścinka i jednocześnie rozrzedzenia atomów po drugiej. Krawędź wspomnianej ekstrapłaszczyzny po stronie płaszczyzny ścinka jest nazywana dyslokacją. Natomiast drugi rodzaj defektu – dyslokacja śrubowa – powoduje, że płaszczyzny atomów prostopadłe do linii dyslokacji są skręcone na wzór gwintu śruby (rys. 1.3b).

- Fonony stanowiące osobną grupę defektów sieci krystalicznej, które można uważać za kwanty energii drgań atomów w kryształach. Amplituda tych cyklicznych drgań ściśle jest uzależniona od temperatury. Fonony w wyniku oddziaływania z atomami kryształu, umożliwiają ich dyfuzyjne przeskoki.

Zatem, intensyfikują procesy dyfuzyjne, zdrowienia i rekrytalizacji, które towarzyszą przemianom fazowym.

Dla obróbki plastycznej metali najważniejszymi defektami sieci krystalicznej są dyslokacje oraz granice ziaren. Dyslokacje w znaczący sposób wpływają na własności metali i przede wszystkim powodują (gdy gęstość dyslokacji jest rzędu $10^6 \div 10^8 \text{ cm/cm}^3$), że metale są miękkie i ciągliwe, czyli zdolne do ulegania znacznym odkształceniom trwałym z zachowaniem jego spójności. Łatwość wprowadzenia dyslokacji w ruch powoduje, że dyslokacje również odgrywają istotną rolę podczas odkształceń plastycznych, o czym będzie mowa w następnym podrozdziale. Ogólny wpływ gęstości dyslokacji na opór plastycznego płynięcia (tj. granicę plastyczności R_e) oraz fakt, że w ogóle istnieją te defekty w sieci krystalicznej metali i stopów technicznych, przedstawiono na rys. 1.4. Podstawowym wnioskiem wynikającym z tego rysunku jest to, że występowanie wad ułożenia atomów w ziarnach powoduje, że rzeczywista wytrzymałość (również i granica plastyczności) tych materiałów jest znacznie mniejsza niż wytrzymałość idealna, wyznaczona dla monokryształów pozbawionych jakichkolwiek błędów ułożenia atomów.



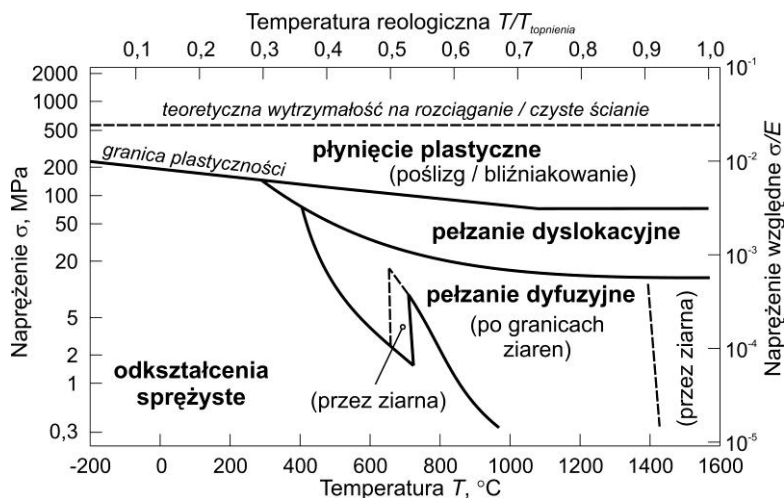
Rys. 1.4. Wpływ występowania defektów sieci krystalicznej na rzeczywistą granicę plastyczności R metali i stopów technicznych (gdzie E – moduł Younga) oraz schematyczna zależność pomiędzy oporem plastycznego płynięcia a gęstością dyslokacji [19, 50, 65, 97]

Znacznie większy wpływ na własności mechaniczne metali ma występowanie granic ziaren. Przede wszystkim, wysoki poziom energetyczny granic ziaren warunkuje występowanie wielu zjawisk, np. zmożoną dyfuzję atomów, ciągłą ruchliwość granic prowadzącą do rozrostu ziaren, mniejszą odporność na korozję itd. Granice ziaren wywierają również duży wpływ na

ciągliwość metali. Z jednej strony, jako obszary oddzielające kryształy różniące się orientacją krystalograficzną, hamują swobodny ruch dyslokacji podczas odkształcania ziaren, powodują wzrost oporów plastycznego płynięcia, uczestniczą w procesie wzmacniania materiału oraz w tworzeniu tzw. tekstury zgniotu. Ale z drugiej strony, w szczególnych przypadkach (np. podczas pełzania lub płynięcia nadplastycznego), granice ziaren są głównym obszarem odkształceń trwałych.

1.3. Mechanizmy odkształceń plastycznych

Każdy metal pod wpływem obciążenia, którego wartość osiągnie granicę plastyczności, doznaje odkształceń trwałych. W poprzednim rozdziale pokazano, że budowa rzeczywistych metali technicznych jest złożona, a każda jej cecha (np. typ elementarnej komórki, defekty sieci krystalicznej, granice ziaren) wpływa w określony sposób na proces zmiany postaci materiału. W zależności od własności metali oraz od warunków, takich jak np.: sposób obciążenia (wartość, dynamika) oraz temperatura – odkształcenie plastyczne będzie realizowane według określonego mechanizmu. W rzeczywistych materiałach, ich odkształcenie trwałe jest często efektem złożonych procesów, na które składają się różne mechanizmy. Na rys. 1.5 przedstawiono schematycznie mapę podstawowych mechanizmów odkształcenia trwałego dla czystego żelaza, na którym pokazano przede wszystkim wpływ wartości obciążenia i temperatury materiału. Generalnie, w przypadku metali i stopów technicznych, odkształcenia trwałe osiągane



Rys. 1.5. Mapa mechanizmów odkształcenia trwałego przedstawiająca zakres ich dominowania w przypadku czystego żelaza (struktura średnioziarnista) [73, 97]

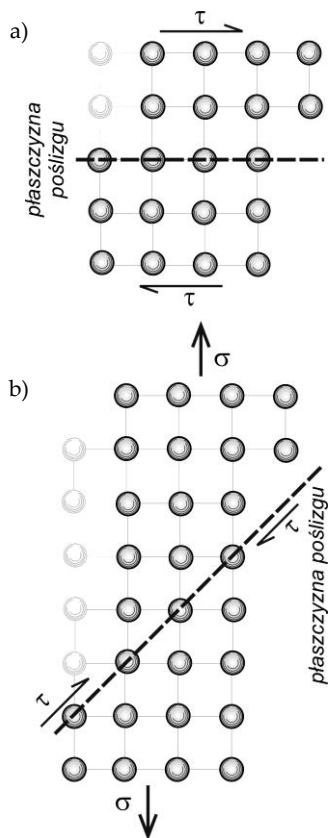
podczas obróbki plastycznej mogą być wywoływane przez następujące mechanizmy, tj.:

- poślizg,
- bliźniakowanie,
- pełzanie.

Charakter budowy materiałów rzeczywistych wpływa również na poziom naprężenia, jakie należy osiągnąć aby wywołać w metalu odkształcenie plastyczne. Na podstawie obserwacji stwierdzono, że dla polikrystalicznych metali i stopów technicznych wartość granicy plastyczności jest wyraźnie wyższa niż dla pojedynczego monokryształu (ziarna). Związane jest to przede wszystkim z tym, że musi zachodzić jednocześnie odkształcenie wielu ziaren. Znaczenie również ma charakter budowy struktury ziarnistej takich metali, a w szczególności:

- obecność zarówno granic ziaren jak i występowanie w nich zanieczyszczeń i wtrąceń, które są przeszkodą dla swobodnego ruchu dyslokacji;
- występowanie pewnych przemieszczeń ziaren względem siebie, które zachodzą w wąskich strefach przy granicach ziaren (niekiedy również wzdłuż tych granic);
- spełnienie warunku zachowania spójności – tj. akomodacja kształtu każdego ziarna do ziaren sąsiednich, co wymaga odkształceń kryształu co najmniej w pięciu systemach poślizgu, a jak wiadomo, nie każdy z tych systemów jest korzystnie zorientowany w stosunku do działających naprężeń.

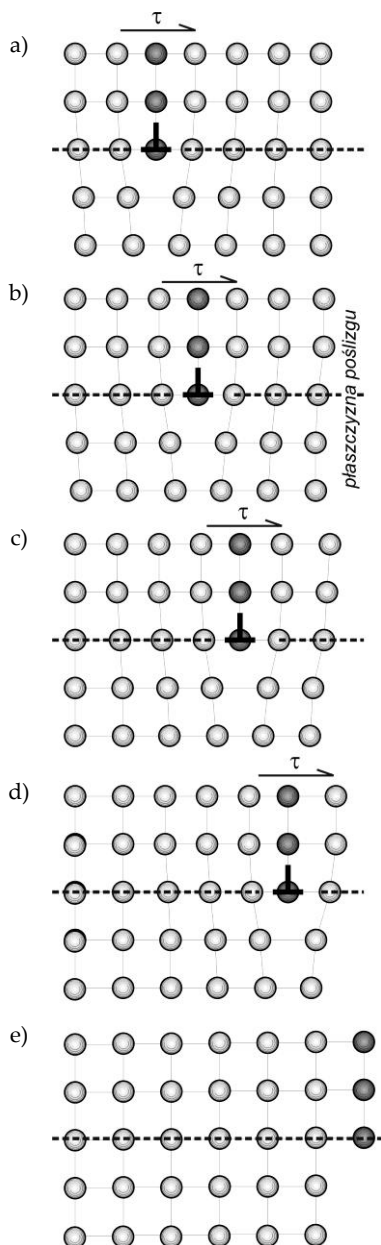
Podstawowym mechanizmem odkształcania trwałego większości metali i stopów technicznych jest poślizg (rys. 1.6). Zjawisko to następuje pod wpływem działania naprężeń stycznych τ , które wywołują jednocześnie przesunięcie grupy atomów wzdłuż charakterystycznej płaszczyzny – nazywanej płaszczyzną poślizgu. Najczęściej



Rys. 1.6. Model mechanizmu odkształceń plastyczny przez poślizg: przypadek ogólny (a) oraz przypadek, gdy siła nie jest równoległa do systemu poślizgu (b)

ruch ten odbywa się w płaszczyźnie najgęściej obsadzonej atomami. Płaszczyzna o takich cechach nazywana jest płaszczyzną łatwego poślizgu. Natomiast kombinacją płaszczyzny poślizgu i leżącego w niej kierunku poślizgu nazywa się

systemem poślizgu. Ilość systemów poślizgu w odniesieniu do komórki elementarnej zależy od jej budowy. Najwięcej systemów poślizgu, bo aż 12, mają metale o sieci typu A1 (RSC) – są to np: aluminium, miedź, srebro, złoto oraz żelazo w odmianie γ (austenit) – czyli metale bardzo plastyczne. Najmniej systemów poślizgu mają metale o budowie heksagonalnej – tj. tylko trzy. Przy czym, uruchomienie danego systemu poślizgu zależy zarówno od kierunku przyłożenia siły, jak i również stosunku wymiarów sieci A3 (HZ). Przykładowo, magnez przy temperaturze pokojowej ma tylko jedną płaszczyznę łatwego poślizgu (tj. uprzywilejowany system poślizgu zawarty jest w podstawie komórki elementarnej). Dopiero w temperaturze podwyższonej uruchamiają się dwa pozostałe systemy poślizgu – tj. w płaszczyźnie pryzmatycznej. Ruch atomów odbywać się może również w innych płaszczyznach niż w płaszczyźnie łatwego poślizgu nie tylko ze względu na podwyższenie temperatury materiału, ale również w przypadku osiągnięcia znacznych odkształceń. Jest to spowodowane tym, że poślizg wzdłuż pierwotnego systemu poślizgu jest blokowany przez narastające defekty sieci krystalicznej.



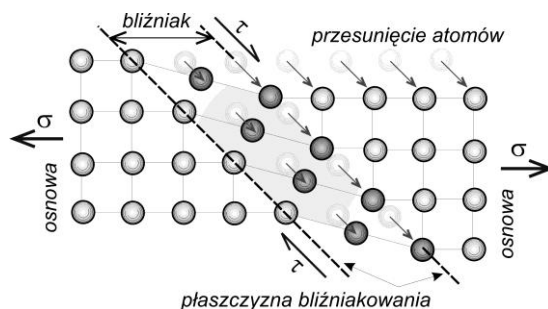
Rys. 1.7. Model mechanizmu poślizgu jako efekt ruchu dyslokacji, gdzie:
a) ÷ e) kolejne fazy

W rzeczywistych metalach polikrystalicznych nie występuje poślizg jako efekt jednoczesnego zrywania i następnie odbudowywania wiązań wzdłuż jednej linii, tak jak to pokazano na rys. 1.6. Mechanizm ten opiera się na ruchu dyslokacji (rys. 1.7) – tj. wzajemnego, stopniowego przemieszczania jednej części ziarna względem drugiej jako

efektu ruchu linii dyslokacji w płaszczyźnie poślizgu. Dzieje się tak, ponieważ o wiele łatwiej jest przemieszczać dyslokację w ziarnie poprzez zrywanie i odbudowywanie pojedynczych wiązań wzdłuż jednej linii, po której się porusza, niż poprzez jednoczesne zrywanie wszystkich wiązań przed ich odbudowaniem. Ponadto, zgodnie z poprzednim podrozdziałem, dyslokacje zawsze występują w kryształach. Przemieszczenia dyslokacji w trakcie poślizgu są niewielkie, rzędu 0,1 nm – dlatego odkształcenie całkowite jest efektem przemieszczania ogromnej liczby tych defektów liniowych po wielu różnych płaszczyznach. Dla podkreślenia istoty tego mechanizmu, jest on nazywany poślizgiem dyslokacyjnym.

Drugim mechanizmem istotnym, oprócz poślizgu dyslokacyjnego wewnątrz ziaren, jest bliźniakowanie. Jest to nagły, o charakterze poślizgowym proces zachodzący w niewielkim obszarze ziarna. Schemat tego mechanizmu pokazano na rys. 1.8. Pod wpływem naprężeń stycznych τ , ściśle zawężona część ziarna (bliźniak) zmienia w sposób symetryczny orientację w stosunku do pozostałej części (osnowy), tworząc jej zwierciadlane odbicie. Powstałą płaszczyznę symetrii nazywa się płaszczyzną bliźniakowania (lub bliźniaczą). Należy zauważyć, że ścięcie w kierunku zgodnym z orientacją tej płaszczyzny jest mniejsze od odległości międzyatomowej, a na każdej następnej płaszczyźnie atomów bliźniaka (równoległej do bliźniaczej), ścięcie zwiększa się proporcjonalnie do odległości od płaszczyzny bliźniakowania. Taki charakter przesunięć dają dyslokacje szczątkowe Schockleya. W miarę wzrostu naprężeń stycznych, bliźniaki w ziarnie powiększają się oraz zwiększa się ich ilość. Może również dochodzić do łączenia się ich w większe bliźniaki. Dzięki temu wartości odkształceń trwałych w ziarnie są znaczne. Czas potrzebny na utworzenie bliźniaków jest bardzo mały, rzędu kilku μs , z tego też powodu przy ich powstawaniu często słychać charakterystyczne trzaski.

Należy pamiętać, że proces bliźniakowania nie zachodzi z jednakową łatwością w każdym metalu i w każdych warunkach. Największą rolę odgrywa on podczas doksztalcania metali o strukturze heksagonalnej, zwłaszcza wtedy, gdy orientacja płaszczyzn łatwego poślizgu jest niekorzystna względem działających naprężeń stycznych lub poślizg został zablokowany przez spiętrzenie dyslokacji. W metalach posiadających budowę typu A3 (HZ) bliźniakowanie może występować przy



Rys. 1.8. Model mechanizmu odkształceń plastycznych przez bliźniakowanie

stosunkowo wysokich temperaturach i tzw. normalnych prędkościach odkształcania, a udział objętościowy bliźniaków w ziarnach może być znaczny. W szczególnych przypadkach, taki duży udział bliźniaków przyczynia się do łatwiejszego odkształcania materiału. Dzieje się tak, gdy systemy poślizgu są korzystnie zorientowane względem naprężeń stycznych. Jednak regułą jest to, że udział bliźniaków w objętości ziaren jest na tyle mały, że silnie wpływa to na umocnienie materiału i zwiększenie jego kruchości. W przypadku metali krystalizujących w systemie A1 (RSP), bliźniakowanie przebiega tylko przy bardzo niskich temperaturach, a przy temperaturze pokojowej w wyniku szybkiego odkształcania, często o charakterze udarowym.

Podsumowując można stwierdzić, że między odkształceniem przez poślizg i bliźniakowanie istnieją następujące różnice:

- ❑ przy poślizgu orientacja wzajemnie przemieszczających się fragmentów ziarna nie ulega zmianie, natomiast po utworzeniu bliźniaka jego orientacja jest inna niż otaczającej go części kryształu;
- ❑ powstające granice bliźniacze zwiększają energię odkształcenia i są miejscem powstawania zarodków pękania;
- ❑ przy poślizgu przemieszczenie atomów zachodzi w jednej płaszczyźnie o wielkość rozmiaru komórki elementarnej sieci krystalicznej, natomiast przy bliźniakowaniu w wielu płaszczyznach równoległych do płaszczyzny bliźniaczej o wielkość części rozmiaru komórki elementarnej;
- ❑ odkształcenie postaciowe przy bliźniakowaniu jest znacznie większe niż przy poślizgu.

Na zakończenie tego zagadnienia warto zwrócić uwagę na pewną grupę zjawisk (rys. 1.5), które mają istotny i dość specyficzny wpływ na powstawanie odkształceń trwałych w rzeczywistych metalach i ich stopach. Zjawiska te składają się na jeden, złożony mechanizm nazywany ogólnie pełzaniem. W kontekście obróbki plastycznej, pełzanie wywołuje powolne odkształcenia trwałe pod wpływem działania stałego naprężenia przy temperaturze reologicznej wyższej od $0,4 T_{topnienia}$. Niejednokrotnie, naprężenie to nie musi nawet osiągać granicy plastyczności R_e materiału. Ogólnie, mechanizm ten jest bardzo złożony i opiera się na czterech podstawowych, choć różnych procesach, tj.:

- ❑ dyfuzji – jest niepożądana, ponieważ pełzanie dyfuzyjne powoduje niekorzystny przepływ defektów punktowych (głównie wakansów) przyczyniając się do wydłużenia ziaren w kierunku ich rozciągania. Proces ten zachodzi w temperaturze powyżej $0,6 T_{topnienia}$ w warunkach niehydrostatycznego stanu naprężenia pod wpływem oddziaływania naprężenia rozciągającego;
- ❑ ruchu poślizgowym dyslokacji – proces ten jest wywoływany przez naprężenie, którego wartość może być mniejsza od granicy plastyczności.

Przyczyną niekontrolowanego, powolnego ślizgania się krótkich odcinków tych defektów sieci krystalicznej jest wysoka energia cieplna drgań atomów;

- ❑ wspinaniu dyslokacji – polega na omijaniu przeszkód (innych dyslokacji kątowych lub wydzielen) przez dyslokacje będące w ruchu wywołanym np. przez oddziaływanie naprężeń stycznych. Wspinanie, jako efekt m.in. dyfuzji, polega na przechodzeniu dyslokacji na sąsiednią płaszczyznę poślizgu, na której ruch dyslokacji nie jest blokowany. Dodatkowym efektem tego procesu często jest anihilacja dyslokacji krawędziowych lub wspomaganie poligonizacji, tj. wysokotemperaturowego zdrowienia dynamicznego;
- ❑ poślizgu po granicach ziaren – ma on ograniczone znaczenie, a jego natura zależna jest od temperatury odkształcanego metalu polikrystalicznego. Podczas obróbki plastycznej przy niskich temperaturach, proces ten polega na przemieszczaniu i obrocie ziaren wzdłuż ich granic szerokokątowych, natomiast podczas obróbki plastycznej na gorąco – jest on efektem ruchu liniowych defektów granic ziaren wzdłuż tych granic. Głównym niepożądanym skutkiem tego procesu jest powstawanie porowatości metalu – tj. pustek, będących zarodkiem pęknięć.

Reasumując, mechanizm pełzania nie jest celowo wykorzystywany podczas realizacji technologii obróbki plastycznej, za wyjątkiem kształtowania nadplastycznego. Zazwyczaj, pełzanie jest niepożądane i niekontrolowane. Zdecydowana większość procesów, które tworzą ten mechanizm, przyczynia się w znaczący sposób do przyspieszenia zniszczenia materiału, szczególnie w przypadku niekorzystnego stanu naprężenia.

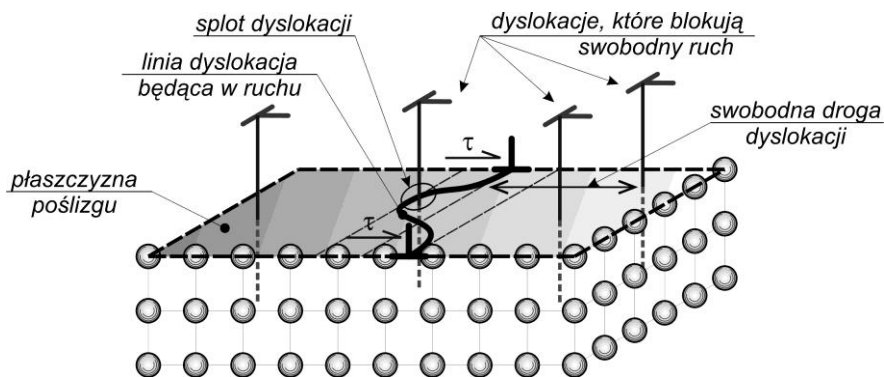
1.4. Zjawiska towarzyszące obróbce plastycznej

1.4.1. Energia zmagazynowana

Energia zmagazynowana stanowi tę część pracy odkształcenia plastycznego, która nie uległa zamianie na ciepło w czasie odkształcenia materiału. Ten rodzaj energii związany jest z wychyleniem atomów z położenia równowagi na skutek powstawania różnych defektów podczas odkształcania plastycznego. Energia zmagazynowana stanowi od 2 do 10% całkowitej pracy odkształcenia plastycznego. Zależy ona od rodzaju komórki elementarnej, temperatury, wielkości ziaren, zanieczyszczeń metalu oraz od stopnia odkształcenia. Zmagazynowana energia odkształcenia jest siłą napędową dla wielu zjawisk aktywowanych cieplnie, takich jak: zdrowienie, rekrytalizacja lub starzenie odkształceniowe. Podczas tych zjawisk następuje wydzielanie energii.

1.4.2. Umocnienie

Umocnieniem nazywa się wzrost wartości naprężenia uplastyczniającego wywołany trwałym odkształcaniem metalu. Jeżeli jest ono efektem zgniotu, to umocnienie nazywa się dyslokacyjnym lub (częściej) umocnieniem przez zgniot. Podstawową przyczyną występowania tego zjawiska w obróbce plastycznej (rys. 1.9) jest zablokowanie (skrócenie) swobodnej drogi dyslokacji, która znajduje się w ruchu w danej płaszczyźnie łatwego poślizgu. Nieustanne skracanie drogi swobodnej, a co za tym idzie – wzrost oporów płynięcia plastycznego, jest spowodowane wzrostem gęstości dyslokacji w ziarnie odkształcanego metalu. W momencie, gdy uruchomiona linia dyslokacji napotka na swojej drodze przeszkodę, np. w postaci innej dyslokacji, w miejscu spotkania powstaje tzw. splot. Taki efekt skrzyżowania się dwóch defektów sieci krystalicznej nie tylko blokuje ruch dyslokacji, ale również jest przyczyną generowania kolejnych, nowych dyslokacji. Przeszkodami dla ruchu dyslokacji mogą być również innego rodzaju defekty sieci, np. wakanse, atomy nadmiarowe oraz cząstki wydzielienia, szczególnie w przydatku stopów metali.



Rys. 1.9. Model umocnienia przez zgniot (opis w tekście)

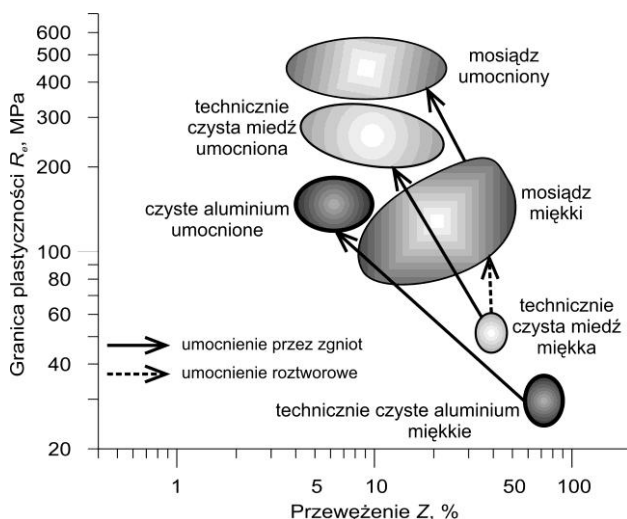
W zasadzie wszystkie metale umacniają się w trakcie ich odkształcania plastycznego. Może to stanowić pewną niedogodność z punktu widzenia technologii. Przykładowo, na rys. 1.10 pokazano wpływ umocnienia przez zgniot na wartość dwóch własności mechanicznych dla wybranych metali i ich stopów. Podstawowym wnioskiem z tego rysunku jest to, że efektem umocnienia zawsze jest wzrost, zarówno granicy plastyczności, jak i wytrzymałości danego materiału, ale niestety kosztem obniżenia jego ciągliwości (wyrażonej np. poprzez przewężenie Z lub wydłużenie A).

Fakt, że umocnienie przez zgniot powoduje wzrost granicy plastyczności jest wykorzystywane w technologii obróbki plastycznej do wytwarzania wyrobów o podwyższonej wytrzymałości. Umocnienie przez zgniot metali technicznych stosuje się rutynowo w następujących procesach:

- ❑ walcowania folii kuchennej, wykonanej z czystego aluminium;
- ❑ ciągnięcia drutów, szczególnie wykonywanych z czystego aluminium, miedzi lub stali niskowęglowej;
- ❑ kształtowania odkuwek i wytłoczek dla przemysłu maszynowego i transportu, które są wykonywane na zimno ze stali niskowęglowych;
- ❑ kształtowania zbiorników ciśnieniowych, wykonanych ze stali nierdzewnej.

Istnieją również przypadki, w których polepszenia wytrzymałości nie uzyskuje się za pomocą zgniotu, tylko za pomocą obróbki cieplnej (np. umocnienie rozтворowe lub wydzieleniowe). Przykładem mogą być odkuwki wykonane ze stopów aluminium lub stopów miedzi.

W przypadku obróbki plastycznej na zimno, umocnienie materiału często jest tak silne, że bardzo szybko jest osiągane odkształcenie graniczne, przy którym gęstość dyslokacji ma wartość maksymalną (nawet 10^{12} m/m³ – zależy to od gatunku materiału). Opór odkształcenia jest wtedy tak duży, że naprężenie rozciągające doprowadza do naruszenia spójności materiału (w wyniku m.in. zamiany granic wąskokątowych na szczeliny). Aby nie dopuścić do takiej sytuacji należy zmniejszyć gęstość defektów w sieci krystalicznej ziaren poprzez obróbkę cieplną polegającą na wyżarzaniu rekrytalizującym. Silne umocnienie występuje np. w aluminium, miedzi i ich stopach. Jeżeli naprężenia w materiale mają charakter ściskający, powstawanie szczelin jest utrudnione, co daje możliwość przemiany układów dyslokacji w nowe granice ziaren. Powstałe ziarna z reguły mają małą gęstość defektów, co powoduje nieznaczny spadek poziomu naprężeń uplastyczniających. Niestety jest to efekt krótkotrwały, ponieważ nowo powstałe granice ziaren są przeszkodami dla poruszających się



Rys. 1.10. Wpływ umocnienia materiału na wzrost granicy plastyczności R_p i spadek wartości przewężenia Z (tj. ciągliwość) dla wybranych materiałów technicznych

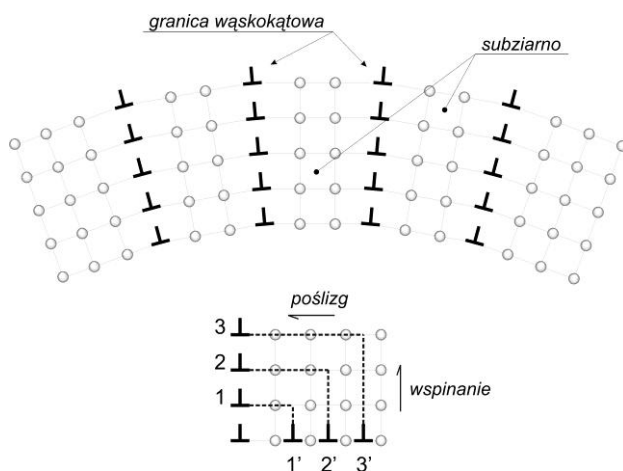
dyslokacji z jednego do drugiego ziarna. Takie zjawisko jest nazywane umocnieniem granicami ziaren. Wynika to z budowy metali polikrystalicznych, w których orientacja ziaren (zazwyczaj o wielkości od 10 do 100 μm) jest przypadkowa, czyli systemy poślizgów sąsiadujących ze sobą ziaren, nie pokrywają się.

W przypadku procesów obróbki plastycznej realizowanych przy podwyższonej temperaturze, umocnienie materiału (które również zachodzi) jest zazwyczaj niewielkie lub nawet niezauważalne. Powodem tego jest jednocześnie osłabianie materiału w wyniku występowania innych zjawisk dynamicznych aktywowanych cieplnie – np. zdrowienia lub rekrytalizacji. Dlatego też, odkształcenie graniczne dla metali kształtowanych na gorąco jest znacznie większe, niż podczas obróbki plastycznej na zimno.

1.4.3. Zdrowienie

Zdrowieniem nazywa się submikroskopowe zmiany zachodzące w strukturze materiału w wyniku aktywacji cieplnej, które nie są związane ani z rozrostem kryształów, ani z pojawianiem się nowych, nieodkształconych plastycznie ziaren. Zmiany te mają charakter dyfuzyjny i sprowadzają się w ogólnym ujęciu do zaniku defektów sieci krystalicznej w obrębie ziarna. Zatem, zdrowienie dotyczy:

- anihilacji defektów punktowych – następuje anihilacja defektów o przeciwnych znakach (np. atomy nadmiarowe wypełniają wakanse) lub odbywa się dyfuzja defektów do granicy ziarna i w efekcie naturalny ich zanik; proces anihilacji



Rys. 1.11. Polygonizacja dyslokacji prowadząca do tworzenia granic wąskokątowych oraz schemat porządkowania dyslokacji, gdzie: 1', 2', 3' – początkowa pozycja dyslokacji; 1, 2, 3 – końcowa pozycja dyslokacji po wspinaniu i poślizgu

odgrywa istotną rolę w przypadku, kiedy odkształcanie metalu przebiega przy temperaturze niższej niż $0,2 T_{\text{topnienia}}$;

- anihilacja dyslokacji o przeciwnych znakach, która jest realizowana poprzez przegrupowanie dyslokacji drogą poślizgu do konfiguracji o niższej energii;
- polygonizacja, czyli porządkowanie dyslo-

kacji o jednakowych znakach pozostających w nadmiarze, które tworzą układy o niższej energii, tzw. granice wąskokątowe; przegrupowanie dyslokacji jest realizowane drogą poślizgu oraz wspinania (rys. 1.11).

Powyższe zjawiska powodują wydzielenie części energii zmagazynowanej i niewielkie zmiany niektórych własności mechanicznych. Najszybciej regenerują się te własności, które silnie zależą do defektów punktowych w sieci krystalicznej – np. naprężenia własne i przewodnictwo elektryczne. Wydzielanie energii zmagazynowanej jest również siłą napędową dla wspinania dyslokacji.

1.4.4. Rekrytalizacja i rozrost ziaren

Rekrytalizacja jest procesem polegającym na całkowitym odnowieniu struktury materiału i wiąże się z tworzeniem nowych, nieodkształconych ziaren, a w pewnych warunkach również z ich rozrostem. Ponieważ proces ten często towarzyszy odkształceniom plastycznym na gorąco, to efektem rekrytalizacji (oprócz zmiany struktury) jest również osłabienie materiału, tj. usunięcie skutku umocnienia przez zgniot, gdyż nowe ziarna mają stosunkowo niewielką gęstość dyslokacji (patrz rys. 1.4).

Zjawisko rekrytalizacji zaczyna się przy temperaturze wyższej niż temperatura zdrowienia. Temperatura rekrytalizacji T_R dla danego metalu zależy przede wszystkim od temperatury topnienia, stopnia czystości metalu, energii błędu ułożenia, składu stopu oraz od ilości zmagazynowanej energii odkształcenia. Dla metali i stopów technicznych temperatura T_R zazwyczaj wynosi $0,4 \div 0,6 T_{\text{topnienia}}$. Ale już dla metali czystych, które zostały silnie odkształcone i posiadają wysoki poziom zmagazynowanej energii odkształcenia, temperatura T_R może być mniejsza od $0,2 T_{\text{topnienia}}$. Powodem jest fakt, że wyższy poziom zmagazynowanej energii odkształcenia znacząco przyspiesza proces rekrytalizacji.

W zależności od temperatury, jaką posiada odkształcany (lub odkształcony) materiał, wyróżnia się rekrytalizację:

- pierwotną – polega na stopniowym powstawaniu nowych, nieodkształconych ziaren w wyniku rozrostu zarodków; najczęściej zarodkiem staje się subziarno, ale pod warunkiem, że energia powierzchniowa jego granic jest mniejsza od zmagazynowanej energii odkształcenia w jego otoczeniu; warunkiem rozrostu zarodka jest, aby jego granica względem osnowy była szerokokątową;
- wtórną – zachodzi przy znacznie wyższej temperaturze niż rekrytalizacja pierwotna i po pewnym okresie inkubacji po rekrytalizacji pierwotnej; rekrytalizacja wtórna polega na szybkim rozroście niektórych ziaren, które pochłaniają ziarna sąsiadujące dążąc do zmniejszenia energii powierzchniowej granic ziaren. Częstym efektem rozrostu ziaren, szczególnie w me-

talach silnie odkształconych przed rozpoczęciem procesu rekrytalizacji, jest tworzenie tekstur i bliźniaków rekrytalizacji.

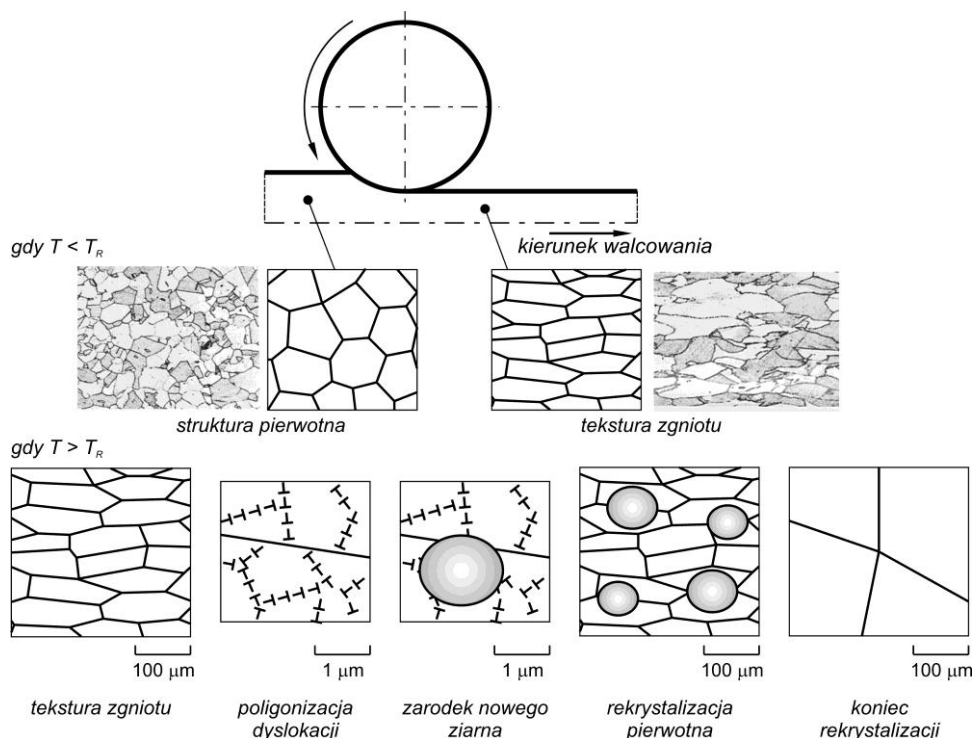
Ważnym pojęciem, związanym z rekrytalizacją pierwotną jest zgmiot krytyczny. W przypadku, gdy odkształcenie metalu jest mniejsze od zgmiotu krytycznego proces rekrytalizacji nie nastąpi (zbyt mała energia zmagazynowana), nawet gdy temperatura osiągnie odpowiednio dużą wartość. Jeżeli materiał doznał odkształcenia o wartości krytycznej, to po rekrytalizacji uzyska się strukturę gruboziarnistą. Dalszy wzrost odkształcenia (ponad wartość zgmiotu krytycznego) powoduje, że wielkość nowoutworzonych ziaren będzie coraz mniejsza.

1.4.5. Starzenie odkształceniowe

Starzeniem odkształceniowym nazywa się zespół zjawisk o podłożu dyfuzyjnym, zachodzących przy temperaturze mniejszej niż temperatura aktywacji zdrowienia. Zjawiska te prowadzą do umocnienia materiału, którego głównym powodem jest zablokowanie swobodnej drogi dyslokacjom przez tzw. atmosfery Cottrella. Tworzenie się tych atmosfer odbywa się poprzez dyfuzję atomów (najczęściej innych pierwiastków) do otoczenia dyslokacji. Tak powstały układ dyslokacji z atmosferami Cottrella jest trwały, ponieważ jego stan energetyczny jest niższy, niż energia samych dyslokacji. Stopień umocnienia materiału zależy od czasu oraz temperatury, dlatego duża przerwa (rzędu kilkudziesięciu godzin) pomiędzy odciążeniem a ponownym obciążeniem materiału może spowodować znaczący wzrost jego granicy plastyczności.

1.4.6. Zmiana struktury

Przy okazji podsumowania tematu dotyczącego zjawisk zachodzących podczas odkształceń plastycznych zostanie omówione zagadnienie zmiany struktury materiału. W ogólnym ujęciu, pod wpływem odkształcenia ziarna ulegają wydłużeniu a ich osie krystalograficzne układają się zgodnie z kierunkiem największego wydłużenia – co pokazano na rys. 1.12 dla przypadku walcowania wzdłużnego na zimno stali węglowej. Tworzy się wówczas struktura o wyraźnie uporządkowanych osiach krystalicznych ziaren, która nosi nazwę tekstury zgmiotu. Cechą charakterystyczną takiej struktury jest anizotropowość własności mechanicznych, która jest obserwowana np. w blachach walcowanych na zimno. Jednak w przypadku realizacji procesu obróbki plastycznej na gorąco (rys. 1.12 – przypadek, gdy $T > T_R$) ma się do czynienia ze zjawiskami takimi jak zdrowienie i rekrytalizacja, które zachodzą już w kotlinie walcowniczej. Końcowa postać mikrostruktury zależy od przebiegu procesów zdrowienia i rekrytalizacji, które w tym przypadku nazywa się dynamicznymi.



Rys. 1.12. Zmiana mikrostruktury stopu metalu (np. stali węglowej – przykładowe fotografie) w następstwie walcowania wzdłużnego na zimno (gdym $T < T_R$) i na gorąco (gdym $T > T_R$)

1.5. Charakterystyka wybranych metali i ich stopów

1.5.1. Stal w obróbce plastycznej

Najbardziej znanym materiałem technicznym używanym w technologii obróbki plastycznej jest stal – tj. stop żelaza z węglem, gdzie zawartość tego pierwiastka nie przekracza 2,1 %. Zarówno stal węglowa jak i stopowa jest materiałem nie sprawiającym praktycznie żadnych problemów w omawianej technologii. W praktyce wyróżnia się wiele klasyfikacji stali, w których za kryterium przyjmuje się np. skład chemiczny lub zastosowania. Stop ten charakteryzują następujące parametry: moduł sprężystości wzdłużnej $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,3$, współczynnik termicznej rozszerzalności liniowej $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ oraz gęstość $\rho = 7850$ kg·m⁻³. Pozostałe parametry wytrzymałościowe (podstawowe) stali są zależne od jej składu chemicznego. Przykładowe ich wartości, dla wybranych gatunków stali stosowanych w budowie maszyn, podano w tabeli 1.2.

Tabela 1.2.

Podstawowe parametry wybranych stali niestopowych i stopowych stosowanych w budowie maszyn (klasyfikacja wg zastosowania)

Gatunek	R _m [MPa]	R _e [MPa]	A ₅ [%]	Uwagi
stal niestopowa konstrukcyjna				
S235JR	360÷510	235	25	JR, J0 – udarność min. 27 J
S355JR	470÷630	355	22	
S450J0	530÷700	450	17	
stal niestopowa konstrukcyjna spawalna				
S275M	370÷530	275	24	M – walcowanie termomechaniczne, L – do niskich tem- peratur
S355ML	470÷630	355	22	
S460M	540÷720	460	17	
stale niestopowe do ulepszania cieplnego				
C22	430	240	24	C (0,17÷0,65%), Si (0,1÷0,4%), Mn (0,4÷0,9%), Cr, Mo, Ni, Cu
C30	510	280	20	
C35	550	300	18	
C45	620	340	14	
C60	710	380	10	
stal stopowa				
X6CrNiTi18	500÷700	190	18	stal austenityczna
16MnCr5	830	590	12	stal do nawęglania
34CrNiMo6	810	690	10	stal do ulepszania cieplnego
42CrMo4	1090	880	10	
51CrV4	1320	1180	6	stal sprężynowa
100Cr6	590÷780	235	6	stal na łożyska

Domieszki stopowe wybranych pierwiastków (w przypadku stali stopowych) wywołują określone zmiany własności tego stopu. Przyczyniają się one do:

- ❑ mangan (Mn) – zmniejszenia rozmiaru ziarna ferrytu w wyrobach walcowanych na gorąco oraz zwiększenia hartowności i wytrzymałości stali;
- ❑ krzem (Si) – stabilizacji ferrytu, przez co stale krzemowe zachowują strukturę ferrytyczną w bardzo szerokim zakresie temperatur, ponadto krzem stosowany jest do wyrobu stali resorowych oraz blach transformacji

torowych; pierwiastek ten (podobnie jak Mn) sprzyja rozrostowi ziaren oraz w małym stopniu obniża plastyczność stali;

- ❑ nikiel (Ni) – zwiększa twardość oraz wytrzymałość stali przy zachowaniu dobrej plastyczności, polepsza hartowność, nie ma wpływu na rozrost ziaren;
- ❑ chrom (Cr) – powoduje zwiększenie twardości stali, rozdrobnienie ziarna, zwiększenie zdolność do przechartowania oraz polepsza własności plastyczne stali;
- ❑ wanad (V) – przeciwdziała rozrostowi ziarna stali w wysokich temperaturach, zwiększa głębokość hartowania oraz poprawia plastyczność stopu;
- ❑ wolfram (W) – wpływa na drobnoziarnistość stali, zwiększenie hartowności, twardości i odporności na zużycie.

Stal zazwyczaj jest kształtowana na gorąco (w zakresie temperatur 900÷1200°C), co zapewnia zmniejszenie granicy plastyczności o kilkanaście razy oraz zwiększenie granicznej wartości odkształcenia plastycznego do poziomu zapewniającego szeroki zakres odkształceń plastycznych. W takim zakresie temperatur mikrostruktura stali jest austenityczna, tj. występuje jedna faza, która charakteryzuje się siecią krystaliczną typu A1 mającą aż 12 systemów łatwego poślizgu. Jednocześnie należy pamiętać, że stale stopowe mają zawsze mniejszą zdolność do odkształceń plastycznych niż stale węglowe oraz wyższe (i zazwyczaj węższe) zakresy temperatur obróbki plastycznej na gorąco. Związane jest to ze znaczącym wpływem pierwiastków stopowych na zakres występowania austenitu.

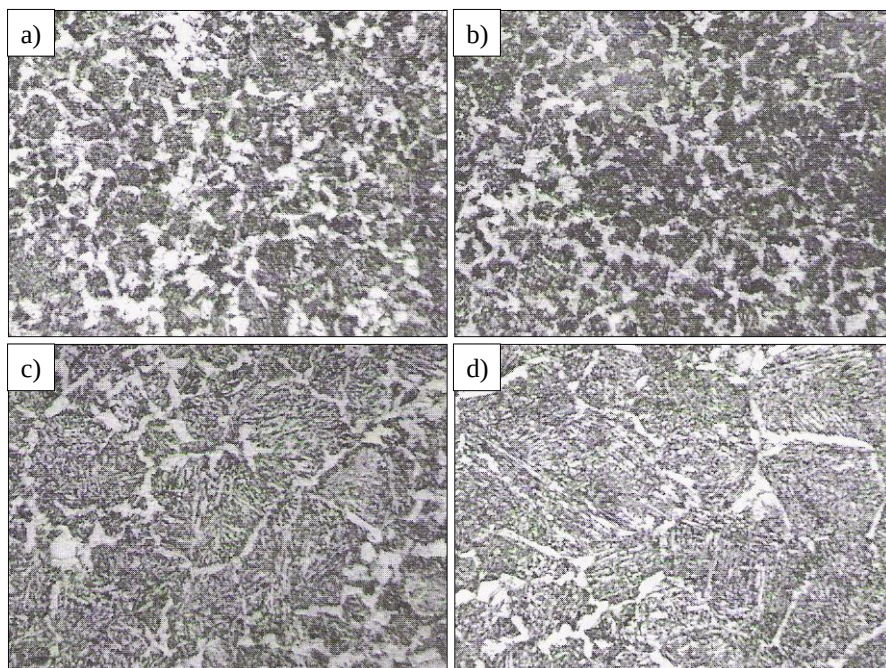
Na wartość naprężenia uplastyczniającego ma również wpływ struktura wyjściowa materiału (nie tylko stali) – im większe są wymiary ziaren, tym mniejszy jest opór plastyczny metalu. Pomimo tego w praktyce unika się stosowania materiałów gruboziarnistych, ze względu na ich niekorzystne własności, takie jak niska wytrzymałość, skłonność do pęknięcia oraz możliwość ujawniania się poszczególnych ziaren na swobodnych powierzchniach wyrobów kształtowanych plastycznie.

Wymiary ziarna wpływają na naprężenie uplastyczniające tylko w początkowym zakresie odkształceń. Przy większych deformacjach w metalu tworzą się subziarna, których wymiary decydują o własnościach plastycznych tego materiału. Wymiary te zależą przede wszystkim od prędkości i temperatury odkształcania oraz od rozkładu i ilości zanieczyszczeń. Subziarna są tym drobniejsze, im większa jest prędkość odkształcania i niższa temperatura procesu. Ponadto, występująca rekrytalizacja dynamiczna w strefie odkształceń oraz rekrytalizacja statyczna (występująca już w metalu odkształconym) powodują również zmianę wielkości ziarna w stosunku do rozmiaru wyjściowego. Częstym efektem opisanych zjawisk występujących w trakcie procesu kształtowania jest struktura

drobnoziarnista o ziarnach wydłużonych i zorientowanych w kierunku odkształcenia – tak jak to wcześniej opisano w rozdziale 1.4.5 dla przypadku ogólnego.

Przykład wpływu wartości temperatury odkształcania na postać struktury metalu umieszczono na rys. 1.13. Przedstawione cztery fotografie struktury wewnętrznej dotyczą stali stopowej 19MnCr5G odkształconej na gorąco w różnych temperaturach. Jak można zauważyć, przy niższych dopuszczalnych zakresach temperatur uzyskano strukturę drobnoziarnistą (pożądaną). Natomiast dalszy wzrost temperatury do zakresów górnych powoduje niestety rozrost ziaren oraz (nie pokazane na rysunku) ich przegrzewanie – czyli utlenianie ziaren i subziaren na swoich granicach.

Niektóre stopy odznaczające się drobnoziarnistą strukturą ($1\div 10\text{ }\mu\text{m}$) i dużą czułością na zmianę prędkości odkształcania, wykazują własności nadplastyczne – czyli zdolności do bardzo dużych odkształceń przy minimalnym nakładzie energii. Często, w temperaturze powyżej $0,4\ T_{\text{topnienia}}$ i prędkości odkształcania w zakresie $10^{-5}\div 10^{-1}\text{ s}^{-1}$, stopy nadplastyczne osiągają wydłużenie rzędu $A_5=1000\%$. Przykładowe stale stopowe o ziarnach o wielkości $2\text{ }\mu\text{m}$ osiągające stan nadplastyczny w temperaturze 900°C to (oznaczenia wg składu chemicznego): $\text{FeC}_{0,12}\text{Mn}_{1,2}\text{V}_{0,1}$ oraz $\text{FeC}_{0,34}\text{Mn}_{0,47}\text{Al}_2$.



Rys. 1.13. Mikrostruktura stali stopowej 19MnCr5G kształtowanej na gorąco przy różnej temperaturze : a) 900°C , b) 1000°C , c) 1100°C , d) 1200°C , gdzie uzyskano średnią wielkość ziarna odpowiednio: $28\text{ }\mu\text{m}$, $24\text{ }\mu\text{m}$, $46\text{ }\mu\text{m}$ oraz $84\text{ }\mu\text{m}$ [55]

Obróbka stali na zimno (w temperaturze poniżej $0,4 T_{\text{topnienia}}$) jest stosowana jedynie w przypadku, gdy powstałe siły nie powodują zbyt dużego wyężenia maszyn i narzędzi. Zazwyczaj, na zimno kształtuje się stalowe wyroby cienkościenne (poprzez cięcie, tłoczenie i gięcie) oraz bryły (poprzez procesy wydłużania – ciągnięcie, przepychanie, młotkowanie, matrycowanie, dogniatanie, wgłębianie). Ponadto, w przypadku wyrobów cienkościennych podgrzanie metalu do temperatury kształtowania na gorąco mija się z celem, ponieważ metal zbyt szybko wychładza się. Natomiast najbardziej właściwą strukturą wewnętrzną stali węglowej, zapewniającą dobrą tłoczność jest mikrostruktura, której głównym składnikiem są ferryt i perlit przy braku lub małej ilości równomiernie rozmieszczonego cementytu trzeciorzędowego. Wielkość ziaren powinna zawierać się w zakresie $25\div45\ \mu\text{m}$.

Ważnym zjawiskiem występującym w stalach kształtowanych na zimno jest powstawanie pola naprężeń własnych. Są to naprężenia pozostające (szczątkowe) w odkształconym metalu po zdjęciu obciążenia zewnętrznego. Wyznaczenie ich w przypadku ogólnym nie należy do zadań prostych. W tym celu konieczna jest znajomość dwóch pól naprężeń, tj. rzeczywistych (istniejących w uplastycznionym materiale pod koniec procesu obciążenia siłami zewnętrznymi) oraz naprężeń związanych z przeciwnie skierowanymi siłami zewnętrznymi, przy założeniu, że metal w całej objętości znajduje się w stanie sprężystym. Wynikiem nałożenia się tych dwóch pól naprężeń są naprężenia własne.

W przypadku ogólnym, naprężenia szczątkowe wywołane odkształceniami plastycznymi zawsze zwiększają wytrzymałość wyrobu, jeżeli przyłożone obciążenie zewnętrzne w czasie użytkowania jest zgodne z obciążeniem, które wywołało wcześniejsze trwałe jego odkształcenie. W przeciwnym razie, tj. gdy te dwa obciążenia mają przeciwne znaki, naprężenia są niekorzystne i należy je usunąć poprzez zastosowanie wyżarzania odpężającego. Ta obróbka cieplna nie powoduje likwidacji umocnienia materiału jakie uzyskano w trakcie procesu plastycznego kształtowania wyrobu.

Na zakończenie tego podrozdziału, zostaną przytoczone ważniejsze parametry wytrzymałościowe blach, pasów i taśm stalowych oraz blach i taśm karoseryjnych. Przedstawiono je w tabeli 1.3. Blachy, pasy i taśmy stalowe wykonywane są zazwyczaj z tych gatunków metali, które zapewniają uzyskanie podanych własności (często zgodnie z zamówieniem). Są one walcowane na gorąco (W) lub na zimno (Z), a ich klasyfikacja oparta jest na wynikach próby Erichsena (JE).

Natomiast w kolejnej tabeli 1.4 umieszczono składy chemiczne i twardość (w skali HV) wybranych stali narzędziowych stosowanych do wykonywania narzędzi dla tłoczników (do pracy na zimno) oraz narzędzi kuźniczych (do pracy

na gorąco). Maksymalny zakres pracy matryc kuźniczych nie przekracza 300÷350°C i zależy od temperatury kucia odkuwki.

Tabela 1.3.

Właściwości wytrzymałościowe blach, pasów i taśm stalowych do tłoczenia [75, 78]

Kategoria tłoczności	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Tłoczność JE ₂₀ [mm]	
			g = 0,5 mm	g = 2,0 mm
blacha stalowa cienka do tłoczenia (g = 0,2÷2,0 mm)				
B (bardzo głęboko tłoczna)	250÷390	32	7,1	12,1
G (głęboko tłoczna)	250÷410	28	6,9	11,9
T (tłoczna)	250÷410	25	6,7	11,8
P (płytko tłoczna)	< 490	23	5,5	9,9
blachy stalowe specjalne dla przemysłu motoryzacyjnego (g = 0,5÷2,5 mm)				
USB (na najtrudniejsze wytłoczki)	> 300	> 36	> 9,7	> 12,5
SSB (na szczególnie trudne wytłoczki)	280÷340	36	9,7	12,5
SB (na bardzo trudne wytłoczki)	280÷350	34	9,5	12,3
B (bardzo głęboko tłoczna)	250÷390	30	9,0	12,1
G (głęboko tłoczna)	250÷410	27	8,4	11,9

Tabela 1.4.

Wybrane stale narzędziowe stosowane na narzędzia w obróbce plastycznej

Znak	Główne dodatki stopowe [%]					Tward. HRC
	C	Si	Mn	Cr	inny	
stal niestopowa (węglowa) do pracy na zimno						
C45U	0,45	0,27	0,7	-	-	54
C70U	0,70	0,20	0,25	-	-	57
C90U	0,90	0,20	0,25	-	-	60
C120U	1,20	0,20	0,25	-	-	62
stal stopowa do pracy na zimno						
102Cr6	1,02	0,25	0,35	1,50	-	60
60WCW8	0,60	0,85	0,30	1,05	1,95W; 0,15V	58
X215CrW12	2,15	0,25	0,45	12,00	0,70W	62
X153CrMoV12	1,53	0,35	0,40	12,00	0,75Mo; 0,85V	61

c.d. tabeli 1.4.

stal stopowa do pracy na gorąco						
55NiCrMnV7	0,55	0,25	0,75	1,00	1,65Ni; 0,45Mo; 0,10V	42
32CrMoV12-2R	0,32	0,25	0,30	2,95	2,75Mo; 0,55V	46
X40CrMnV5-1	0,40	1,00	0,38	5,15	1,35Mo; 1,00V	50
X30W0V9-3	0,30	0,25	0,30	2,85	9,00W; 0,40V	48

1.5.2. Metale i stopy nieżelazne w obróbce plastycznej

Najbardziej popularnymi stopami nieżelaznymi używanymi w technologii obróbki plastycznej metali są **stopy aluminium**. Odznaczają się one wysoką wytrzymałością właściwą. Przy gęstości średniej ok. 2,7 g/cm³ wytrzymałość większości tych stopów (Al-Cu, Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg i innych) ustala się na poziomie 150÷300 MPa, a w przypadku niektórych stopów dodatkowo umocnionych (i ewentualnie ulepszonych cieplnie) – osiąga nawet 600 MPa. Ponadto, stopy aluminium charakteryzują się dobrą odpornością na korozję, a ich udurowność w niskich temperaturach nie maleje i jest większa niż dla stali. Mają one jednak niższą wytrzymałość zmęczeniową, co również przekłada się na mniejszą zdolność do dużych odkształceń plastycznych [11, 27, 40, 52, 88, 99, 101].

Czyste aluminium (seria 1000 wg oznaczenia numerycznego EN-AW) jest materiałem o małej wytrzymałości nie przekraczającej 60 MPa (w stanie zmiękczonej). Jego równomierne wydłużenie A₅ wynosi 27%, dlatego też, metal ten jest uznawany za materiał plastyczny i nie sprawia większych problemów w realizacji technologii obróbki plastycznej.

Stopy aluminium przeznaczone do przeróbki plastycznej zawierają na ogół mniejsze ilości dodatków stopowych, głównie miedź (Cu, do 5%), magnez (Mg, do 6%) oraz mangan (Mn, do 1,5%). Niekiedy stopy te zawierają w małych ilościach również krzem (Si), cynk (Zn), nikiel (Ni), chrom (Cr) oraz tytan (Ti). Typowymi stopami zaliczanymi do tego grona są:

- Duraluminium (dural miedziowy) – jest to stop aluminium z miedzią Al-Cu o zawartości miedzi (Cu) na poziomie 2,0÷4,9%. Ponadto, zawiera on również niewielki dodatek manganu (Mn 0,3÷1,0%), magnezu (Mg 0,15÷1,8%) lub żelaza (Fe) i krzemu (Si). Gęstość tego stopu wynosi 2,8 g/cm³. Dodatek Cu powoduje podwyższenie wytrzymałości nawet do 400 MPa, ale niestety pogarsza własności plastyczne. Również mangan zmniejsza plastyczność durali miedziowych, szczególnie przy kształtowaniu na gorąco, ale za to polepsza własności antykorozyjne tego stopu.

- ❑ Hydronaliniu – jest to stop aluminium z magnezem Al-Mg, gdzie zawartość Mg nie przekracza 5,6%. Dodatek magnezu pozytywnie wpływa na obniżenie masy właściwej (nawet do 2,55 g/cm³) przy jednoczesnym poprawieniu własności wytrzymałościowych oraz odporności na korozję w środowisku morskim. Niestety, pierwiastek ten wpływa niekorzystnie na własności plastyczne – dodatek ok. 2% magnezu obniża ponad 2-krotnie plastyczność (w stosunku do czystego aluminium) w zakresie temperatur 20÷200°C, zawęża zakres temperatury kucia (na poziomie ok. 450°C) oraz powoduje, że stop Al-Mg charakteryzuje się największym umocnieniem prędkościowym.
- ❑ Dural cynkowy – jest stopem aluminium z cynkiem Al-Zn, charakteryzującym się największą wytrzymałością, osiągającą poziom 600 MPa. Niestety stop ten jest mało plastyczny. Pomimo to, jest on stosowany do kucia odkuwek na gorąco oraz do produkcji blach, prętów i kształtowników.

Przeróbka plastyczna wszystkich stopów aluminium (w szczególności realizowana przy temperaturze na zimno) polepsza własności mechaniczne. Jednakże, technologie objętościowego kształtowania plastycznego tego materiału są trudne. Badania wykazują, że własności tych stopów są silnie związane z prędkością odkształcenia i temperaturą procesu. Podwyższenie tej prędkości powoduje jednocześnie wzrost temperatury odkuwki (zamiana pracy odkształcenia na ciepło). Również ważnym parametrem jest odkształcenie krytyczne (graniczne, inaczej – pękania), które decyduje o poziomie odkształcenia trwałego materiału w jednej operacji. Wszystko to decyduje o charakterze realizacji procesu plastycznego kształtowania oraz uzyskanej strukturze tych materiałów. W większości przypadków wyroby z aluminium wykonuje się poprzez kucie matrycowe wpływowe. Dodatkowo dochodzące trudności w uzyskaniu optymalnego kształtu przedkuwki decydują o dużej materiałochłonności tego procesu. Często również, przy źle dobranych parametrach technologicznych, mogą powstawać wady odkuwek klasyfikujące je jako braki.

W tabeli 1.5 umieszczono charakterystykę wybranych stopów aluminium do obróbki plastycznej. Podano parametry wytrzymałościowe wraz z oznaczeniami numerycznymi wg EN-AW. Dla porównania podano również już nieobowiązujące oznaczenia (ale funkcjonujące nadal w handlu) wg starej normy PN.

Tabela 1.5.

Ważniejsze parametry aluminium i wybranych jego stopów przeznaczonych do przeróbki plastycznej [11, 27]

Stop	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Twardość HB	Uwagi
czyste aluminium, seria 1000				
AW-1080A (Al99,8)	50	25	15	boc., A00

c.d. tabeli 1.5.

AW-1050A (Al99,5)	60	23	20	boc., A1
AW-1350A (Al99,5)	65	23	20÷30	boc.
stop Al-Cu (durale miedziowe), seria 2000				
AW-2014 (AlCuSiMg)	440	8	120	uw., PA33
AW-2017A (AlCuMg1)	380	10	110	uw., PA6
AW-2024 (AlCuMg2)	440	10	115	uw., PA7
AW-2618A (AlCu2Mg1,5Ni)	390	6	105	uw., PA30
stopy Al-Mn, seria 3000				
AW-3003 (AlMnCu)	95 130	22 6	25 40	boc. pt.
AW-3103 (AlMn1)	95	22	25	boc., PA1
stopy Al-Mg, seria 5000				
AW-5019 (AlMg5)	240	14	55	boc. PA20
AW-5005 (AlMg1)	100 130	17 9	30 40	boc., PA43 pt.
AW-5083 (AlMg4,5Mn0,7)	270	17	60	boc., PA13
AW-5251 (AlMg2)	150	16	40	boc., PA2
AW-5754 (AlMg3)	180	15	45	boc., PA11
stopy Al-Mg-Si, seria 6000				
AW-6061 (AlMg1SiCu)	180	15	55	boc., PA45
AW-6082 (AlMgSi1Mn)	200	10	80	boc., PA4
AW-6060/6063 (AlMgSi)	140	14	50	boc., PA38
stopy Al-Zn, seria 7000				
AW-7020 (AlZn4Mg1)	350	10	100	t., PA47
AW-7075 (AlZnMgCu1,5)	510	7	140	t., PA9
boc. – bez obróbki cieplnej, uw. – umocniony wydzieleniowo, pt. – stan półtwardy (uzyskany po przeróbce plastycznej ciągnięciem), t. – stan twardy (j.w.), A00, PA1, itd. – oznaczenia stopów wg starej normy PN (nazwy handlowe).				

Miedź i jej stopy [11, 52, 99] są kolejnymi materiałami technicznymi mającymi szerokie zastosowanie w budowie i eksploatacji maszyn. Miedź jest metalem barwy czerwonej, o gęstości $8,69 \text{ g/cm}^3$ i temperaturze topnienia 1083°C . Można ją przerabiać plastycznie na zimno i na gorąco, ale w przypadku przeróbki na zimno następuje znaczne utwardzenie metalu (w wyniku zgniotu), które usuwa się poprzez wyżarzanie rekrytalizujące w temperaturze $400\div 600^\circ\text{C}$. W tabeli 1.6 przedstawiono trzy podstawowe gatunki miedzi technicznie czystej, które kształtuje się zazwyczaj na gorąco w temperaturze $650\div 800^\circ\text{C}$. Cennymi własnościami tego metalu jest wysoka przewodność elektryczna i cieplna (szczególnie miedzi beztlenowej – tj. o zawartości tlenu nie przekraczającej 0,003%) oraz odporność na korozję. Natomiast łączna ilość zanieczyszczeń w miedzi technicznie czystej wynosi $0,01\div 1,0\%$.

Tabela 1.6.

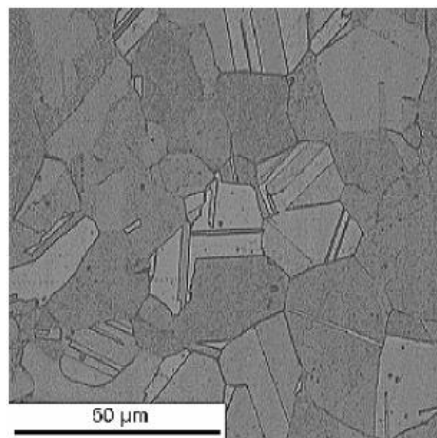
Wybrane własności miedzi technicznie czystej [11, 99]

Stop	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Twardość HB	Uwagi
CW004A (Cu99,9)	300÷360	10	80	
CW024A (Al99,9)	200÷260	42	40	s. wyżarz.
CW024AC	240÷300	15	65	
CW020A	300÷360	10	80	

Miedź stopowa jest z reguły przeznaczona do przeróbki plastycznej, a ilość głównego dodatku stopowego nie przekracza 2%. Znormalizowane gatunki obejmują miedź arsenową (CuAs), chromową (CuCr), cynową (CuSn), kadmową (CuCd), manganową (CuMn), niklową (CuNi), srebrną (CuAg), tellurową (CuTe) oraz cyrkonową (CuZr). Stopy te są stosowane na elementy aparatury chemicznej, elementy zgrzewarek, na uzbrojenia elektryczne, elektrody do spawania itd.

Mosiądze są stopami miedzi, w których głównym składnikiem stopowym jest cynk (Zn) w ilości przekraczającej 2%. Mosiądze do przeróbki plastycznej dzielą się na dwuskładnikowe (zawartość Zn do ok. $40\div 42\%$ - rys. 1.14) oraz wieloskładnikowe (mosiądze ołowiane o zawartości do 3% Pb oraz specjalne – np. wysokoniklowe o zawartości $11\div 19,5\%$ Ni). Ponadto, w zależności od zawartości cynku, mosiądze mogą być kształtowane tylko na zimno (do 30% Zn), na zimno lub gorąco ($35\div 40\%$ Zn) oraz tylko na gorąco (ok. 40% Zn). Mosiądze w znacznym stopniu umacniają się w wyniku zgniotu. Dlatego też, w zależności od stopnia przeróbki plastycznej, materiał ten może być dostarczany w czterech stanach (tabela 1.7). Przy większym stopniu przerobu plastycznego, mosiądze należy

poddać międzyoperacyjnemu wyżarzaniu rekrytalizacyjnemu w temperaturze 500÷580°C. Przykładową strukturę mosiądzu dwuskładnikowego CuZn30 (CW505L wg EN), składającą się bliźniaków rekrytalizacji w ziarnach, którą uzyskano w wyniku wyżarzania po obróbce plastycznej, przedstawiono na rys. 1.14. Generalnie, do przeróbki plastycznej należy stosować mosiądze o strukturze jednofazowej (tj. faza α – roztwór stały cynku w miedzi o sieci krystalicznej Al). Faza ta jest podatna na przeróbkę plastyczną na zimno (np. blacha ze stopu CuZn30 o drobnoziarnistej strukturze jest stosowana do głębokiego tłoczenia), ale niestety w zakresie temperatury 300÷700°C własności plastyczne tej grupy stopów radykalnie maleją (mimo tego, że Zn polepsza jego plastyczność).



Rys. 1.14. Mikrostruktura mosiądzu CW505L (CuZn30) – opis w tekście [11]

Tabela 1.7.

Własności mosiądzu CW508L (CuZn37) w czterech różnych stanach (wg stopnia przerobu plastycznego) [11]

stan	miękki	półtwardy	twardy	sprężysty
stopień gniotu [%]	-	10÷15	20÷25	50÷60
R _m [MPa]	290	350	400	520
A ₅ [%]	45	25	15	5

Miedzionikle. Ważną grupę technicznych stopów miedzi przeznaczonych do obróbki plastycznej stanowią miedzionikle, w których głównym dodatkiem stopowym jest Ni o zawartości 2÷45%. Ponadto, dla polepszenia plastyczności stopy te zawierają również 1÷2% Si, Al, Fe lub Mn. Nikiel powoduje podwyższenie własności mechanicznych, odporności na korozję, oporności elektrycznej właściwej oraz siły termoelektrycznej tych stopów. Miedzionikle są oparte na układzie Cu-Ni (ciągły roztwór α) o nieograniczonej rozpuszczalności składników w stanie ciekłym i stałym. Stopy te występują tylko w stanie przerobionym plastycznie. Można wyodrębnić dwie grupy miedzionikli:

- odporne na korozję, takie jak CuNi10FeMn (CW352H), CuNi30Mn1Fe, CuNi6Al2, CuNi3Si1Mn, CuNi9Sn2 (CW351H), CuNi19 oraz stop CuNi25 (CW350H) stosowany do wytwarzania monet;

- ❑ oporowe, np. CuNi44Mn1, który znalazł zastosowanie w elektrotechnice oraz do wytwarzania termoelementów.

Przy czym, dodatki stopowe 1% Fe oraz 0,5%Mn w stopie miedzi o zawartości niklu 5÷10% powodują, że stop ten ma bardzo dobre własności mechaniczne w zakresie podwyższonych temperatur do 350°C.

Brązy są stopami miedzi, w których głównym składnikiem stopowym (ponad 2%) jest cyna (Sn), aluminium (Al), krzem (Si), beryl (Be), ołów (Pb) lub inny, z wyjątkiem cynku i niklu. Oprócz stopów podwójnych, w budowie maszyn stosuje się również stopy wieloskładnikowe. Nazwa poszczególnych gatunków brązu pochodzi od głównego składnika stopowego (lub składników). Najważniejszymi stopami z tej grupy, które są stosowane w przeróbce plastycznej są:

- ❑ brązy cynowe, w których zawartość cyny (Sn) nie przekracza 10%. Oznaczają się one dobrą podatnością do przeróbki plastycznej na zimno i gorąco. Do kształtowania na zimno stosuje się brązy o zawartości cyny mniejszej niż 7%, mające strukturę roztworu stałego α . Przed procesem obróbki plastycznej na zimno materiał poddaje się wyżarzaniu ujednorodniającemu w celu usunięcia struktury silnie dendrytycznej. Brązy te odznaczają się dobrą wytrzymałością, są sprężyste oraz odporne na korozję i ścieranie (ze wzrostem zawartości cyny w stopie następuje wzrost jego własności). Natomiast zgniot wywołany przeróbką plastyczną powoduje silne umocnienie brązu cynowego (większe niż mosiądzów), np. przy zawartości 7% Sn, odkształcenie względne 50% tego metalu powiększa jego wytrzymałości z 390 MPa do 740 MPa, a w zależności od stopnia umocnienia oraz przeprowadzonej obróbki cieplnej brązy cynowe mogą być w stanie wyżarzonym, twardym lub sprężystym. Przykładowe gatunki omawianych metali przeznaczonych do przeróbki plastycznej to: CW450K (CuSn4), CW451K (CuSn5) CW452K (CuSn6) oraz CW453K (CuSn8). Brązy o zawartości 4÷6% Sn ze względu na bardzo dobre własności plastyczne i zabarwienie znalazły zastosowanie m.in. do wyrobu monet i medali. Natomiast brązy o zawartości 10% Sn są stosowane do wyrobu kół zębanych;
- ❑ brązy aluminiowe, są materiałem coraz częściej zastępującym brązy cynowe ze względu na swoją cenę, lepsze właściwości mechaniczne i mniejszy ciężar właściwy ($\rho = 7,7 \text{ g/cm}^3$). Brązy te mogą być dwuskładnikowe zawierające zazwyczaj 4÷8% Al (np. CuAl6, CuAl8) oraz wieloskładnikowe zawierające zwykle żelazo (Fe) i mangan (Mn) lub żelazo (Fe) i nikiel (Ni), albo inne kombinacje dodatków stopowych. Przykładowe gatunki brązów wieloskładnikowych do przeróbki plastycznej to: CW303G (CuAlFe3), CW306G (CuAl10FeMn2), CW307G (CuAl10Ni5Fe4). Główne ich cechy to wysoka wytrzymałość ($R_m = 400\div600 \text{ MPa}$) i plastyczność zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturach podwyższonych oraz dobra odporność na korozję i ścieranie. Stopy o zawartości 9÷11% Al zazwyczaj są stosowane

jako odlewnicze, ale często są one również przerabiane plastycznie na gorąco w temperaturze ok. 870°C. Ponadto, brązy o zawartości ok. 10% Al można hartować do twardości 160 HB (dla porównania, twardość brązów w stanie wyżarzonym wynosi 100 HB);

- ❑ brązy krzemowe zawierają zazwyczaj 2,5÷4,5% Si oraz niewielkie ilości manganu (Mn), cynku (Zn) oraz żelaza (Fe). Dodatki te ograniczają rozpuszczalność krzemu w roztworze stałym, przy czym mangan dodatkowo podnosi właściwości antykorozyjne brązów, a żelazo – zwiększa ich wytrzymałość. Stopy te odznaczają się dobrymi właściwościami mechanicznymi zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturach podwyższonych (maksymalnie do 300°C). Brązy te posiadają dobrą wytrzymałość zmęzeniową, dobre właściwości ślizgowe oraz dużą odporność na korozję. Ich struktura jest bardzo podobna do struktury brązów cynowych. Stop CW116C (CuSi3Mn1), przeznaczony do przeróbki plastycznej zarówno na zimno jak i na gorąco, podlega silnemu umocnieniu zgniotem i jest stosowany na sprężyny, części aparatury chemicznej oraz części maszyn narażone na ścieranie;
- ❑ brązy berylowe zawierają najczęściej 2÷3% Be i są przerabiane plastycznie na zimno lub na gorąco w temperaturze 780÷800°C. W stanie wyżarzonym stopy te mają wytrzymałość na poziomie 570 MPa, a wydłużenie A_5 osiąga wartość 50%. Starzenie w temperaturze 250°C polepsza wytrzymałość brązu ($R_m = 1300$ MPa), ale niestety znacząco pogarsza jego plastyczność ($A_5 = 2,5\%$). Ponadto, materiały te wykazują dobrą odporność na korozję, a w czasie tarcia nie wytwarzają iskier. Brązy berylowe znajdują zastosowanie m.in. do wyrobu sprężyn i amortyzatorów w budowie statków powietrznych oraz narzędzi dla przemysłu wytwarzającego materiały wybuchowe. Obecnie brązy te występują również z innymi dodatkami stopowymi, takimi jak nikiel (Ni), kobalt (Co), tytan (Ti), aluminium (Al) oraz mangan (Mn). Podwyższają one właściwości brązów oraz często zastępują stosunkowo drogi beryl (Be). Niestety, wymienione dodatki stopowe zwiększają efekt umocnienia wydzieleniowego, dzięki czemu stopy te są trudniejsze w obróbce plastycznej. Jednak wymiernym tego efektem jest najwyższa ich wytrzymałość spośród stopów miedzi, sięgająca 1500 MPa. Przykładowe gatunki tych brązów (zaliczanych do specjalnych) stosowanych do przeróbki plastycznej to CuBe2, CuBe2Pb, CuCo2Be. Ich gęstość wynosi 8,3 g/cm³;
- ❑ brązy manganowe zawierają 5÷20% Mn, wykazują wysokie właściwości plastyczne i duże umocnienie pod wpływem zgniotu. Stopy te zachowują swoje dobre właściwości w zakresie temperatury do ok. 300°C, przez co mogą być stosowane na urządzenia do pracy w temperaturach podwyższonych. W stanie wyżarzonym wytrzymałość tych stopów wynosi 300 MPa, a wydłużenie $A_5 = 40\%$. Przeróbka plastyczna powoduje dwukrotne zwiększenie

szenie ich wytrzymałości, ale kosztem zmniejszenia parametru A_5 do wartości 2%. Niektóre brązy Cu-Mn o dużym oporze elektrycznym, np. resistan (o zawartości 15% Mn) lub manganin (12% Mn i 4% Ni), przerabiane plastycznie na zimno lub na gorąco stosowane są w przemyśle elektrotechnicznym, przeważnie do budowy aparatury pomiarowej.

Kolejna grupa metali technicznych, które mają przyszłość w budowie maszyn, to **stopy magnezu** [11, 40, 52, 88, 99, 101]. Gęstość tego materiału jest mniejsza od aluminium i wynosi ok. $1,8 \text{ g/cm}^3$, co sprawia, że stopy te są zaliczane do grona najlżejszych metali. Wytrzymałość stopów magnezu jest niewielka, ale przeróbka plastyczna pozwala ją podwyższyć do poziomu $300\div340 \text{ MPa}$ (dla porównania czysty magnez w postaci walcowanej ma wytrzymałość $R_m = 160\div180 \text{ MPa}$). Głównymi składnikami stopowymi tych stopów są:

- ❑ aluminium (Al) – gdzie jego zawartość nie przekracza 11%. Powoduje ono podwyższenie własności wytrzymałościowych i twardości stopu, ale niestety równocześnie wywołuje zwiększenie kruchości na gorąco;
- ❑ cynk (Zn) o zawartości do 7%, który powoduje polepszenie własności wytrzymałościowych i plastycznych;
- ❑ mangan (Mn) – powoduje zwiększenie odporności na korozję i wywołuje rozdrobnienie ziarna. W stopach magnezu nie zawierających Al zawartość Mn wynosi nawet 5%, jednakże w stopach Mg-Al, ilość manganu nie przekracza 0,5%;
- ❑ cyrkon (Zr) – w ilości do 1% polepsza własności mechaniczne i sprzyja strukturze drobnoziarnistej;
- ❑ lit (Li) – w ilości do 1%. Powoduje on obniżenie gęstości stopu magnezu do poziomu $1,35\div1,62 \text{ g/cm}^3$.

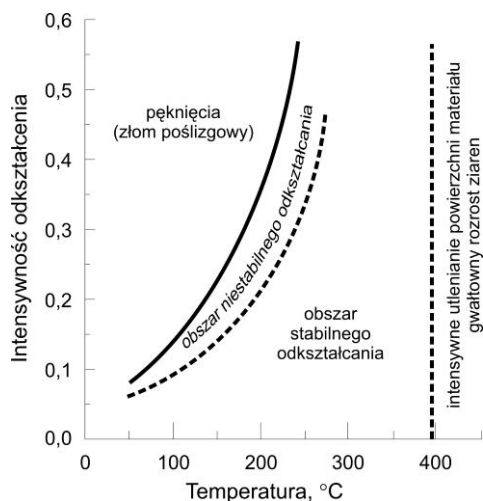
Ogólnie stopy magnezu przeznaczone do przeróbki plastycznej dzieli się na dwie podstawowe grupy, które:

- ❑ zawierają aluminium – charakteryzują się najlepszą względną plastycznością spośród wszystkich stopów magnezu – są to stopy na bazie: Mg-Al-Zn, Mg-Al-Mn oraz Mg-Al-RE;
- ❑ nie zawierają aluminium – tj.: Mg-Mn, Mg-Zn-Zr, Mg-Li, Mg-RE-Zr, Mg-RE-Zn.

Główną cechą stopów magnezu jest ich niska plastyczność w stosunku do innych stopów technicznych. Powodem jest ich budowa krystaliczna oparta na sieci elementarnej A3 (tabela 1.1) oraz bardzo szybkie blokowanie możliwych systemów poślizgu. To sprawia, że zarówno odkuwki jak i wyroby z blach, są odkształcane tylko na gorąco. Zgodnie z rys. 1.15, zakres obróbki plastycznej tych stopów jest bardzo wąski. Zbyt niska temperatura kucia powoduje bardzo szybkie osiągnięcie stanu kruchego, natomiast zbyt wysoka temperatura wywołuje gwałtowny rozrost ziaren, którego należy unikać. Podsumowując,

stopu magnezu należy odkształcać w takich warunkach, aby dominował wszechstronny stan ściskający – najbardziej zaleca się procesy wyiskiskania.

Stopy te są wykorzystywane w budowie maszyn głównie do wykonywania elementów konstrukcyjnych w lotnictwie, kosmonautyce oraz w budowie rakiet. Coraz częściej stopy magnezu są stosowane również w przemyśle motoryzacyjnym, szczególnie w klasie premium lub pojazdach sportowych. Informacje na temat najbardziej popularnych stopów magnezu do przeróbki plastycznej umieszczono w tabeli 1.8.



Rys. 1.15. Obszar stabilnego kształtowania (gdzie $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) stopu Mg-Zn-Zr oraz typowe ograniczenia procesu [11, 40, 101]

Tabela 1.7.

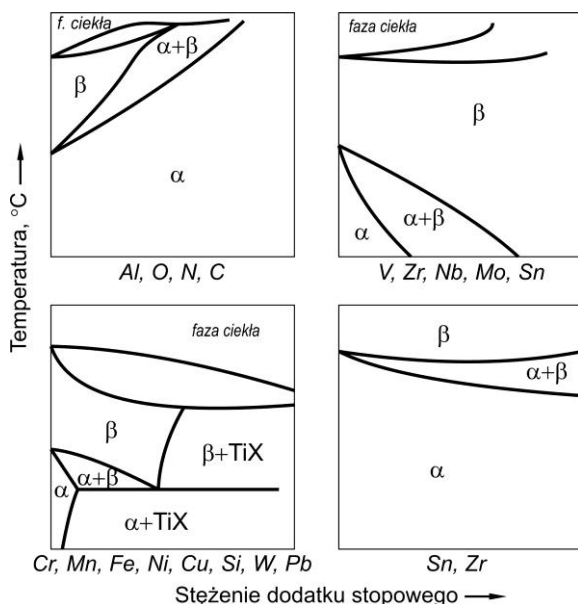
Wybrane własności typowych stopów magnezu przeznaczonych do przeróbki plastycznej

Stop	Główne dodatki stopowe [%]				R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
	Al	Mn	Zn	Zr			
MgMn2 (M2)		1,2÷2,0			150÷170	200÷230	10÷15
MgZn5Zr (ZK60)			4,8÷6,2	0,45÷0,80	200÷250	280÷320	4÷5
MgAl3Zn (AZ31)	2,5÷3,5	0,05÷0,40	0,5÷1,5		130÷200	240÷260	3÷12
MgAl6Zn (AZ61)	5,5÷6,5	0,05÷0,40	0,5÷1,5		180÷200	250÷280	6÷10
MgAl8Zn (AZ81)	7,8÷9,2	>0,12	0,2÷0,8		150÷170	200÷230	10÷15

Ostatnią grupę metali nieżelaznych, mającą ważne znaczenie dla budowy maszyn, stanowią **stopy tytanu** [11, 52, 99]. Ich bardzo dobre własności mechaniczne (wytrzymałość niektórych gatunków stopu tytanu osiąga poziom 1800 MPa) przy niewielkiej gęstości (ok. 4,5 g/cm³ – stopy te są najlżejszym materiałem technicznym po stopach magnezu i stopach aluminium) sprawiają, że są one materiałem stosowanym z powodzeniem w przemyśle lotniczym i kosmonautyce. Czysty tytan ściskany na prasie w temperaturze pokojowej można spęczyć, bez naruszenia spójności, do wartości odkształceń względnych ok. 50%, co w porównaniu z jego stopami uważa się za bardzo dobry wynik. Niestety, powyżej temperatury 120°C na powierzchni czystego tytanu pojawiają

się tlenki, a przy temperaturze 1200°C jego powierzchnia zaczyna płonąć. W praktyce stosuje się tytan techniczny (0,2÷1,2% zanieczyszczeń w postaci tlenu, azotu, węgla, żelaza, wodoru i krzemu), który w odróżnieniu od czystego metalu ma lepsze parametry wytrzymałościowe, ale niestety gorsze wskaźniki własności plastycznych. Podlega on obróbce plastycznej na zimno lub na gorąco (w temperaturze 750÷1000°C), przy czym bardzo istotną kwestią jest utrzymanie temperatury na ściśle określonym poziomie (duża czułość tego metalu na zmianę temperatury). Tytan techniczny nie podlega obróbce cieplnej, a jego maksymalna temperatura pracy to ok. 350°C.

Znacznie lepsze własności mechaniczne (duża wytrzymałość, odporność na korozję, duża twardość) oraz możliwość pracy w znacznie wyższych temperaturach (np. żaroodporność do 800°C) mają stopy tytanu. Niestety, obecna wiedza na temat sposobów przeróbki plastycznej tych metali jest uboga (w stosunku do stali), a uzyskiwane jego względne odkształcenie nie przekracza ok. 10÷15%. Domieszkami stopowymi najczęściej są: aluminium (Al, 3÷7%), molibden (Mo, 1÷4%), cyna (Sn, 2÷6%), krzem (Si, ok. 0,2%), wanad (V, 1÷6%) oraz cyrkon (Zr), chrom (Cr), żelazo (Fe) i mangan (Mn) w ilości ok. 1÷4%. Dodatki te mają zasadniczy wpływ na stabilizację odmian alotropowych stopu tytanu. Przykładowo, aluminium stabilizuje odmianę α (tabela 1.1), natomiast pierwiastki V, Mo oraz Cr stabilizują odmianę β – szczegóły pokazano na rys. 1.16. W rezultacie jednoczesnego stosowania wielu dodatków stopowych uzyskuje się różne struktury stopów, w tym mieszaninę $\alpha+\beta$, które zasadniczo wpływają na własności materiału. Z punktu widzenia obróbki plastycznej, stopy tytanu o odmianie β są bardziej plastyczne, dlatego też stopy o tej strukturze są przeznaczone do przeróbki plastycznej. Natomiast stopy o strukturze α (w temperaturze pokojowej), takiej jak np. TiAl6V4, należy podgrzać do temperatury kucia wynoszącej 950÷1000°C, co w rezultacie pozwala zwiększyć udział fazy β do ok. 45÷98% objętości.



Rys. 1.16. Schematyczny wpływ składników stopowych na układ fazowy stopów tytanu [11]

Ponadto, do stopów o strukturze α stosuje się również wyżarzanie normalizujące i rekrytalizujące. Do stopów o strukturze β można zastosować hartowanie (w wyniku którego zachodzi martenzytyczna przemiana z fazy β w odmianę α') lub zabieg przesycania. Natomiast w trakcie odpuszczania (starzenia) następuje umocnienie wydzieleniowe stopu fazami międzymetalicznymi lub drobno-dyspersyjną fazą β . Przykładowymi stopami tytanu do zastosowań technicznych są: o strukturze α – TiAl8MoV, TiAl6Sn2; TiAl6V4 o strukturze β – TiV13Cr11Al3, TiMo8V8Al3Fe2 oraz o strukturze $\alpha+\beta$ – TiMn8, TiAl3V3, TiAl6V6Sn2, TiAl6Sn2Zr4Mo2, TiAl7Mo4.

2. Nagrzewanie metali i stopów

Wiele procesów obróbki plastycznej metali i stopów realizowanych jest przy temperaturze wyższej od temperatury otoczenia. W takich przypadkach występuje konieczność nagrzania materiału przed kształtowaniem. Osiąga się to w drodze wymiany ciepła, która może zachodzić wewnątrz ciała (wskutek rozprzestrzeniania się ciepła od cząstek o temperaturze wyższej do niższej), albo pomiędzy ciałami o różnej temperaturze.

Rozróżnia się trzy podstawowe sposoby rozprzestrzeniania się ciepła, tj.:

- ❑ Przewodzenie (kondukcja) polegające na przekazywaniu energii od jednej cząstki do drugiej, dzięki ruchowi drgającemu tych cząstek. Proces ten kończy się z chwilą wyrównania temperatury ciała w całej rozpatrywanej objętości. Ta forma wymiany energii wymaga bezpośredniego kontaktu między ciałami.
- ❑ Promieniowanie (radiacja), gdzie przekazywanie ciepła jest efektem energii promieniowania, którego natura jest identyczna jak energii cieplnej. W tym przypadku energia cieplna ulega przekształceniu w energię promieniowania, następnie przebywa określoną przestrzeń z prędkością światła, by ostatecznie w innym miejscu ponownie przekształcić się (całkowicie lub częściowo w energię cieplną).
- ❑ Unoszenie (konwekcja), które związane jest z ruchem konwekcyjnym gazów lub cieczy, będącym następstwem różnicy gęstości (różnicy temperatur) lub wymuszenia przez czynniki zewnętrzne.

Oddziaływanie ciepła na metal powoduje spadek własności sprężystych, zmniejszenie oporu plastycznego (naprężeń uplastyczniających) i zwiększenie plastyczności. Ponadto, doprowadza ono do rekrytalizacji i rozpuszczania węglików. Warunki cieplne opracowywane są oddzielnie dla każdego gatunku materiału, po uwzględnieniu jego struktury wyjściowej oraz objętości i wymiarów przekroju poprzecznego.

2.1. Zakres temperatury kształtowania

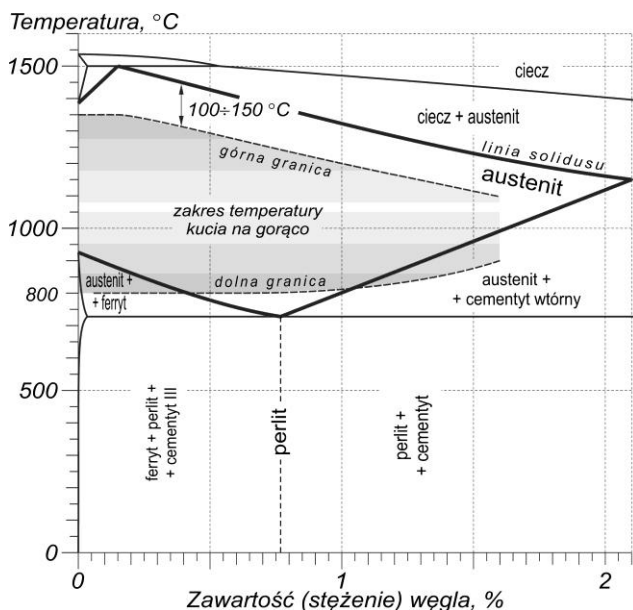
Temperatura kształtowania materiału na gorąco mieści się między temperaturami krzepnięcia i końca rekrytalizacji. Niższą temperaturę ma materiał obrabiany w procesach kształtowania na zimno i na półgorąco (czasami nazywanym kształtowaniem na ciepło).

Na ogół od góry temperaturę kształtowania ogranicza spalanie materiału, które następuje w efekcie dyfuzji tlenu wzdłuż ziaren austenitu (w przypadku stali). Doprowadza to do powstania wtrąceń tlenków, powodujących osłabienie między ziarnami.

Określenie dolnej granicy kształtowania jest bardziej złożone. Należy się w tym przypadku kierować zasadą, by kształtowany materiał miał budowę jednofazową. Wtedy odkształcenie plastyczne jest bardziej równomierne i uzyskiwane są lepsze własności mechaniczne kształtowanych półwyrobów.

W przypadku stali węglowych zakres temperatur kształtowania można dobrać z wykresu żelazo-węgiel (obszar zaciemniony na rys. 2.1). Przyjmuje się, że górna temperatura kształtowania leży $100\div150\text{ }^{\circ}\text{C}$ poniżej linii solidusu, zaś dolna wynosi około $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. W praktyce przemysłowej stosuje się następujące zakresy temperatury obróbki plastycznej na gorąco:

- ❑ dla stali węglowej $1250\div850\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ❑ dla brązów $850\div750\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ❑ dla miedzi $750\div700\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ❑ dla stopów aluminium $500\div400\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ❑ dla stopów magnezu $480\div350\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ❑ dla stopów tytanu $960\div900\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Rys. 2.1. Zakres temperatur nagrzewania i kucia stali węglowych pokazany na wykresie żelazo-węgiel (cementyt) [12, 95, 99]

2.2. Czas nagrzewania materiału wsadowego

Nagrzewanie powinno być prowadzone możliwie w najkrótszym czasie, gdyż gwarantuje to nieduży rozrost ziaren, mniejsze odwęglenie i zmniejszenie strat materiału na zgorzelinę.

Przy doborze czasu rozróżnia się nagrzewanie przedmiotów cienkich i grubych (masywnych). Kwalifikacja do jednych z tych grup odbywa się na podstawie liczby Biota B_i , którą oblicza się z zależności:

$$B_i = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (2.1)$$

gdzie: α – współczynnik wnikania ciepła, L – charakterystyczny wymiar liniowy wsadu, λ – współczynnik przewodnictwa cieplnego.

W przypadku, gdy $B_i \leq 0,25$ wsad zalicza się do przedmiotów cienkich, zaś dla $B_i \geq 0,5$ do masywnych. W zakresie przejściowym $0,25 < B_i < 0,5$ wsad można zaliczyć do pierwszej lub drugiej z podanych grup.

W praktyce przemysłowej przedmioty cienkie nagrzewa się wyłącznie przy stałej temperaturze pieca lub przy stałej prędkości wzrostu temperatury wsadu. W przypadku przedmiotów masywnych można dodatkowo zastosować sposoby nagrzewania stałym strumieniem ciepła oraz przy stałej temperaturze powierzchni [98].

W praktyce przemysłowej dla obliczenia czasu nagrzewania przedmiotów ze stali stosuje się zależność Dobrochutowa [95], zgodnie z którą

$$t = m k d^{\frac{3}{2}}, \quad (2.2)$$

gdzie: t – czas nagrzewania [h]; m – współczynnik uwzględniający sposób ułożenia materiału w piecu, dobierany zgodnie z tab. 2.1; k – współczynnik zależny od rodzaju stali (dla stali węglowej $k = 10$, a dla stali wysokogatunkowych $k = 20$), d – wymiar przekroju poprzecznego wsadu (średnica, długość boku) [m].

W przypadku nagrzewania przedmiotów grubych czas nagrzewania t (liczony w godzinach) można oszacować za pomocą zależności przybliżonych:

□ dla stali miękkiej

$$t = (12 \div 13) d^2, \quad (2.3a)$$

□ dla stali twardej

$$t = (24 \div 26) d^2, \quad (2.3b)$$

w których przez d oznaczono wymiar przekroju poprzecznego, podawany w metrach.

Tabela. 2.1.

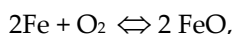
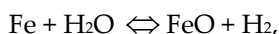
Wartości współczynnika m uwzględniającego sposób ułożenia materiału w piecu

Sposób ułożenia materiału (wsad okrągły)	m	Sposób ułożenia materiału (wsad o przekroju kwadratowym)	m
	1		1
	1		1,3
	2		4
	1,5		2,2
	1,3		1,8

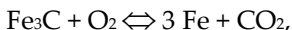
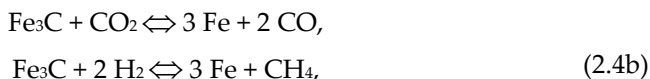
2.3. Utlenienie i odwęglenie stali

Podczas nagrzewania stali w podwyższonej temperaturze następuje oddziaływanie atmosfery pieca na nagrzewany materiał, które określone jest za pomocą następujących reakcji głównych:

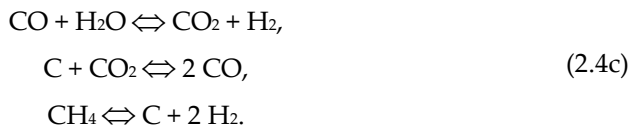
□ utlenienia



□ odwęglania



□ innych (w kolejności wymiany, syntezy i analizy)



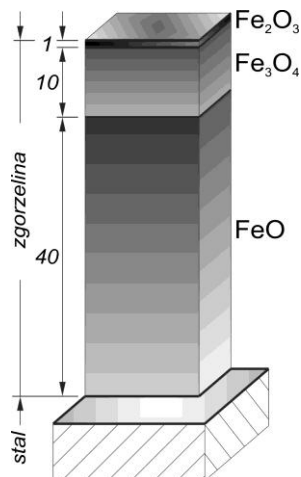
Analiza wpływu głównych składników atmosfery piecowej na metal pokazuje, że:

- Tlen działając na ferryt w stali tworzy tlenki żelaza oraz zmniejsza zawartość węgla przy powierzchni stali, powodując jej odwęglanie.
- Dwutlenek węgla odwęglą stal i utlenia ferryt, tworząc tlenek węgla.
- Tlenek węgla działa nawęglająco i tworzy z ferrytem (w wysokiej temperaturze) węgliki.
- Węglowodory (np. metan) działają w sposób nawęglający.
- Wodór jest silnym reduktorem tlenków żelaza i działa odtleniająco (przy niskich temperaturach nie powoduje odwęglania stali).
- Para wodna powoduje utlenienie ferrytu, natomiast wchodząc w reakcje z węglem zawartym w stali tworzy tlenek węgla i powoduje wydzielanie się wodoru.
- Azot jest obojętny względem ferrytu.

W zależności od dominującego charakteru poszczególnych reakcji atmosfera pieca może być utleniająca, redukująca lub obojętna.

W procesie utleniania na powierzchni stali powstaje warstwa tlenków Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO zwana zgorzeliną. Składa się ona z kilku warstw, o grubościach przedstawionych na rys. 2.2., mających różne temperatury topnienia (FeO 1370 °C, Fe_3O_4 1527 °C, Fe_2O_3 1565 °C). Intensywność i ilość tworzonej zgorzeliny zależy od:

- temperatury i czasu nagrzewania (pierwsze ślady zgorzeliny stwierdza się przy temperaturze około 550 °C, a jej szczególnie szybki wzrost ma miejsce przy temperaturze powyżej 900 °C) - rys. 2.3;
- atmosfery pieca (najsilniej utleniająco działają tlen i para wodna);



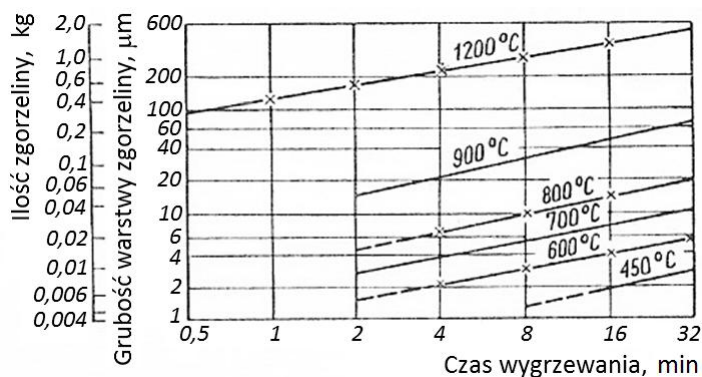
Rys. 2.2. Układ warstw zgorzeliny [92, 98]

- ❑ składu chemicznego stali;
- ❑ prędkości gazów w komorze pieca;
- ❑ kształtu i wymiarów materiału wsadowego.

Zgorzelina jest zjawiskiem szkodliwym, gdyż:

- ❑ powoduje straty materiału (przy jednorazowym nagrzewaniu około 3%, a przy powtórnym około 1,5%);
- ❑ w procesie kształtowania może być wprasowana w powierzchnię materiału uszkadzając wyrób;
- ❑ zmniejsza przewodnictwo cieplne na powierzchni kontaktu i prowadzi do zwiększenia czasu nagrzewania;
- ❑ utlenienie żelaza powoduje wywiązanie się dużych ilości ciepła, wskutek czego spaliny uchodzące z pieca mają wysoką temperaturę, co zwiększa straty cieplne.

We wszystkich temperaturach wraz z utlenieniem żelaza zachodzi w stali proces utlenienia węgla, czyli tzw. odwęglanie. Warstwa odwęglana występuje tuż pod warstwą zgorzeliny, a jej grubość zwiększa się wraz z podwyższeniem temperatury i przedłużeniem czasu przetrzymywania w piecu. Dodatki wolframu i aluminium intensyfikują proces odwęglania, podczas gdy oddziaływanie chromu jest przeciwne. Nadmierne odwęglanie materiału jest negatywne, gdyż obniża odporność stali na ścieranie.



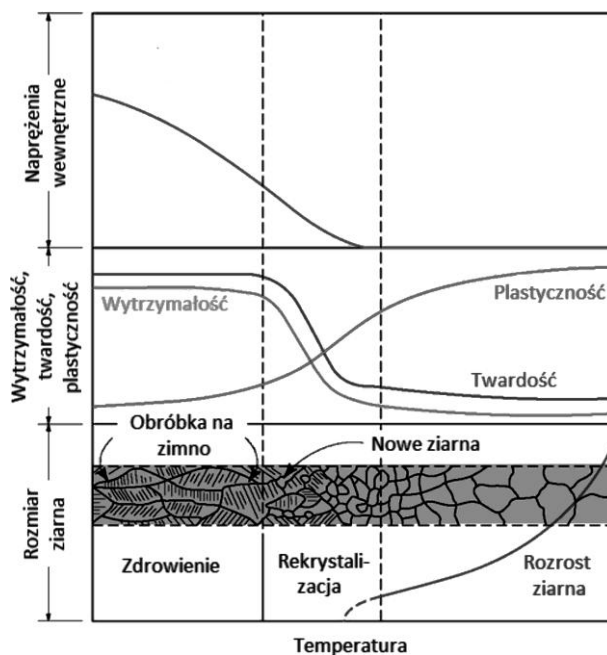
Rys. 2.3. Wpływ temperatury i czasu nagrzewania na stopień utlenienia stali C15 [92]

2.4. Zjawiska towarzyszące procesowi nagrzewania

Przy nagrzewaniu metalu odkształconego plastycznie do stosunkowo niskich temperatur, przekraczających jednakże $0,3 T_{\text{topnienia}}$ (gdzie $T_{\text{topnienia}}$ – absolutna temperatura topnienia w K) zanikają zniekształcenia sieci krystalicznej i zmniejszają się naprężenia wewnętrzne. Taki proces nosi nazwę zdrowienia,

które zgodnie z rys. 2.4 prowadzi do nieznacznego zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie i wzrostu plastyczności materiału.

Przy nagrzewaniu materiału do wyższej temperatury zachodzi proces rekryształacji. Rekryształacja została już omówiona w rozdziale 1.4.4. W tym miejscu warto nadmienić, że dla wielu stopów, w trakcie ich odkształcania, temperatura rekryształacji może osiągać nawet wartość $0,8 T_{\text{topnienia}}$ ponieważ jest zależna także od stopnia zgniotu materiału.



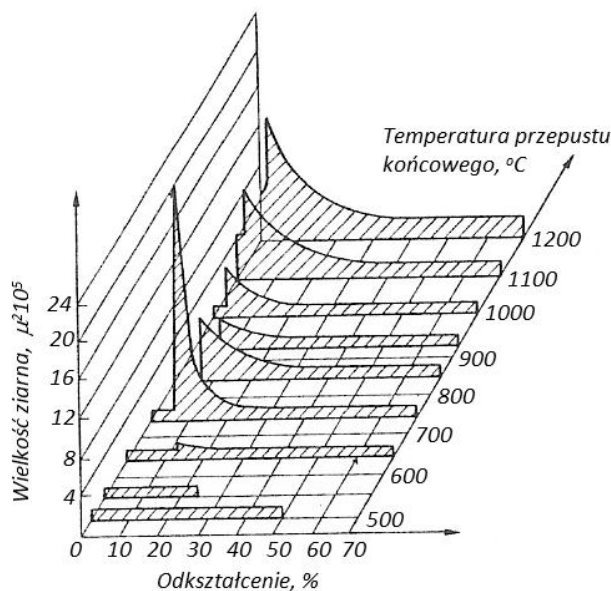
Rys. 2.4. Schemat zmian zachodzących przy nagrzewaniu zgniecionej metali [12, 16, 82, 99]

Proces rekryształacji można podzielić na dwa okresy. W pierwszym z nich ziarna zniekształcone w wyniku zastosowanego wcześniej procesu obróbki plastycznej ulegają przekształceniu w drobne ziarna o kształcie równoosiowym, zaokrąglonym i przypadkowo zorientowanym. Jest to tzw. rekryształacja właściwa, lub pierwotna (zgodnie z rys. 1.12). Dalsze zwiększanie temperatury powoduje zmianę charakteru rekryształacji. Mianowicie po całkowitym zregenerowaniu struktury następuje wzrost ziaren dużych kosztem ziaren drobnych (rys. 2.4). W konsekwencji liczba ziaren maleje, zaś ich wielkość gwałtownie rośnie. Ta rekryształacja określana jest jako wtórna (patrz również rozdział 1.4.4 oraz 1.4.6).

Podczas rekryształacji zachodzi zmiana wszystkich własności metalu charakterystycznych dla stanu zgnieczonego. Następuje zupełne usunięcie skutków gniotu, zmniejszają się własności wytrzymałościowe, a plastyczność wzrasta (rys. 2.4).

Rozrost ziaren następujący po procesie rekryształacji zależy nie tylko od temperatury i czasu wygrzewania, ale także od struktury jaką materiał miał w chwili zakończenia rekryształacji oraz zastosowanego stopnia gniotu. Za-

leżności te na ogół przedstawia się na przestrzennych wykresach rekrytalizacji, z których jeden dotyczący stali niskowęglowej pokazano na rys. 2.5.



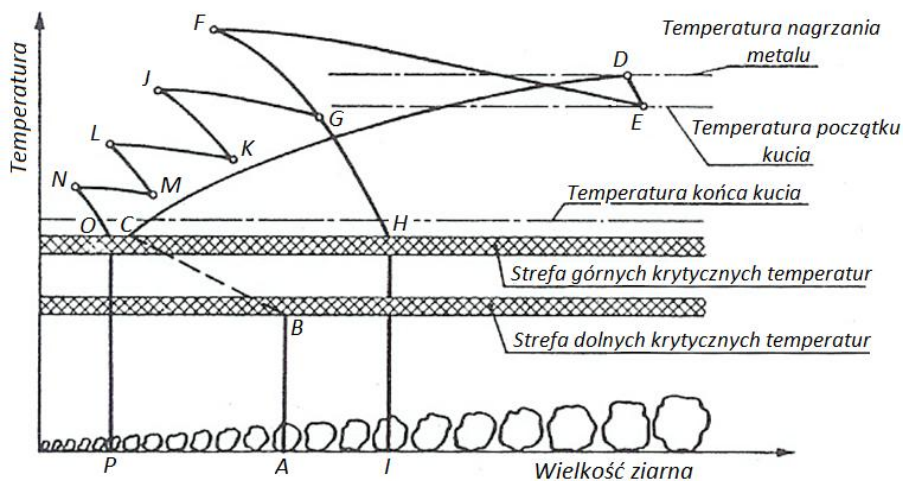
Rys. 2.5. Wykres rekrytalizacji stali niskowęglowej [92]

2.5. Zjawiska towarzyszące odkształceniom plastycznym na gorąco i półgorąco

Przy odkształceniu plastycznym na gorąco, tj. powyżej temperatury rekrytalizacji w materiale zachodzą równocześnie dwa przeciwstawne procesy, tj. zdrowienie i umocnienie – które omówiono już wcześniej w rozdziale 1.4. Cechą charakterystyczną, ważną dla obróbki plastycznej realizowanej w podwyższonej temperaturze jest to, że oba te zjawiska przebiegają na ogół z różną prędkością.

W procesach kształtowania stali na gorąco wielkość gniotów (odkształceń) należy ustalać w sposób staranny, unikając przy tym gniotów krytycznych (na ogół w zakresie $8\div 10\%$), przy których ma miejsce nadmierny wzrost ziaren. Planując proces kształtowania trzeba też uwzględnić, iż wielkość ziarna zależy od końcowej temperatury odkształcenia.

Zmianę zależności wielkości ziarna w przykładowym procesie kucia przedstawiono na rys. 2.6. Przyjęty do realizacji procesu wsad, charakteryzowany wielkością ziarna określoną przez punkt A poddano najpierw nagrzewaniu. W pierwszej fazie nagrzewania (do punktu B) wielkość ziarna nie ulega zmianie, następnie w wyniku rekrytalizacji właściwej następuje odbudowa struktury,



Rys. 2.6. Wykres zmiany wielkości ziarna w procesie kucia na młocie, w zależności od końcowej temperatury kształtowania [92]

prowadząca do zmniejszenia wielkości ziarna do wartości odpowiadającej punktowi C. Dalsze nagrzewanie materiału prowadzi do rozrostu ziarna (w trakcie rekrytalizacji wtórnej), którego wielkość zwiększa się do wartości opisanej położeniem punktu D. Po osiągnięciu temperatury kucia (punkt D) wsad wyjmujemy się z pieca i układamy w wykroju matrycy dolnej. Następuje wówczas spadek temperatury materiału, któremu towarzyszy jednak wzrost wielkości ziarna (punkt E). W wyniku pierwszego uderzenia wykonanego przez matrycę górną następuje rozbiecie gruboziarnistej struktury materiału, któremu towarzyszy wzrost temperatury następujący w efekcie zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło (punkt F). W okresie przerwy pomiędzy pierwszym a drugim uderzeniem ma miejsce rozrost ziaren i spadek temperatury materiału (punkt G). Gdyby w tym momencie proces kucia uległ zakończeniu to wielkość ziarna zmieniałaby się w trakcie stygnięcia wzdłuż linii G-H-I, a ostateczna wielkość ziarna w odkuwce byłaby większa niż przed procesem kucia. Natomiast w przypadku, gdy następują kolejne uderzenia matrycy górnej ma miejsce dalsze rozdrabnianie struktury materiału, którego ziarna po ostatnim, czwartym uderzeniu mają wielkość opisaną przez punkt N. Ostatecznie po ostygnięciu materiału odkuwka będzie miała ziarna znacznie mniejsze (punkt P) niż materiał wsadowy.

Na przebieg procesu rekrytalizacji oraz wielkość oporu odkształcenia duży wpływ wywiera prędkość odkształcenia. Na ogół im większa jest prędkość odkształcenia tym trudniej przebiega rekrytalizacja i tym większy jest opór odkształcenia. Jednakże w pewnych przypadkach przy bardzo dużych prędko-

ściach odkształcenia, np. wskutek zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło, paradoksalnie może mieć miejsce zmniejszenie oporu plastycznego materiału.

2.6. Metody nagrzewania

Nagrzewanie metali i ich stopów w kuźniach realizowane jest w piecach płomieniowych i elektrycznych lub też bezpośrednio za pomocą prądu elektrycznego. Przy czym najbardziej rozpowszechnione są sposoby bazujące na wykorzystaniu prądu elektrycznego, do których zalicza się nagrzewanie: w elektrycznych piecach oporowych, w elektrolizie, indukcyjne oraz oporowe.

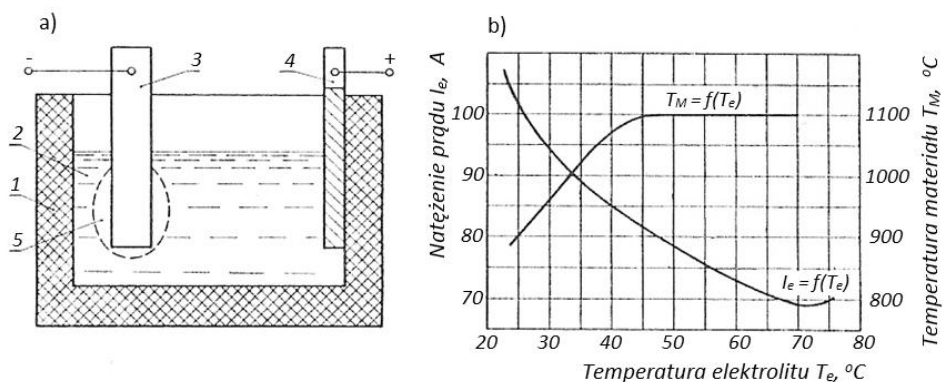
2.6.1. Nagrzewanie w elektrycznych piecach oporowych

Materiał w piecach elektrycznych oporowych nagrzewany jest w wyniku promieniowania cieplnego elementów grzejnych oraz ścian pieca. Natomiast wyrównanie temperatury w całej objętości materiału jest efektem przewodnictwa cieplnego.

Ta metoda jest wykorzystywana w praktyce do nagrzewania metali nieżelaznych i ich stopów, a także małych odkuwek stalowych o skomplikowanym kształcie.

2.6.2. Nagrzewanie w elektrolizie

Czasami wsady do obróbki plastycznej nagrzewane są w wannach wypełnionych elektrolitem. Schemat takiego procesu przedstawiono na rys. 2.7. Nagrzewanie tym sposobem polega na zanurzeniu w elektrolizie 2 (najczęściej jest to roztwór wodny soli) metalu 3, stanowiącego katodę. Następnie przez



Rys. 2.7. Schemat nagrzewania materiału w elektrolizie: a) wanna solna; b) wykres zależności natężenia prądu I_e i temperatury materiału T_M od temperatury elektrolitu T_e , gdzie: 1 – wanna, 2 – elektrolit, 3 – nagrzewany metal, 4 – elektroda, 5 – strefa gazowa [98]

elektrolit przepuszcza się prąd stały o określonym natężeniu i napięciu 200÷250 V, który płynąc pomiędzy anodą 4 i katodą powoduje szybkie nagrzewanie materiału, przy powierzchni którego powstaje strefa gazowa 5. Konduktancja (przewodność elektryczna) w tej strefie jest mniejsza od konduktancji elektrolitu, co sprzyja zwiększonemu wydzielaniu się ciepła.

Zaletami nagrzewania w elektrolicie są:

- ❑ równomierność i bezzgorzelinowość nagrzewania materiału;
- ❑ łatwość kontroli czasu i temperatury nagrzewania;
- ❑ możliwość automatyzacji podawania i wyjmowania materiału;
- ❑ niski koszt oprzyrządowania.

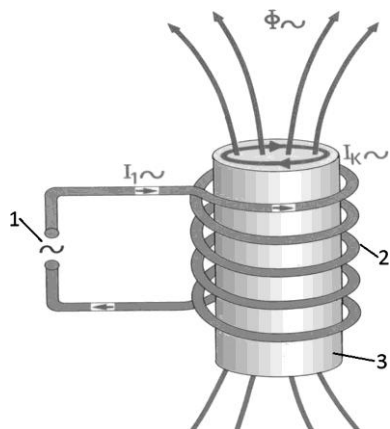
Natomiast wady tej metody stanowią:

- ❑ duże zużycie energii elektrycznej;
- ❑ mała trwałość elektrod;
- ❑ brak możliwości nagrzewania materiałów zwiniętych w kręgi.

2.6.3. Nagrzewanie indukcyjne

Ta metoda nagrzewania jest najczęściej wykorzystywana w produkcji masowej i bazuje na zjawisku nagrzewania się przewodników elektrycznych, które zostały umieszczone w zmiennym polu magnetycznym.

Zasadę nagrzewania indukcyjnego pokazano na rys. 2.8. W uzwojeniu pierwotnym (induktorze) płynie prąd przemienny o wielkiej częstotliwości, który indukuje we wsadzie (stanowiącym uzwojenie wtórne) siły elektromotoryczne, które z kolei stają się przyczyną powstawania prądów wirowych o dużym natężeniu. Prądy te wytwarzają duże ilości ciepła nagrzewającego metal.



Rys. 2.8. Uproszczony układ indukcyjnego urządzenia grzewczego wielkiej częstotliwości: 1 – generator wielkiej częstotliwości, 2 – uzwojenie pierwotne (induktor), 3 – uzwojenie wtórne (nagrzewany materiał)
[30, 51]

Prądy wirowe płyną przy powierzchni wsadu, a głębokość ich wnikania δ można wyznaczyć z następującej zależności:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}, \quad (2.5)$$

gdzie: δ – głębokość wnikania, m; ρ – rezystancja materiału [Ωm]; przenikalność magnetyczna materiału [H/m]; f – częstotliwość prądu [Hz].

Bardzo ważnym zagadnieniem jest dobór częstotliwości prądu i czasu nagrzewania. Przykładowe, zalecane wartości

tych parametrów, stosowanych w procesach nagrzewania prętów okrągłych ze stali konstrukcyjnej zestawiono w tabeli 2.2. W przypadku nagrzewania prętów ze stali wysokostopowych czas ten należy zwiększyć o 20÷30%.

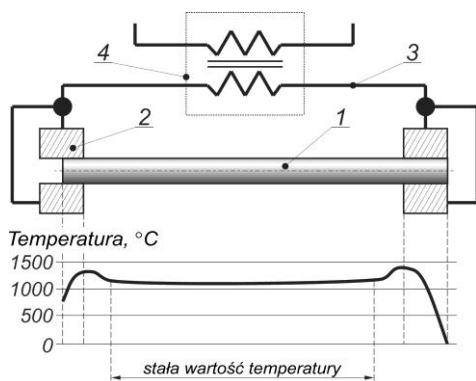
Tabela 2.2.

Zalecane częstotliwości prądu i czasy nagrzewania stali konstrukcyjnych [92]

Średnica wsadu, mm	Zalecane częstotliwości prądu, Hz					Czas nagrzewania, min przy różnych częstotliwościach, Hz				
						50	500	1000	2500	8000
20	---	---	---	---	8000	---	---	---	---	0,4
30	---	---	---	2500	8000	---	---	---	0,6	0,8
40	---	---	---	2500	8000	---	---	---	1,0	1,4
50	---	---	1000	2500	8000	---	---	1,4	1,6	2,0
60	---	---	1000	2500	---	---	---	2,0	2,3	---
70	---	500	1000	2500	---	---	2,6	2,8	3,0	---
80	---	500	1000	2500	---	---	3,2	3,6	4,0	---
90	---	500	1000	2500	---	---	4,2	4,6	5,0	---
100	---	500	1000	---	---	---	5,5	6,0	---	---
110	---	500	1000	---	---	---	7,0	7,5	---	---
120	---	500	1000	---	---	---	8,5	9,0	---	---
150	50	500	1000	---	---	12,0	14,0	16,0	---	---
175	50	500	---	---	---	15,0	18,0	---	---	---
200	50	500	---	---	---	20,0	25,0	---	---	---

2.6.4. Nagrzewanie kontaktowo-oporowe

Ta metoda nagrzewania polega na bezpośrednim przepuszczeniu prądu przez materiał nagrzewany (rys. 2.9). Zużycie energii elektrycznej przypadającej na nagrzanie 1 kg materiału, jest tutaj mniejsze niż w metodzie indukcyjnej, a urządzenia stosowane do nagrzewania mają prostą budowę i są tanie.



W procesie nagrzewania kontaktowo-oporowego metal nagrzewa się w wyniku cieplnego działania prądu. Ilość ciepła wydzielonego w metalu w czasie przepływu prądu jest

Rys. 2.9. Uproszczony schemat nagrzewu oporowego i rozkład temperatury w nagrzewanym pręcie: 1 – wsad (pręt stalowy), 2 – szczęki zaciskowe, 3 – przewody, 4 – transformator [50, 92]

wprost proporcjonalna do oporności metalu, czasu trwania przepływu (zgodnie z prawem Joulea) i kwadratu natężenia prądu.

Czas nagrzewania metalu można obliczyć na podstawie zależności:

$$t = \frac{m_{100} c (T_2 - T_1)}{\alpha}, \quad (2.6)$$

gdzie: m_{100} – masa pręta o długości 100 mm [kg]; c – ciepło właściwe [J/kg K]; α – współczynnik intensywności nagrzewania, równy 4÷6 J/s; T_1 , T_2 – temperatura początkowa i końcowa [K].

Aby uzyskać krótki czas nagrzewu wsadu transformatory wytwarzają prąd o dużym natężeniu i małym napięciu, rzędu 1 ÷ 13 V. Sprawność nagrzewania tą metodą wynosi ok. 82 ÷ 85%. W przypadku nagrzewu 1 tony wsadu wykonanego ze stali, należy zużyć energię elektryczną w ilości 325 ÷ 350 kWh.

Nagrzewanie oporowo-kontaktowe stosuje się do nagrzewania prętów okrągłych o średnicy do 70 mm. Metoda jest opłacalna dla długich prętów, dla których stosunek długości do kwadratu średnicy $l/d^2 \gg 1$. Wadą nagrzewu oporowo-kontaktowego jest nierównomierne nagrzanie metalu (rys. 2.9) – końcówki prętów posiadają temperaturę znacznie niższą niż jego część środkowa.

2.7. Piece do nagrzewania

Ze względu na źródła ciepła piece można podzielić na elektryczne i płomieniowe. Pierwsze z nich stosowane są przede wszystkim do nagrzewania metali nieżelaznych, drugie zaś do nagrzewania stali. W piecach płomieniowych stosuje się następujące paliwa:

- ☐ stałe (węgiel i koks),
- ☐ płynne (olej opalowy, mazut),
- ☐ gazowe (gaz ziemny, gaz koksowniczy, gaz czadnicowy).

2.7.1. Piece płomieniowe

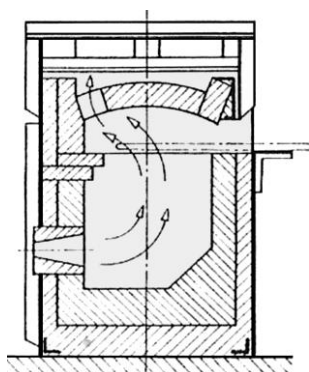
W praktyce przemysłowej stosuje się szereg rozwiązań konstrukcyjnych pieców płomieniowych. Ważniejsze z nich scharakteryzowano poniżej.

Piece oczkowe (rys. 2.10), które stosowane są do nagrzewania końców krótkich prętów. Często budowane są one jako okrągłe, a oczka przez które wprowadza się wsad rozmieszczone są dookoła komory spalania.

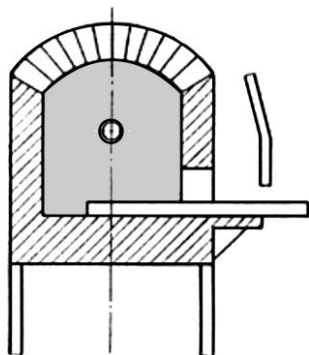
Piece szczelinowe, przeznaczone do miejscowego nagrzewania prętów. Przykładowy piec tego typu pokazano na rys. 2.11. Jest on pozbawiony trzonu, a końce prętów umieszczonych w komorze pieca nie są podparte. Palnik, opalany mazutem lub gazem, znajduje się pod prętami.

Piece komorowo-szczelinowe (rys. 2.12) charakteryzują się tym, że komora spalania stanowi także przestrzeń wsadową. Piece te zamiast okna wsadowego mają szczelinę o wielkości dostosowanej do wymiarów prętów nagrzewanych.

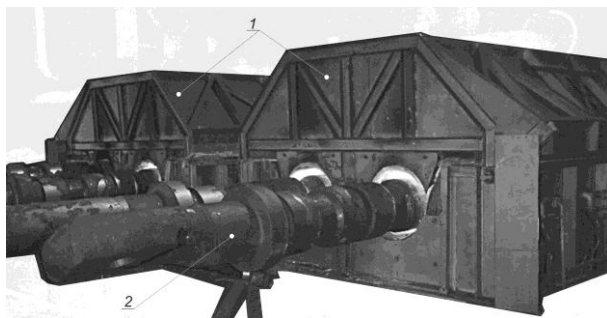
Piece komorowe (rys. 2.13) mają zamykane okno, przez które wkładany i wyjmowany jest wsad. Są one powszechnie stosowane do nagrzewania wyrobów o dowolnych kształtach i masie dochodzącej do 150 kg. Piece te zasilane są paliwem stałym (w tym przypadku do pieca dobudowywane jest palenisko), płynnym lub gazowym.



Rys. 2.11. Piec szczelinowy do nagrzewania końców prętów [92]

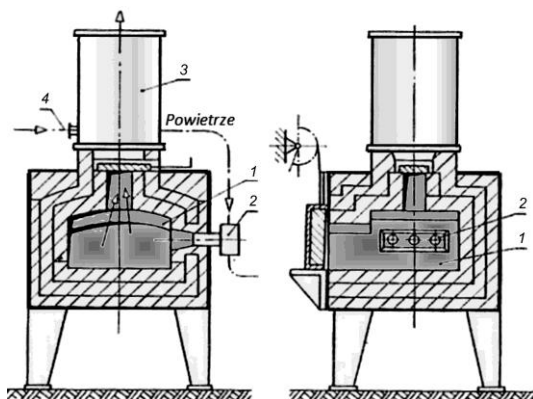


Rys. 2.12. Piec komorowo-szczelinowy [92]

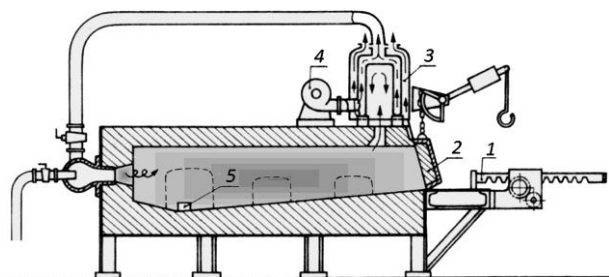


Rys. 2.10. Piec oczkowy zbudowany przez Przedsiębiorstwo Budowy Pieców Przemysłowych "PIECOBUD" [64]: 1 – piec, 2 – wsad

Piece o ruchu ciągłym. Najpopularniejszym piecem tego typu jest piec gazowy przepychowy, pokazany na rys. 2.14. Urządzenie takie jest załadowywane przez okno wsadowe 2, zlokalizowane naprzeciw palnika. Przy oknie wsadowym zabudowany jest popychacz 1, służący do wpychania materiału do pieca, w sposób powodujący równoczesne przesunięcie całego

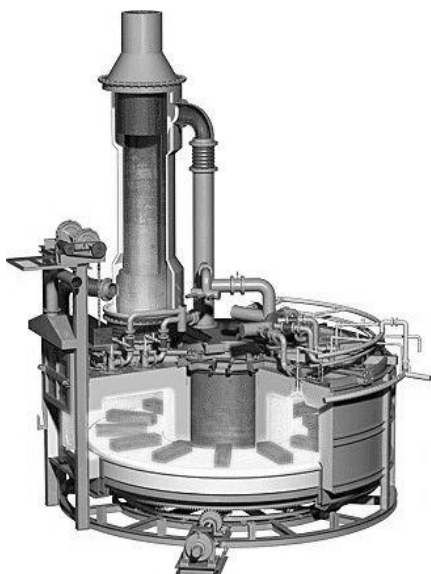


Rys. 2.13. Piec gazowy komorowy: 1 – komora, 2 – palnik, 3 – podgrzewacz powietrza (rekuperator), 4 – powietrze [92]



Rys. 2.14. Piec gazowy przepychowy (opis w tekście) [92]

wsadu znajdującego się w komorze. Wyjmowanie nagrzanego materiału odbywa się przez okno boczne 5. Celem zwiększenia sprawności urządzenia powietrze potrzebne do spalania gazu jest podgrzewane w podgrzewaczu 3, który wraz z dmuchawą umieszczony jest nad komorą pieca.



Rys. 2.15. Piec z obrotowym trzonem

Innym często stosowanym rozwiązaniem pieca o ruchu ciągłym jest piec z obrotowym trzonem (karuzelowy) – rys. 2.15. Posiada on wszelkie zalety pieca przepychowego (duża wydajność, jednolita temperatura końcowa, duża sprawność cieplna), przy jednoczesnym braku jego wady, jaką jest mała uniwersalność. W tym przypadku trzon pieca ma kształt pierścienia i jest uszczelniany (podobnie jak komora) dławikami piaskowymi. Piec ma dwoje drzwiczek służących do załadunku i wyładowania materiału, a prędkość obrotowa trzonu może być regulowana bezstopniowo.

2.7.2. Elektryczne urządzenia grzewcze

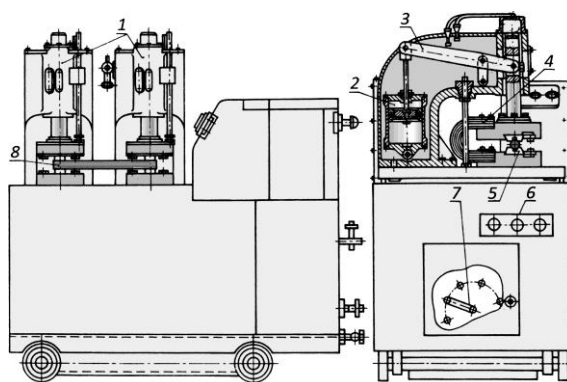


Rys. 2.16. Piec elektryczny oporowy z widocznymi elementami grzejnymi [23]

Piece elektryczne oporowe, w których źródłem energii cieplnej są specjalne elementy grzewcze, nagrzewające się pod wpływem przepływającego przez nie prądu elektrycznego (rys. 2.16). Zaletą tych pieców jest łatwość nagrzewania materiału do ściśle określonej temperatury.

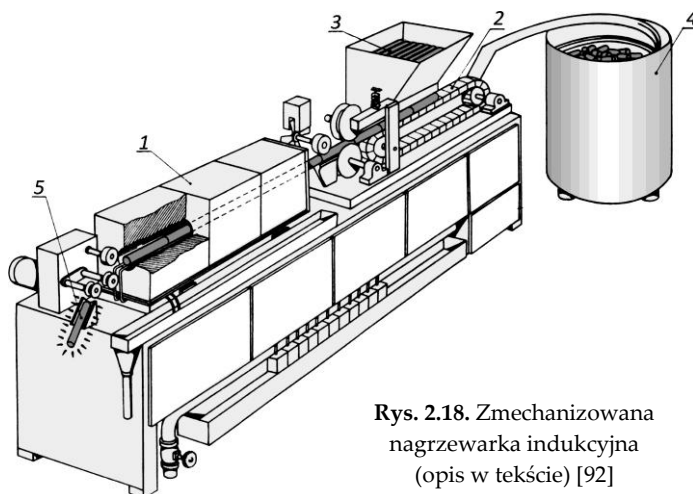
Nagrzewarki elektrokontaktowe, z których przykładową pokazano na

rys. 2.17. Składa się ona z następujących zespołów: zacisków pionowych 1, cylindra pneumatycznego 2, dźwigni 3, które służą do zamocowania materiału 8, kontaktów zaciskowych 5, przewodu szynowego 4, transformatora z przełącznikiem 7 oraz pulpitu sterowania 6. Przedstawione urządzenie nie jest zautomatyzowane. Podawanie i zdejmowanie materiału realizowane jest ręcznie, a zaciskanie materiału, uwolnienie z zacisków i wyłączenie prądu realizowane jest z pulpitu sterowania.



Rys. 2.17. Nagrzewarka elektrokontaktowa (opis w tekście) [92]

Nagrzewarki indukcyjne. Na rys. 2.18 przedstawiono przykładową nagrzewarkę indukcyjną. Materiał wsadu wprowadzany jest do induktora 1 za pomocą podajnika 2. Po osiągnięciu zakładanej do uzyskania temperatury materiał 5 jest wypchnięty z induktora i przeniesiony do maszyny kuźniczej. Pręty długie są wkładane do zasobnika 3, a krótkie do pojemnika 4 z wibrującym podajnikiem, który samoczynnie podaje je na przenośnik. Urządzenie jest sterowane w sposób automatyczny, a jego obsługa ogranicza się do uzupełnienia zasobników 3 i 4.



Rys. 2.18. Zmechanizowana nagrzewarka indukcyjna (opis w tekście) [92]

3. Cięcie

3.1. Metody cięcia

Cięcie jest procesem naruszającym spójność materiału (metal), polegającym na całkowitym lub częściowym oddzieleniu jednej części od drugiej. Pokonanie spójności metalu wymaga wkładu energii. Ze względu na rodzaj zastosowanej energii wyróżnia się:

- ❑ cięcie mechaniczne, w którym pracę cięcia wykonuje sztywne narzędzie, przemieszczające się i wywierające nacisk na materiał kształtowany;
- ❑ cięcie gazowe, najczęściej tlenem lub plazmą, podczas którego ma miejsce topienie i utlenianie metalu ciętego w strumieniu gazów (tą metodą można ciąć płyty o grubości przekraczającej 300 mm);
- ❑ cięcie wiązką promieni lasera (stosowane dla elementów ze stali konstrukcyjnej o grubości do 20 mm), znajdujące obecnie coraz szersze zastosowanie ze względu na liczne zalety (oszczędność metalu, wysoka jakość powierzchni cięcia, wydajność, precyzja, itd.);
- ❑ cięcie strumieniem wody, polegające na zastosowaniu silnie sprężonej wody (pod ciśnieniem ok. 4150 bar lub więcej) usuwającej materiał ze szczeliny w wyniku erozji i zmęczenia ściernego materiału.

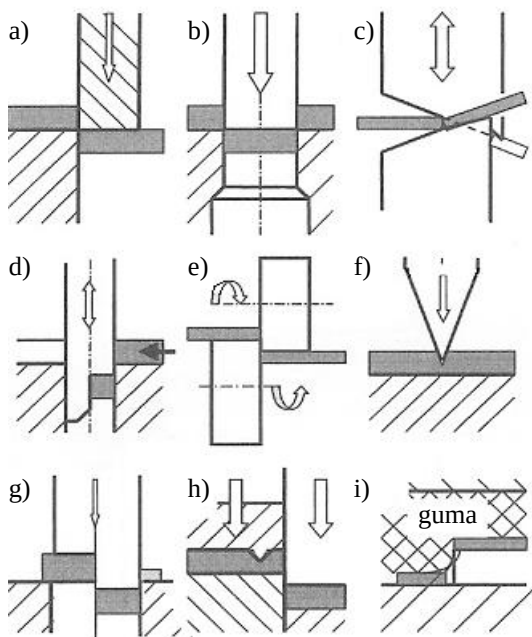
Ze względu na charakter wykładu (technologia obróbki plastycznej) w dalszej części opracowania zostaną podane informacje dotyczące cięcia mechanicznego. Polega ono na wytworzeniu w żądanym przekroju materiału odpowiedniej koncentracji naprężeń, którą uzyskuje się na ogół w wyniku wywarcia na cięty element nacisku za pomocą:

- ❑ dwóch narzędzi tnących – rys. 3.1 a, b, c, d, e, h;
- ❑ jednego narzędzia tnącego – rys. 3.1 f, g.

Najczęściej wykorzystywana jest technologia cięcia dwoma narzędziami, obejmująca klasyczne przykłady cięcia na nożycach (wzdłuż linii prostej – rys. 3.1a) oraz wykrawania (wzdłuż linii zamkniętej) w wykrojnikach – rys. 3.1b. Czasami zamiast ciągłego, posuwistego ruchu narzędzia może być wykorzystany ruch oscylacyjny (rys. 3.1c), skorelowany z posuwem ciętej blachy. Podobna kinematyka ruchu narzędzi ma miejsce podczas cięcia blachy metodą wykra-

wania rowka o szerokości równej średnicy stempla (rys. 3.1d). Natomiast podczas cięcia nożami krążkowymi (rys. 3.1e) narzędzia wykonują ruch obrotowy. W przypadku, gdy kształt przedmiotu lub narzędzia umożliwia koncentrację naprężeń w żądanym przekroju możliwe jest cięcie za pomocą tylko jednego elementu tnącego. Schemat cięcia nożowego realizowanego wg tej koncepcji przedstawia rys. 3.1f. Również jedno narzędzie tnące wykorzystuje się w operacji wygładzania, metodą skrawania nadkładu, pokazanej na rys. 3.1g. Zwiększenie dokładności cięcia uzyskuje się stosując w procesie wykrawania grani klinową (rys. 3.1h) biegnącą wzdłuż linii cięcia. W pewnych sytuacjach zamiast jednego z elementów tnących (stempla lub płyty tnącej) można zastosować materiał elastyczny (guma, poliuretan) – rys. 3.1i.

Należy tutaj zauważyć, że najczęściej stosowaną w obróbce plastycznej metodą dzielenia metalu jest cięcie za pomocą dwóch narzędzi tnących.



Rys. 3.1. Sposoby cięcia mechanicznego [45]: a) cięcie na nożach wzdłuż linii prostej, b) wykrawanie w wykrojniku wzdłuż linii zamkniętej, c) cięcie oscylacyjne, d) wykrawanie rowka o szerokości równej średnicy stempla, e) cięcie nożami krążkowymi, f) cięcie nożem w kształcie klina, g) wygładzanie metodą skrawania nadkładu, h) cięcie z wykorzystaniem grani klinowej, i) cięcie za pomocą materiału elastycznego (gumy, poliuretanu)

3.2. Przebieg cięcia blachy za pomocą dwóch elementów tnących

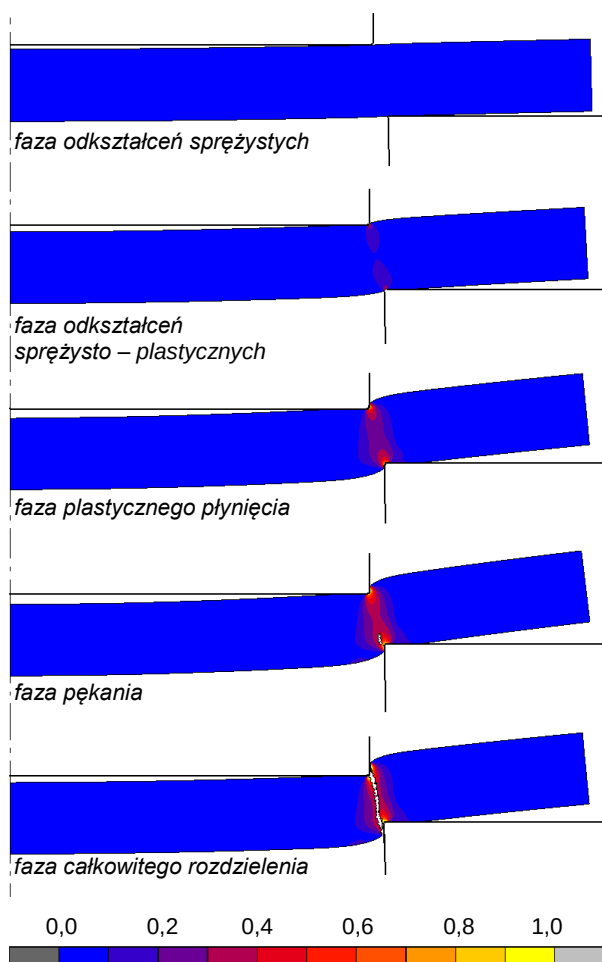
Przebieg procesu cięcia blachy za pomocą dwóch elementów tnących omówiono na przykładzie wykrawania krążka kołowego z materiału o dobrych własnościach plastycznych. W takim przypadku występują wszystkie (charakterystyczne dla cięcia blach) fazy procesu, pokazane na rys. 3.2. Są to:

1. faza odkształceń sprężystych,
2. faza odkształceń sprężysto-plastycznych,

3. faza plastycznego płynięcia,
4. faza pęknięcia,
5. faza całkowitego oddzielenia wycinanego elementu od blachy.

Należy zauważyć, że występowanie fazy czwartej jest silnie uzależnione od własności materiału ciętego. Natomiast faza piąta jest zależna od luzu zastosowanego przy cięciu, gdyż przy luzie dużym całkowite oddzielenie elementu następuje już podczas fazy pęknięcia.

W dalszej części rozdziału w sposób bardziej szczegółowy charakteryzuje się poszczególne fazy cięcia blach dwoma elementami tnącymi.



Rys. 3.2. Symulowany numerycznie przebieg cięcia blachy dwoma elementami tnącymi, wraz z rozkładem intensywności odkształcenia (opis w tekście)

Faza odkształceń sprężystych

W początkowym okresie tej fazy procesu siły wywierane na blachę przez powierzchnie czołowe narzędzi (stempel i płyta tnąca) powodują prostowanie ewentualnych nierówności. W następnej kolejności moment zginający, powstający w wyniku przesunięcia względem siebie sił na płycie tnącej i stemple, wywołuje wybrzuszenie (wygięcie) blachy. W efekcie takiego przebiegu procesu obszary, w których metal przylega do narzędzi kurczą się do pasków, o stopniowo zmniejszającej się szerokości, biegnących wzdłuż linii cięcia (krawędzi tnących narzędzi). W tej sytuacji cały nacisk wywierany przez elementy tnące przejmowany jest przez te paski. Wywołuje to w materiale koncentrację naprężeń w pobliżu krawędzi tnących, które stopniowo zwiększają swoje wartości. Ta faza procesu cięcia kończy się w momencie, gdy naprężenia w metalu osiągną wartość granicy plastyczności.

Faza odkształceń sprężysto – plastycznych

Początkowo obszary uplastycznione metalu występują jedynie w miejscach największej koncentracji naprężeń, tj. w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi tnących stempla i płyty tnącej. W efekcie wzrostu nacisku krawędzie narzędzi wgniatają się w metal zwiększając powierzchnię przylegania metal-narzędzie, która jest w stanie przenieść zwiększony nacisk stempla. Równocześnie zwiększa się obszar występowania naprężeń uplastyczniających, które przesuwa się w głąb materiału. W momencie, w którym strefy metalu uplastycznionego przez stempel i płytę tnącą połączą się z sobą, następuje koniec fazy odkształceń sprężysto-plastycznych.

Faza plastycznego płynięcia

Ten etap procesu cięcia charakteryzuje intensywne płynięcie plastyczne metalu w strefie odkształcenia. Powoduje ono tak duże umocnienie materiału, że pomimo zmniejszenia grubości ścinanej warstwy metalu, obserwuje się zwiększenie siły nacisku stempla. W efekcie umocnienia metalu wzrastają również naprężenia styczne na powierzchni ścinania (łącznie krawędzie stempla i płyty tnącej). W pewnym momencie naprężenia te osiągają wartość graniczną, przy której następuje naruszenie spójności materiału (pękanie).

Faza pękania

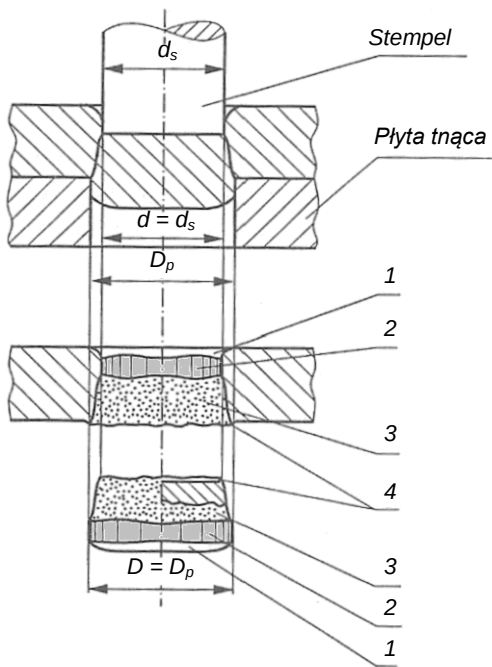
Pierwsze pęknięcia powstają w miejscach, w których metal został najbardziej odkształcony, a więc na ogół w okolicach krawędzi tnących narzędzi (stempla i płyty tnącej). Przy odpowiednim luzie, między narzędziami tnącymi, pęknięcia rozchodzące się od obu krawędzi spotykają się ze sobą, tworząc wspólną powierzchnię o zarysie zbliżonym do litery S.

Chwila, w której następuje pęknięcie zależy od rodzaju rozdzielonego materiału. W przypadku cięcia materiałów twardych (np. stali a dużej zawartości węgla) pęknięcie następuje już przy niewielkim zagłębieniu narzędzi w metal. Natomiast, przy cięciu materiałów miękkich i plastycznych (ołów, cyna, miękkie aluminium) pęknięcie może w ogóle nie nastąpić lub występuje w fazie końcowej procesu.

Faza całkowitego oddzielenia wycinanego elementu od blachy

Pomimo wystąpienia pęknięcia element wycinany dosyć mocno tkwi w otaczającym go materiale. Jest to spowodowane zazębiającymi się nawzajem nierównościami powierzchni bocznych krążka i blachy. Dla całkowitego oddzielenia elementu niezbędne jest odkształcenie plastyczne lub ścięcie nierówności zazębiających się powierzchni. Wymaga to dalszego wywierania nacisku przez stempel.

W efekcie siła cięcia nie spada do zera z chwilą wystąpienia pęknięcia lecz utrzymuje się na pewnym, dość znacznym poziomie. Ta charakterystyczna, dla omawianej fazy procesu, własność występowania siły cięcia po pęknięciu metalu może nie mieć miejsca w przypadkach cięcia z zastosowaniem dużych luzów.



Rys. 3.3. Wygląd powierzchni przecięcia elementu wyciętego i otworu: 1, 2, 3, 4 – strefy występujące na powierzchni rozdzielania (opis w tekście) [19]

3.3. Powierzchnia rozdzielania

Na powierzchni rozdzielania elementu wycinanego i otworu można wyodrębnić kilka stref, które powstały w różnych fazach procesu cięcia. Na rys. 3.3 pokazano widok powierzchni bocznych wycinanego elementu (krążka) i otworu uzyskiwanych w procesie cięcia z luzem optymalnym ze

względem na pęknięcie. Dodatkowo, na rysunku tym zamieszczono podstawowe wymiary oraz oznakowano strefy występujące na powierzchni rozdzielania. Są to:

1. zaokrąglenie krawędzi krążka i otworu w blasze powstające w fazie sprężysto – plastycznej procesu cięcia;
2. strefa błyszcząca, powstająca w fazie plastycznego płynięcia, w kształcie powierzchni walcowej z ewentualnymi rysami biegnącymi równolegle do osi otworu;
3. strefa pękania, o kształcie przybliżonym do stożka, z charakterystyczną matową i chropowatą powierzchnią;
4. zadziór, będący ostrym występem biegnącym wzdłuż krawędzi przecięcia (zwiększeniu zadzioru sprzyja cięcie z niewłaściwym luzem oraz przy stępionych krawędziach tnących).

3.4. Luz w procesie cięcia

Luz bezwzględny L jest podstawowym, wpływającym na proces cięcia parametrem. Rozumie się go jako różnicę między wymiarami otworu płyty tnącej D_p i stempla d_s (rys. 3.3):

$$L = D_p - d_s. \quad (3.1)$$

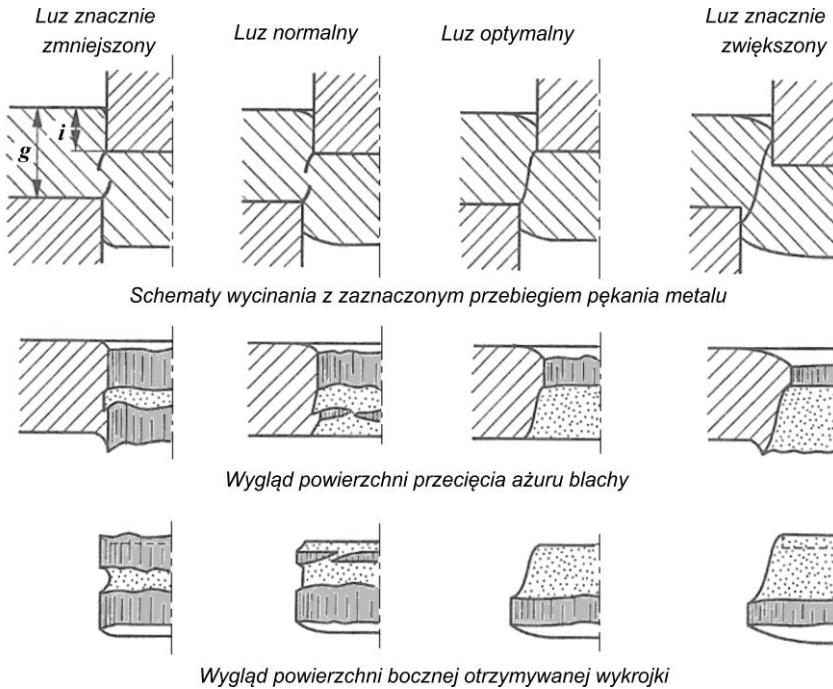
Czasami do charakterystyki procesu cięcia wykorzystuje się pojęcie szczeliny s , równej odległości między krawędziami tnącymi płyty i stempla. Zatem:

$$s = \frac{L}{2} = \frac{D_p - d_s}{2}. \quad (3.2)$$

Przebieg procesu cięcia oraz wygląd powierzchni rozdzielania jest silnie uzależniony od wartości zastosowanego luzu. Zobrazowano to na rys. 3.4, na którym przedstawiono schematy cięcia oraz wygląd powierzchni rozdzielania przy czterech luzach o wartości dodatniej.

Przebieg cięcia opisany w rozdziałach 3.2 i 3.3 przebiegał przy luzie optymalnym ze względu na pęknięcie. W takim przypadku pęknięcia rozchodzące się od krawędzi stempla i matrycy spotykają się ze sobą. Wartość luzu optymalnego zależy od rodzaju metalu i grubości blachy. Im materiał jest twardszy tym odkształcenia plastyczne są mniejsze, a pęknięcia powstają wcześniej. Zatem w takiej sytuacji luz optymalny musi być większy. W przypadku wykrawania blach grubszych należy również zwiększać luz, gdyż kąt powierzchni pęknięcia (dla danego materiału) jest w przybliżeniu stały.

W przypadku cięcia z luzem znacznie mniejszym od optymalnego, pęknięcia rozchodzą się wzdłuż dwóch powierzchni przesuniętych względem siebie. W tej sytuacji element wycinany łączy się z blachą za pośrednictwem wąskiego paska metalu. W czasie dalszego zagłębiania stempla w materiał pasek ten spęcza się, obraca i zostaje przecięty. Podczas przecinania paska tworzy się (od strony



Rys. 3.4. Wpływ luzu na przebieg procesu cięcia oraz wygląd powierzchni rozdzielania

stempla) druga gładka powierzchnia. Z tego powodu przedmioty wycinane z luzem znacznie mniejszym od optymalnego charakteryzują się występowaniem dwóch stref błyszczących (rozdzielonych powierzchnią matową tworzoną podczas pękania metalu).

W wyniku eksploatacji narzędzi luz ulega zwiększeniu wskutek wycierania się powierzchni bocznych stempla i otworu w płycie tnącej. Mając to na uwadze procesy cięcia projektuje się zwykle z luzem mniejszym od optymalnego, noszącym nazwę luzu normalnego. W efekcie takiego postępowania wydłuża się czas pracy narzędzi tnących, w warunkach zbliżonych do optymalnych. Zastosowanie luzu normalnego powoduje, że: otrzymuje się mniej gładką powierzchnię rozdzielania, wymagane jest stosowanie większych sił cięcia, występuje mniejsze pochylenie bocznych powierzchni elementów wycinanych.

W czasie cięcia z luzem dużo większym od optymalnego obserwuje się znaczne wygięcie brzegów materiału ciętego. Wywołane jest to przez znaczne rozsuniecie krawędzi tnących narzędzi. Elementy wycinane z luzem dużo większym od optymalnego są charakteryzowane przez: stosunkowo wąski pasek błyszczący, gruby i wygięty zadziór oraz duże pochylenie powierzchni pęknięcia.

W tabeli 3.1 podano wartości luzów względnych stosowanych w procesach cięcia niektórych metali i stopów. Natomiast na rys. 3.5 pokazano widok elementów (wykrojek) otrzymanych w procesach wykrawania z zastosowaniem tych luzów.

Tabela 3.1.

Luzy względne l stosowane w procesach cięcia niektórych metali i stopów ($l = 100\% L/g$; gdzie: L – luz bezwzględny określony zależnością 3.1, g – grubość ciętej blachy)

Rodzaj ciętego metalu	Luz minimalny	Luz normalny	Luz optymalny	Luz maksymalny
Aluminium twarde	$1 \div 2\%$	$4 \div 8\%$	$12 \div 15\%$	$16 \div 20\%$
Aluminium miękkie	$1 \div 2\%$	$10 \div 12\%$	$18 \div 20\%$	$25 \div 28\%$
Mosiądz półtwardy	$1 \div 3\%$	$4 \div 6\%$	$12 \div 16\%$	$16 \div 20\%$
Mosiądz wyżarzony	$3 \div 5\%$	$6 \div 10\%$	$12 \div 16\%$	$18 \div 22\%$
Brąz półtwardy	$1 \div 3\%$	$7 \div 10\%$	$30 \div 24\%$	$25 \div 27\%$
Miedź półtwarda	$2 \div 4\%$	$6 \div 10\%$	$12 \div 16\%$	$18 \div 22\%$
Miedź wyżarzona	$1 \div 2\%$	$4 \div 8\%$	$10 \div 14\%$	$16 \div 18\%$
Magnez	$1 \div 2\%$	$3 \div 6\%$	$7 \div 9\%$	$10 \div 14\%$
Stal nierdzewna wyżarzona	$2 \div 4\%$	$6 \div 10\%$	$18 \div 22\%$	$25 \div 27\%$
Stal wysokowęglowa	$5 \div 10\%$	$22 \div 25\%$	$26 \div 32\%$	$33 \div 36\%$
Stal niskowęglowa	$2 \div 4\%$	$10 \div 14\%$	$16 \div 20\%$	$16 \div 23\%$



Rys. 3.5. Wpływ luzu na wygląd powierzchni rozdzielania w procesie wykrawania elementu z aluminium utwardzonego oraz stali w gatunku St3

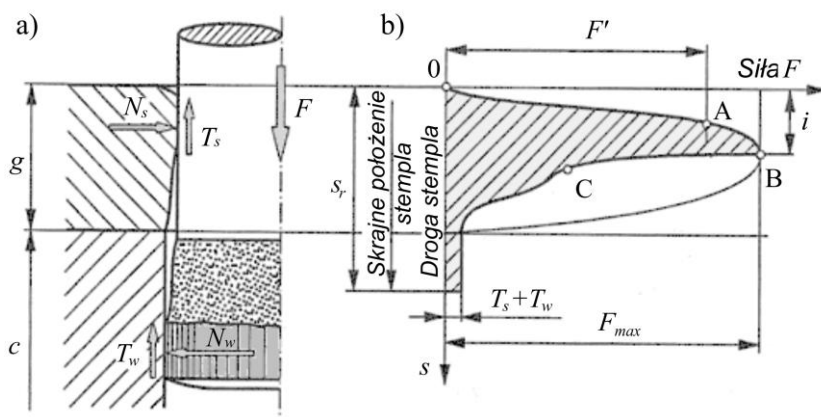
3.5. Siła i praca cięcia

Znajomość pracy cięcia oraz siły cięcia jest niezbędna dla doboru maszyn zabezpieczających realizację określonych zabiegów lub operacji cięcia blach. Procesy cięcia można zrealizować za pomocą dwóch równoległych, względnie po-

chylonych krawędzi tnących. Poniżej poddano analizie siły oraz pracę dla obu tych sposobów cięcia.

3.5.1. Cięcie krawędziami równoległymi

Jak widać z wykresu zamieszczonego na rys. 3.6b siła cięcia zmienia się w miarę wgłębiania stempla w materiał. I tak początkowo (na odcinku OA) wzrasta ona liniowo. Następnie wzrost ten staje się nieliniowy, przy czym znacznym przesunięciom stempla odpowiadają stosunkowo niewielkie przyrosty siły (krzywa AB). W tej fazie procesu występuje plastyczne płynięcie materiału, powodujące znaczne umocnienie ciętego metalu, które wywołuje większy wpływ na siłę cięcia niż zmniejszająca się grubość warstwy ciętego metalu. Pęknięcie materiału powoduje nagły spadek siły cięcia (odcinek BC). Jednakże siła na stemple nie zmniejsza się do zera, gdyż musi ona jeszcze pokonać opory związane z całkowitym oddzieleniem elementu wycinanego oraz siły tarcia: T_w – między przedmiotem i płytą tnącą, oraz T_s – między stemplem i odpadem.



Rys. 3.6. Siły w procesie cięcia krawędziami równoległymi: a) wyróżnione siły, b) rozkład siły na stemple

Wartości sił tarcia zależą przede wszystkim od luzu zastosowanego w procesie cięcia. Zwykle siły te określa się w procentach największej siły cięcia F_{max} , którą oblicza się na podstawie wzoru:

$$F_{max} = k l g R_t, \quad (3.3)$$

gdzie: l – długość linii cięcia; k – współczynnik równy $1,1 \div 1,3$, uwzględniający dodatkowe opory cięcia (stan krawędzi tnących, nierównomierność własności mechanicznych oraz grubości ciętego metalu, nieosiowość stempla itd.); g – grubość metalu ciętego; R_t – wytrzymałość metalu na cięcie (tabela 3.2).

Praca W_c wykonana przez siłę F podczas cięcia odpowiada polu zacienowanemu na rys. 3.6b. Można ją obliczyć z zależności

$$W_c = \lambda F_{\max} g, \quad (3.4)$$

gdzie: s – przemieszczenie stempla. Po podstawieniu zależności (3.3) do wzoru (3.4) pracę cięcia można przedstawić jako:

$$W_c = k \lambda g^2 l R_t. \quad (3.6)$$

Tabela 3.2.

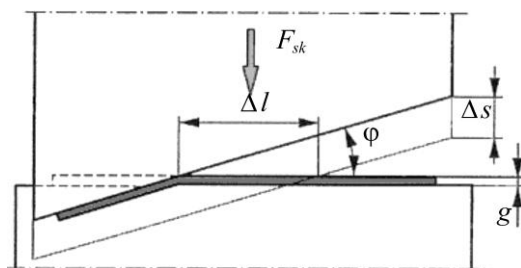
Wytrzymałość R_t na cięcie, wybranych metali i stopów [17]

Materiał	Wytrzymałość na cięcie R_t [MPa]	
	Stan miękki (materiał wyżarzony)	Stan twardy (materiał zgnieciony)
Ołów	20 ÷ 30	-
Aluminium	60 ÷ 90	130 ÷ 160
Dural	220	380
Miedź M1E	160 ÷ 220	250 ÷ 300
Nikiel	350	-
Mosiądz M63	250 ÷ 320	360 ÷ 480
Brąz	220 ÷ 400	400 ÷ 600
Nowe srebro	280 ÷ 360	450 ÷ 560
Blachy stalowe do tłoczenia	220 ÷ 360	
Blachy stalowe grube		
St2, St2S	270 ÷ 340	-
St3, St3S	300 ÷ 360	-
St4, St4S	340 ÷ 420	-
St5	400 ÷ 500	-
St6	480 ÷ 580	-
Blacha krzemowa	270 ÷ 400	
Blacha kwasoodporna 1H18N9T	520 ÷ 560	600 ÷ 800

3.5.2. Cięcie krawędziami pochylonymi

Stosowanie nachylenia elementów tnących względem siebie ma na celu zmniejszenie siły cięcia. Typowym przykładem zastosowania tego rozwiązania jest cięcie na nożycach gilotynowych, pokazane schematycznie na rys. 3.7.

Na rysunku tym przedstawiono ustabilizowaną fazę cięcia realizowaną stałą siłą F_{sk} . Znając wartości R_t i λ , obliczone dla cięcia narzędziami o krawędziach równoległych, można wyznaczyć przybliżoną siłę cięcia F_{sk} . Wystarczy bowiem przyrównać pracę wykonaną przez siłę F_{sk} na dowolnym przesunięciu Δs do



Rys. 3.7. Schemat cięcia blachy o grubości g nożami o pochyłonych krawędziach tnących

pracy potrzebnej do przecięcia blachy na długości $\Delta l = \Delta s / \operatorname{tg} \varphi$ nożami o równoległych krawędziach tnących. Zatem na podstawie wzoru (3.6) można zapisać równanie

$$F_{sk} \Delta s = k \lambda g^2 R_t \frac{\Delta s}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (3.7)$$

z którego po przekształceniach wyznacza się następującą zależność na F_{sk}

$$F_{sk} = \frac{k \lambda g^2 R_t}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (3.8)$$

gdzie: φ – kąt między krawędziami tnącymi narzędzi.

W procesie cięcia narzędziami o pochyłonych krawędziach tnących siła cięcia F_{sk} może być większa od wartości obliczonej z zależności (3.8). Wynika to z nieco innego przebiegu procesu cięcia. Mianowicie przy zastosowaniu pochyłonych krawędzi tnących występuje większa strefa błyszczącej powierzchni przecięcia niż podczas cięcia nożami o krawędziach równoległych. Oznacza to, że w analizowanym przypadku cięcia pękanie metalu występuje później, co powoduje wzrost pracy cięcia. Zjawisko to jest tym bardziej widoczne im większą grubość ma materiał cięty i im bardziej jest on skłonny do pęknięcia.

3.6. Wady elementów ciętych

Najczęściej spotykane wady wykrojek, określone przez Marciniaka [45], przedstawiono na rys. 3.8. Należą do nich:

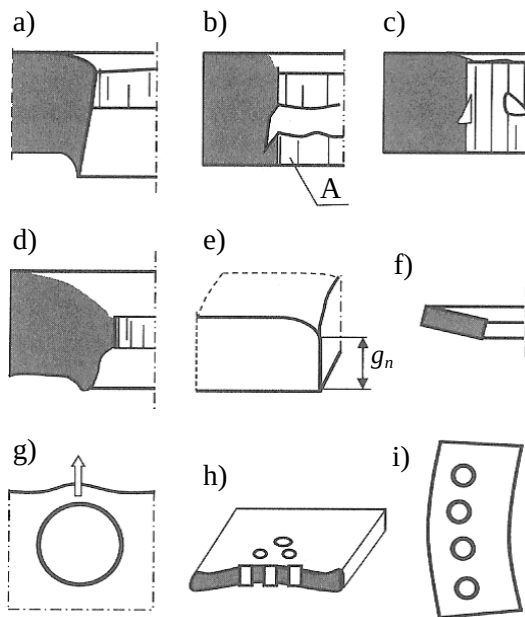
- Zbyt duży zadziór (rys. 3.8a). Za niedopuszczalny uznaje się zwykle zadziór o wysokości większej niż 0,1 mm. Powstaje on w wyniku zaokrąglenia krawędzi tnącej, będącej efektem stępienia. Dla usunięcia tej wady należy okresowo wykonywać ostrzenie krawędzi narzędzi poprzez zeszlifowanie z powierzchni czołowych stempla i płyty tnącej warstwy metalu o grubości $0,1 \div 0,25$ mm.
- Pęknięcie biegnące w bok od powierzchni pęknięcia i kończące się na ślepo (rys. 3.8b). W przypadku wystąpienia takiego pęknięcia powstaje druga gładka (błyszcząca) powierzchnia przecięcia. W efekcie takiego rozdzielenia metalu może dalej rozprzestrzeniać się pęknięcie ślepe, które może doprowadzić do oderwania się fragmentu A w czasie eksploatacji ele-

mentu. Jako przyczynę występowania tej wady uznaje się przyjęcie zbyt małej szczeliny (luzu).

- ❑ Ślady pęknięcia widoczne na powierzchni przecięcia przy cięciu gładkim (rys. 3.8c). Wada ta jest efektem zbyt małego nacisku wywieranego na powierzchnię blachy w pobliżu linii cięcia lub niewłaściwego luzu między krawędziami tnącymi.

- ❑ Niedopuszczalne zmniejszenie grubości blachy na obrzeżu i zadziór mimo ostrego narzędzia (rys. 3.8d). Wada ta występuje wtedy, gdy zbyt duża jest szczelina między krawędziami tnącymi stempla i płyty tnącej. Zmniejszenie szczeliny prowadzi do likwidacji tej wady.

- ❑ Nadmierny ubytek grubości blachy w ostrym narożu wykrojki (rys. 3.8e). Występuje w miejscu ostrego załamania linii cięcia i jest powodowany koncentracją nacisku stempla. Zapobieganiu tej wady sprzyja zastąpienie ostrego załamania linii cięcia łukiem o promieniu $r > (0,5 \div 1,0)g$.
- ❑ Powierzchnia wykrojki nie jest płaska (rys. 3.8f). Wada ta powstaje w wyniku zginania blachy podczas cięcia. Dla zapobieżenia wystąpienia tej wady należy w trakcie cięcia dociskać blachę do powierzchni matrycy (płyty tnącej).
- ❑ Deformacja uprzednio wykonanej linii cięcia przez cięcie w takcie następnym (rys. 3.8g). Defekt ten jest powodowany rozpychaniem i odkształcaniem metalu w bezpośrednim sąsiedztwie linii cięcia. Środkiem zaradczym jest tutaj zwiększenie odległości między linią cięcia a brzegiem blachy.
- ❑ Powstanie wypukłości w obszarze wycinania wielu otworów (rys. 3.8h). Wada ta jest następstwem lokalnego wzrostu pola powierzchni blachy w efekcie jej rozpychania przez stemple dziurujące. Sposobem zapobiegającym wystąpieniu tego defektu jest dociskanie blachy do powierzchni



Rys. 3.8. Wady elementów otrzymywanych w procesie cięcia [45] (opis w tekście)

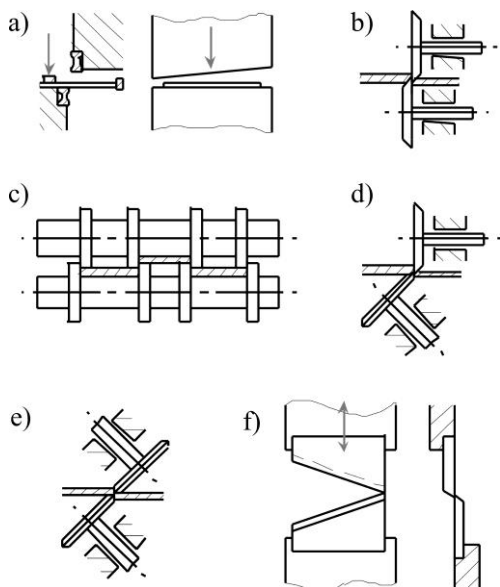
płyty tnącej w czasie cięcia. Dodatkowo, zwiększenie luzu między krawędziami tnącymi zmniejsza tendencję do wypuklania blachy.

- Zakrzywienie (sierpowatość) pasa blachy z niesymetrycznie wyciętymi otworami (rys. 3.8i). Podobnie jak poprzednio wada ta jest skutkiem rozpychania blachy podczas wycinania otworów. Można jej zapobiegać stosując silny docisk blachy do płyty tnącej z jednoczesnym ograniczeniem przemieszczenia w kierunku poprzecznym.

3.7. Cięcie na nożach

Arkusze blach, przeznaczone do kształtowania wyrobów w procesach tłoczenia, w przeważającej części rozcina się na pasy lub pojedyncze kawałki blachy. W tym celu wykorzystuje się różnego rodzaju nożyce, pokazane schematycznie na rys. 3.9. Są to:

- Nożyce gilotynowe – rys. 3.9a. Stosuje się je do cięcia arkuszy o grubości do 60 mm (w zależności od wielkości nożyc). Do wad tej metody zalicza się: skrzywienie odcinanej części arkusza, trudności w zachowaniu równoległości oraz zadziór położony po obu stronach elementu odcinanego.
- Nożyce krążkowe o osiach równoległych – rys. 3.9b. Umożliwiają one cięcie po linii prostej lub łuku arkuszy o grubości do 30 mm. Zaletą tego procesu jest brak ograniczeń długości linii cięcia. Natomiast wadę stanowi



Rys. 3.9. Schematy nożyc stosowanych do cięcia blach (opis w tekście)

- krzywienie obu części metalu ciętego.
- Nożyce wielokrążkowe – rys. 3.9c. Wykorzystywane są one do jednoczesnego cięcia arkuszy lub taśm (o grubości do 10 mm) na pasy. Zaletami tej metody są: bardzo duża wydajność, duża równoległość linii cięcia oraz jednostronne położenie zadziorów.
- Nożyce krążkowe z pochyłym dolnym krążkiem – rys. 3.9d. Za pomocą tych nożyc można ciąć arkusze na pasy i kawałki oraz wycinać przedmioty o zarysie będącym linią wypukłą. Grubość ciętej blachy może wynosić do 30 mm.

Zalety i wady tej metody cięcia są takie same jak w przypadku stosowania nożyc krążkowych o osiach równoległych.

- ❑ Nożyce krążkowe z pochylonymi krążkami – rys. 3.9e. Ten schemat cięcia umożliwia cięcie blach o grubości do 20 mm na pasy i kawałki oraz wycinanie krążków i pierścieni. Zaletą tego rodzaju nożyc krążkowych jest duża uniwersalność, zaś wadę stanowi wciąganie materiału przez krążki co utrudnia dokładne cięcie według wytrasowanej uprzednio linii.
- ❑ Nożyce skokowe – rys. 3.9f. Zastosowanie tych nożyc umożliwia wycinanie przedmiotów płaskich o dowolnym zarysie krzywoliniowym z blach o grubości do 10 mm. Za zalety tej metody uznaje się możliwe do uzyskania małe promienie krzywizn (do 15 mm) oraz nie wciąganie materiału przez nożyce.

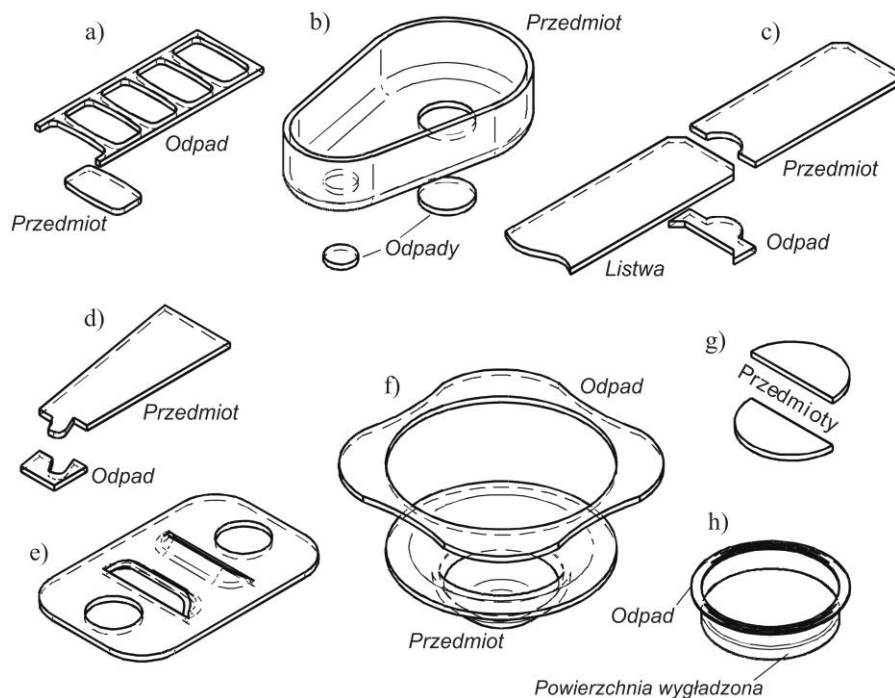
3.8. Cięcie na wykrojnikach

Wykrojnikami nazywa się tłoczniaki mocowane na prasach, przystosowane do cięcia blach. W wykrojnikach można realizować procesy cięcia (wykrawania) płaskich przedmiotów, z otworami lub bez nich, o różnych kształtach. Materiałem wyjściowym w procesie wykrawania są: pasy cięte z arkuszy blach (produkcja małoseryjna) lub taśmy o żądanych wymiarach zwijane w kręgi (produkcja wielkoseryjna, masowa).

3.8.1. Operacje cięcia

Za pomocą wykrojników można zrealizować osiem zasadniczych operacji cięcia – rys. 3.10. Są to:

- ❑ Wycinanie (rys. 3.10a), w którym cięcie następuje wzdłuż linii zamkniętej. Część wycięta (wewnętrzna) stanowi przedmiot, zaś materiał leżący na zewnątrz linii cięcia jest odpadem (ażurem).
- ❑ Dziurkowanie (rys. 3.10b), gdzie cięcie realizowane jest również wzdłuż linii zamkniętej. W tym przypadku część wycięta (wewnętrzna) jest odpadem, a materiał leżący na zewnątrz linii cięcia stanowi przedmiot, w którym wykonano otwór.
- ❑ Odcinanie (rys. 3.10c), w którym cięcie następuje wzdłuż linii niezamkniętej. W operacji tej podczas odcinania przedmiotu od materiału wyjściowego odpad powstaje lub nie.
- ❑ Przycinanie (rys. 3.10d) polega na usunięciu zbędnego materiału, który przylega do krawędzi przedmiotu. W tej operacji linia cięcia jest otwarta.
- ❑ Nadcinanie (rys. 3.10e), w którym nie dochodzi do rozdzielenia materiału na dwie oddzielne części. Cięcie następuje wzdłuż linii niezamkniętej, nie dochodzącej do krawędzi przedmiotu.



Rys. 3.10. Operacje cięcia realizowane w wykrojnیکach: a) wycinanie, b) dziurkowanie, c) odcinanie, d) przycinanie, e) nadcinanie, f) okrawanie, g) rozcinanie, h) wygładzanie

- ❑ Okrawanie (rys. 3.10f), które ma na celu wyrównanie obrzeża przedmiotu poprzez usunięcie nadmiaru materiału najczęściej w częściach wykonanych w poprzednich operacjach tłoczenia lub kucia.
- ❑ Wygładzanie (rys. 3.10 h), które ma na celu nadanie powierzchni przecięcia żądanej dokładności kształtu, wymiarów i gładkości.

3.8.2. Wykrojniki

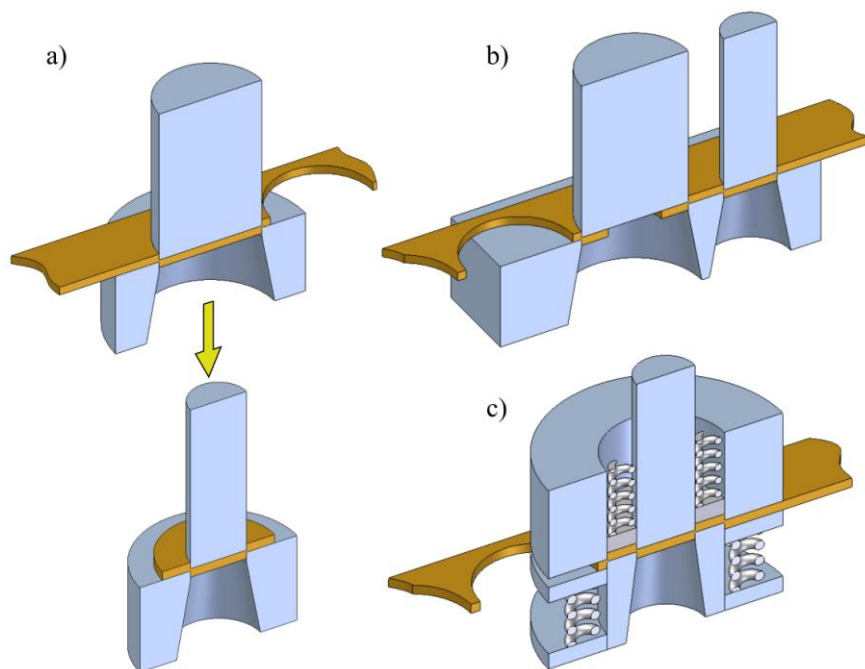
Wykrojniki w zależności od wykonywanych operacji dzielą się na [92, 97]: wycinaki, odcinaki, dziurkowniki, przycinaki, nadcinaki, okrojniki, rozcinaki i wykrojniki wygładzające.

W przypadku, gdy na wykrojniku realizowany jest tylko jeden zabieg cięcia to nazywa się go jednozabiegowym (prostym). Jednakże, w celu zwiększenia wydajności często łączy się kolejne zabiegi cięcia w jedną operację, stosując w tym celu wykrojniki wielozabiegowe. Wykrojniki te ze względu na sposób działania dzieli się na wielotaktowe i jednoczesne.

Różnice w działaniu poszczególnych wykrojników wyjaśnia rysunek 3.11, przedstawiający schematycznie łączenie zabiegów cięcia w procesie wykrawania pierścienia.

Na rys. 3.11a pokazano wykrawanie pierścienia w dwóch operacjach (wycinania i dziurkowania) realizowanych w oddzielnych tłocznikach jednozabiegowych. Tego rodzaju wykrojniki stosuje się zwykle w produkcji małoseryjnej przedmiotów, których wymiary i grubość mogą zmieniać się w szerokich granicach. Zaletami stosowania wykrojnika jednozabiegowego są prosta konstrukcja i niski koszt wykonania. Natomiast wadą jest stosunkowo mała wydajność.

Sposób łączenia zabiegów dziurkowania i wycinania w jedną operację dokonywaną w tłoczniku wielotaktowym pokazano na rys. 3.11b. Materiał wyjściowy dziurkuje się podczas pierwszego taktu. Następnie przesuwają go pod stempel wycinający, który kształtuje zewnętrzny zarys pierścienia w czasie następnego skoku suwaka prasy (drugi takt). W tym samym czasie stempel dziurkujący wycina kolejny otwór w materiale. Wykrojniki wielotaktowe stosuje się w produkcji seryjnej i masowej przedmiotów o niewielkich wymiarach (do 250 mm).



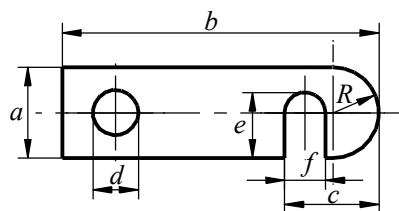
Rys. 3.11. Schematy łączenia zabiegów cięcia podczas wycinania pierścienia;

- a) wykrawanie za pomocą dwóch wykrojników jednozabiegowych, b) wykrawanie za pomocą wykrojnika wielotaktowego, c) wykrawanie za pomocą wykrojnika jednoczesnego

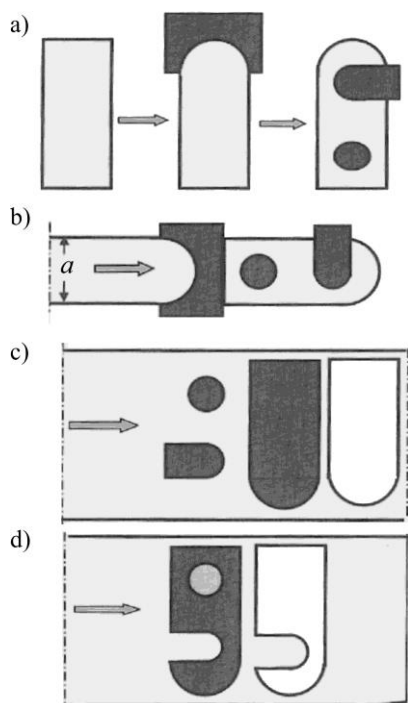
Zalety wykrawania w tego rodzaju tłocznikach stanowią wysoka wydajność oraz możliwość automatyzacji. Natomiast podstawowymi wadami tego rozwiązania są niewielka dokładność wymiarowa elementu wykonywanego oraz zadzior położony po obu stronach przedmiotu.

W przypadku zastosowania wykrojnika jednoczesnego (rys. 3.11c) wszystkie zabiegi cięcia (w procesie rozpatrywanym: wycinanie i dziurkowanie) są wykonywane na tym samym elemencie w czasie jednego skoku suwaka prasy. Tego rodzaju wykrojniki stosuje się w produkcji seryjnej przedmiotów, w bardzo szerokim zakresie wymiarów, wykrawanych z blach o grubości 0,05÷5 mm. Zaletami cięcia w wykrojnikach jednoczesnych są: stosunkowo wysoka wydajność, dobra dokładność wymiarowa i płaskość wyrobów, oraz zadzior położony jednostronnie. Natomiast za wady uznaje się utrudnioną automatyzację procesu i wysoki koszt przyrządu.

Zagadnienie konstrukcji wykrojników omówione zostanie na przykładzie wykrojki pokazanej na rys. 3.12, na



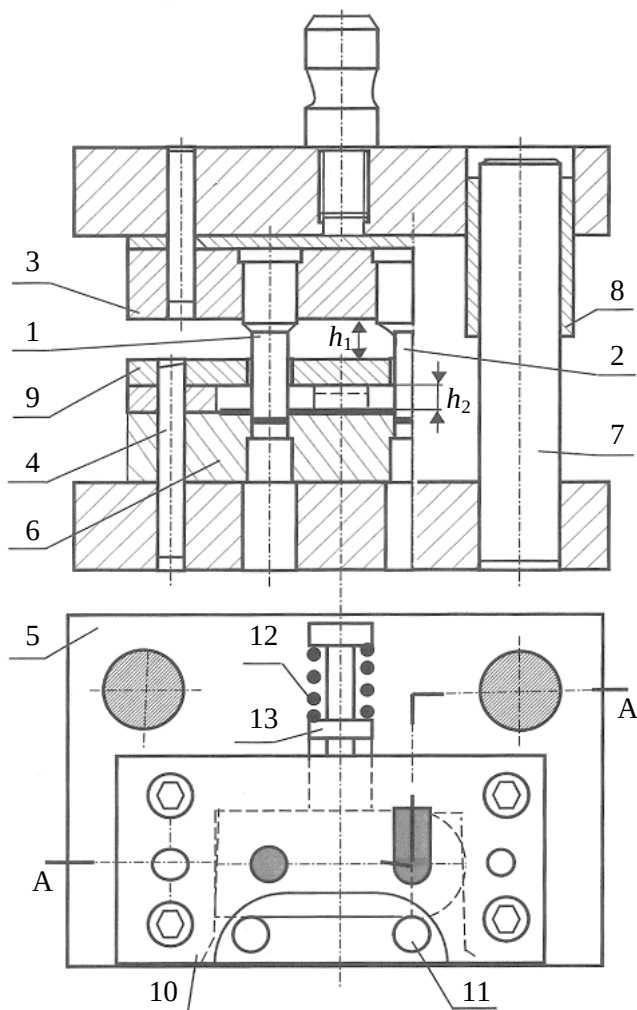
Rys. 3.12. Wykrojka [45]



Rys. 3.13. Przykłady różnego podziału linii cięcia na poszczególne operacje lub zabiegi (obszary zacienione określają wycinane części z blachy) [45]

którym symbolami oznaczono jej wymiary. Przedstawiony element (podobnie jak każda wykrojka) może być wykonany wieloma sposobami. Niektóre z nich wyszczególnione zostały na rys. 3.13. Są to:

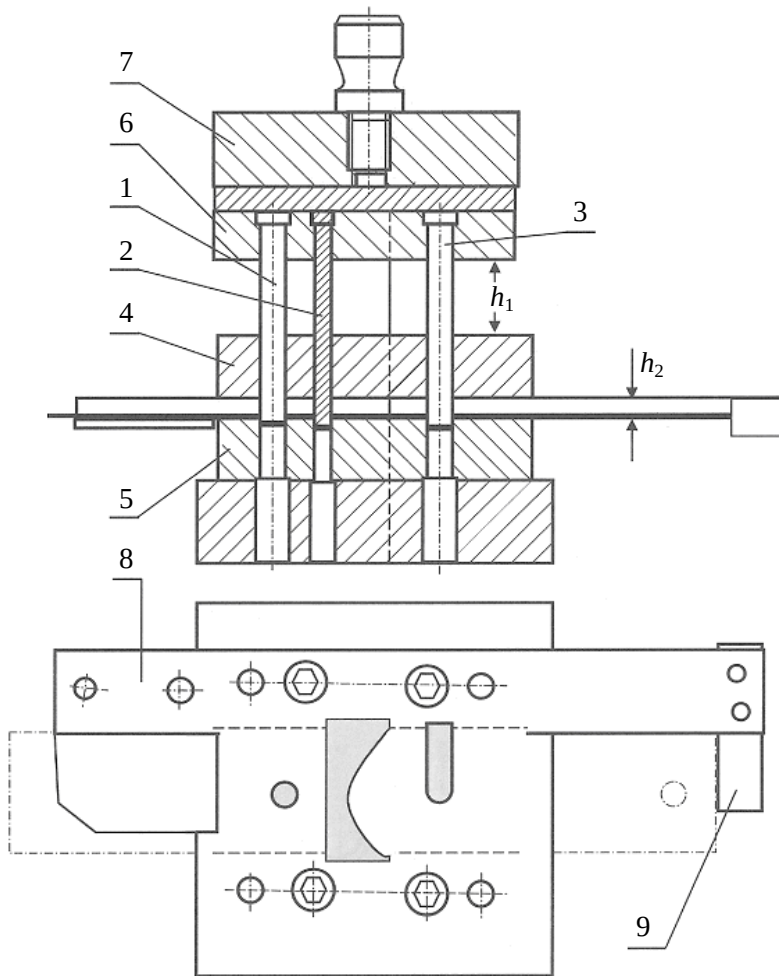
- cięcie w trzech operacjach (rys. 3.13a) obejmujące przycięcie prostokąta na nożycach gilotynowych, przycięcie krawędzi krzywoliniowej, oraz wycięcie dwóch otworów w dziurkowniku pokazanym na rys. 3.14;
- odcięcie podawanego ręcznie pasa o szerokości a (rys. 3.13b), np. w dwutaktowym odcinaku o konstrukcji pokazanej na rys. 3.15;
- wykrawanie wielotaktowe (rys. 3.13c) z szerokiej taśmy przesuwanej podajnikiem, w wykrojniku pokazanym na rys. 3.16;



Rys. 3.14. Dziurkownik [45]: 1,2 – stemple, 3 – płyta stemplowa, 4 – kołek, 5 – płyta podstawowa, 6 – płyta tnąca, 7 – słup prowadzący, 8 – tuleja, 9 – płyta spychająca, 10 – ramka ustalająca, 11 – kołek oporowy, 12 – sprężyna, 13 – suwak

- ❑ wykrawanie jednoczesne zarysu zewnętrznego i otworów (rys. 3.13d), za pomocą wykrojnika pokazanego na rys. 3.17.

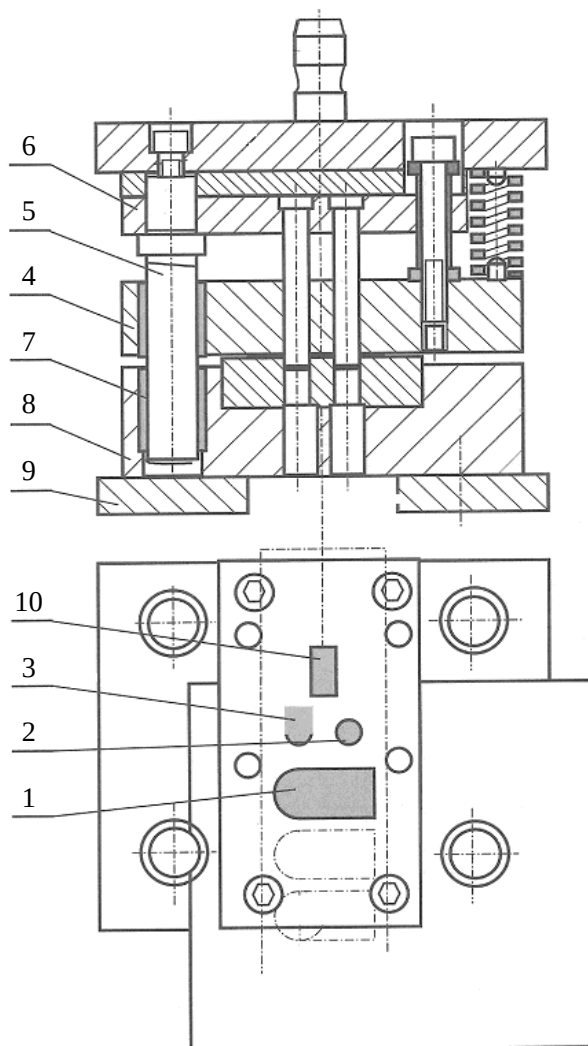
Dokładność wykrawania w dużym zakresie zależy od ustalenia położenia pasa blachy (względnie przygotówki wyciętej na gilotynie) w wykrojniku. I tak położenie przygotówki w dziurkowniku (rys. 3.14) ustalane jest za pomocą ramki ustalającej (10) oraz dwóch kołków oporowych (11). Przygotówka jest do nich dociskana przesuwным suwakiem (13), w efekcie oddziaływania sprężyny (12).



Rys. 3.15. Odcinak dwutaktowy [45]: 1, 2, 3 – stemple, 4 – płyta prowadząca, 5 – płyta tnąca, 6 – płyta stemplowa, 7 – płyta głowicowa, 8 – listwa prowadząca, 9 – zderzak

W odcinaku pokazanym na rys. 3.15 położenie obrabianego pasa blachy jest ustalone przez dociśnięcie jej do tylnej długiej listwy prowadzącej (8) i dosunięcie do zderzaka (9). Z kolei w wykrojniku wielotaktowym (rys. 3.16) skok pasa blachy jest ustalony za pomocą podajnika umieszczonego przed tłocznikiem. Położenie pasa w samym wykrojniku jest stabilizowane za pomocą kołków oporowych (rys. 3.18).

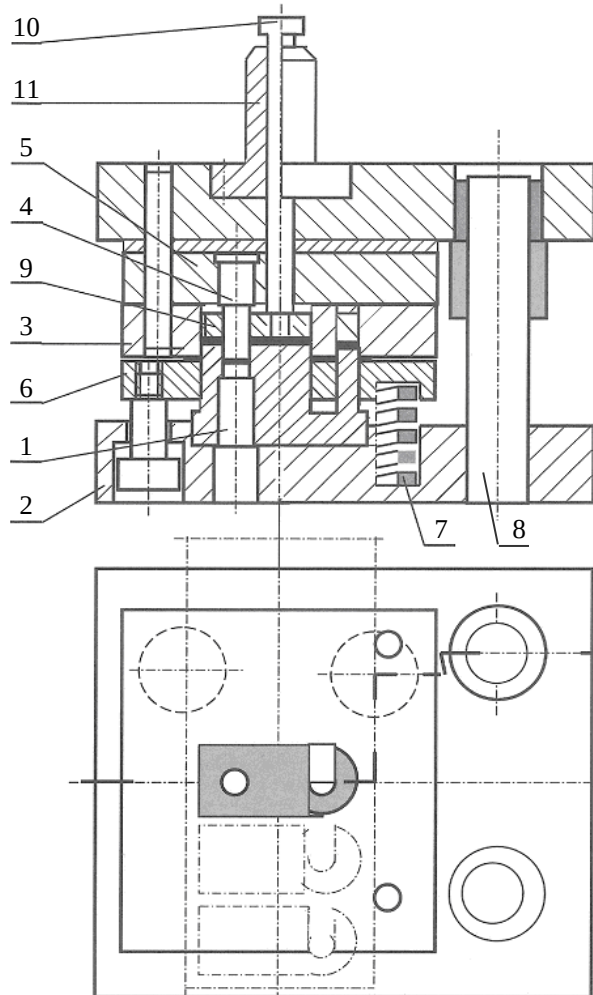
- ❑ kołków oporowych (stanowią opór dla materiału i ustalają jego skok);
- ❑ noży bocznych (są to stemple odcinające brzeg taśmy w celu ustalenia jej skoku);



Rys. 3.16. Wykrojenik wielotaktowy [45]: 1 – stempel wycinający zarys zewnętrzny wykrojki, 2, 3 – stemple wycinające otwory, 4 – ruchoma płyta prowadząca, 5 – słup, 6 – płyta stemplowa, 7 – tuleja, 8 – płyta podstawowa, 9 – listwa, 10 – stempel wygniatający napis na powierzchni blachy

- ❑ pilotów (służą do dokładnego, ostatecznego ustawienia materiału);
- ❑ listew prowadzących (zapobiegają poprzecznym przesunięciom materiału);
- ❑ oraz zderzaków, dociskaczy bocznych, oporników itd.

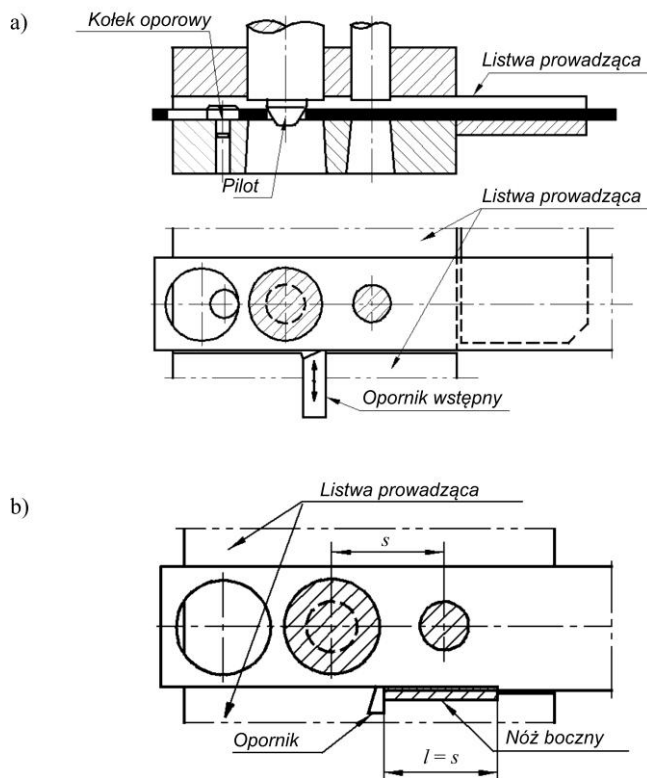
Bardziej szczegółowe dane na temat konstrukcji wykrojeników można znaleźć w opracowaniach [25] i [45].



Rys. 3.17. Wykrojek jednoczesny [45]: 1 – stempel, 2 – płyta podstawowa, 3 – płyta tnąca, 4 – stempel dziurkujący, 5 – płyta stemplowa, 6 – płyta spychająca, 7 – sprężyna, 8 – słup, 9 – wypychacz, 10 – trzpień, 11 – czop tłoczніка

3.8.3. Wygładzanie

Elementy wycinane na wykrojnیکach mają zwykle powierzchnię przecięcia pochyłą. Jest to szczególnie widoczne na wykrojkach wyciętych z blachy grubej. W celu uzyskania przedmiotu o dokładnych wymiarach oraz gładkiej i prostopadłej powierzchni przecięcia należy zastosować dodatkową operację wygładzania. Można ją przeprowadzić w wykrojnیکach według dwóch sposobów, to jest przez skrawanie lub przez tarcie.

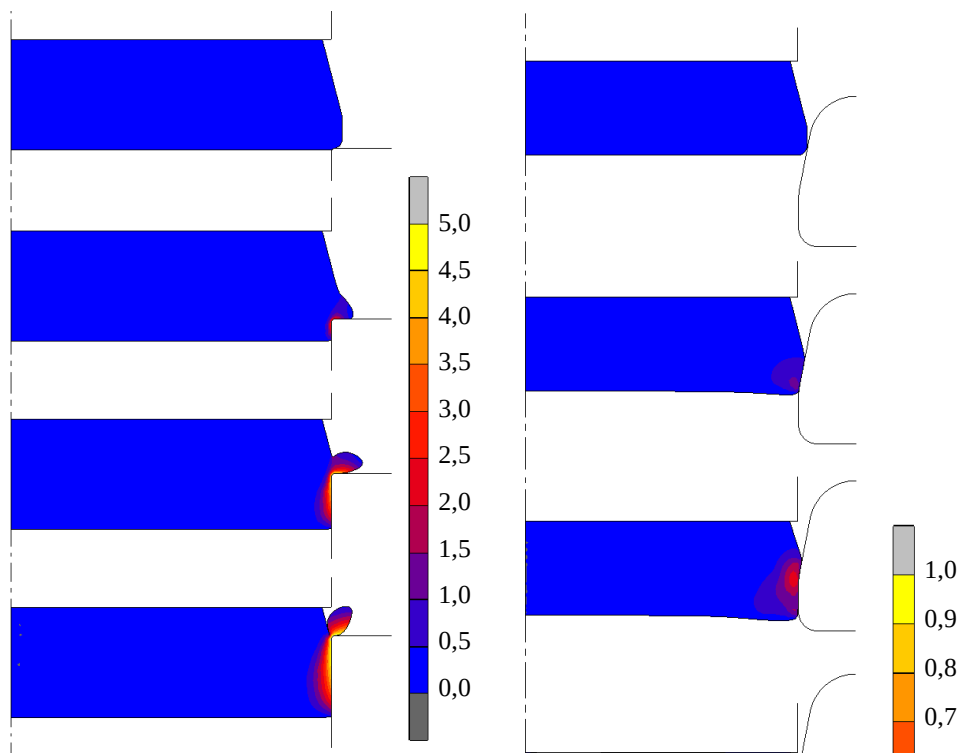


Rys. 3.18. Przykłady prowadzenia taśmy w procesie wykrawania za pomocą listwy prowadzącej oraz: a) kołka oporowego, b) noża bocznego

Wygładzanie przez skrawanie polega na ścięciu niewielkiego naddatku metalu, co przedstawiono na rys. 3.19. Zwykle ścina się warstwę metalu o grubości minimalnej $0,08 \div 0,11$ mm (w przypadku wykrojek o grubości od 0,8 do 4 mm). Przedmioty o skomplikowanych kształtach i wykrawane z materiałów grubszych niż 4 mm, wygładza się w dwóch lub w więcej operacjach. Przy wygładzaniu przez skrawanie często stosuje się stemple, których wymiary są większe od wymiaru w płycie tnącej o 0,1 g. W takiej sytuacji stempel dochodzi do płyty tnącej tylko na odległość $0,2 \div 0,3$ mm. Otwór w płycie tnącej wykonuje się na ostro (dla materiałów miękkich) lub zaokrągła promieniem $0,2 \div 0,3$ mm (dla materiałów twardszych).

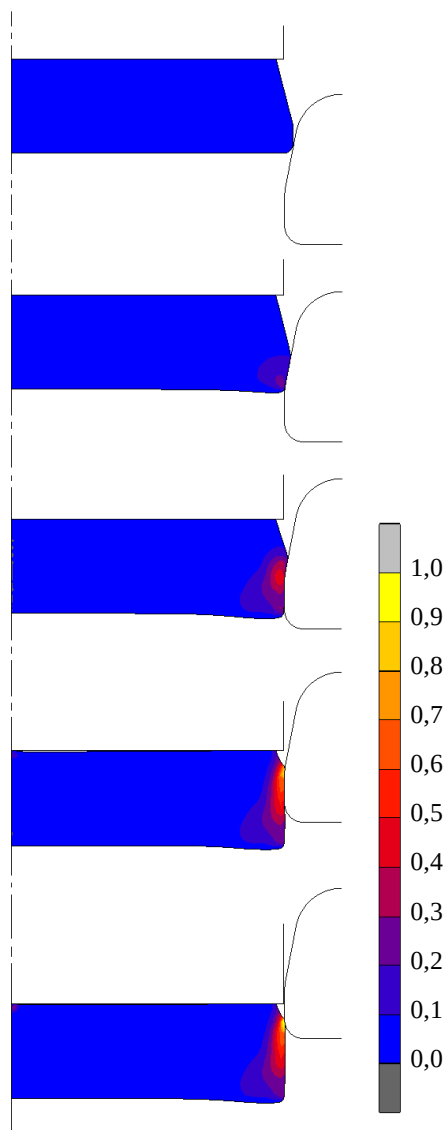
Inny sposób wygładzania pokazano na rys. 3.20. Polega on na przepychaniu wykrojki przez otwór stożkowy płyty wygładzającej. Nadatek przy tego rodzaju wygładzaniu przyjmuje się z reguły w zakresie $0,04 \div 0,06$ mm. Ten sposób wykończenia powierzchni stosuje się często dla wykrojek wygładzanych uprzednio przez skrawanie.

Te same metody można zastosować do wygładzania powierzchni bocznych otworów wykonanych w wykrojkach.



Rys. 3.19. Symulowany numerycznie przebieg procesu wygładzania przez skrawanie, wraz z rozkładem intensywności odkształcenia (powyżej)

Rys. 3.20. Symulowany numerycznie proces wygładzania przez tarcie, wraz z rozkładem intensywności odkształcenia (obok)



3.9. Cięcie dokładne (gładkie) blach

Gładką powierzchnię boczną i dokładne wymiary wyrobów można uzyskać w czasie jednej operacji stosując cięcie dokładne. Przykłady elementów uzyska-

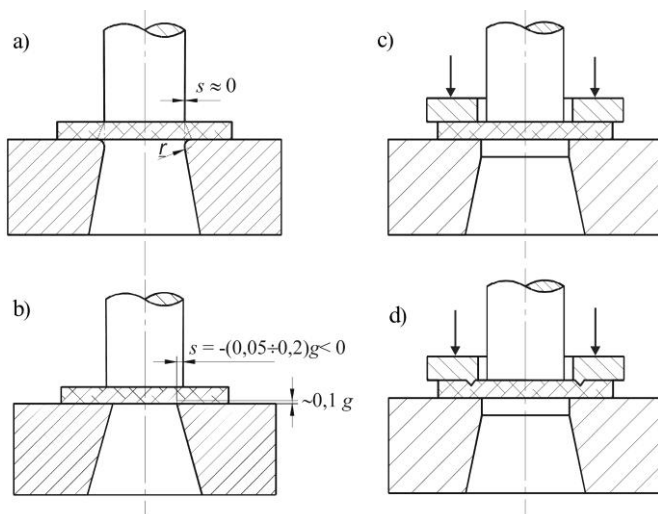
nych w ten sposób pokazano na rys. 3.21. Schematy czterech sposobów wykrawania dokładnego pokazano na rys. 3.22.

Na rys. 3.22a przedstawiono cięcie z luzem zerowym. W tym przypadku wykrawania stempel wykonany jest z luzem wynoszącym maksymalnie do 0,01 mm, w stosunku do otworu w płycie tnącej. W efekcie zastosowania tak małego luzu następuje opóźnienie momentu, w którym materiał pęka. Dodatkowo zastosowanie niewielkiego zaokrąglenia krawędzi płyty tnącej może całkowicie wyeliminować strefę pęknięcia z powierzchni bocznej wykrojki. Ten sposób wykrawania można stosować tylko w wytwarzaniu elementów z plastycznych metali nieżelaznych oraz z miękkiej stali o zawartości węgla mniejszej od 0,1%.

Przedmioty z bardzo plastycznych materiałów nieżelaznych można również wykrawać dokładnie stosując luz ujemny (rys. 3.22b). W tym przypadku cięcia wymiary stempla są większe od wymiarów otworu w płycie tnącej o wartość $0,1 \div 0,4 g$. Z tego powodu w procesie cięcia wymagane jest ograniczenie ruchu



Rys. 3.21. Przykłady wyrobów otrzymywanych w procesie wykrawania dokładnego



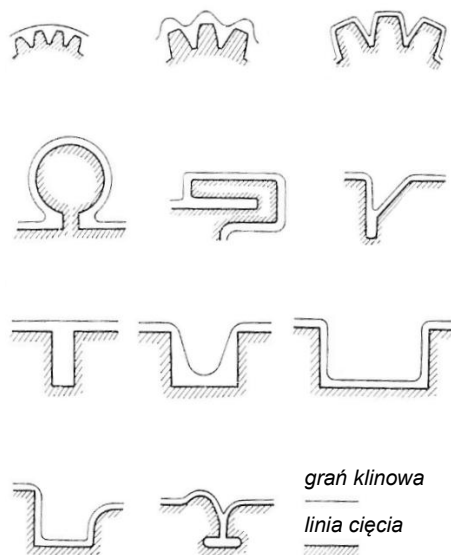
Rys. 3.22. Metody wykrawania dokładnego; a) z luzem zerowym, b) z luzem ujemnym, c) ze spęczaniem za pomocą płaskiego dociskacza pionowego, d) ze spęczaniem granią klinową

stempla, który musi się zatrzymać na wysokości około $0,1 g$ nad powierzchnią płyty. W procesie wykrawania z luzem ujemnym w metalu występują przede wszystkim naprężenia ściskające, co eliminuje proces pęknięcia. Część materiału łącząca wykrojkę z odpadem jest odrywana przez następny wyrób, który przepycha poprzedni przez otwór w płycie tnącej.

Najbardziej rozpowszechnionym schematem wykrawania dokładnego jest cięcie ze ściskaniem metalu. Ma ono na celu przeciwdziałanie pękaniu metalu poprzez wywołanie w strefie cięcia stanu trójosiowego ściskania

Najprostszym technicznie rozwiązaniem pozwalającym na uzyskanie trójosiowego ściskania jest zastosowanie w procesie wykrawania dociskacza o powierzchni płaskiej (rys. 3.22c). W tym przypadku skuteczne przeciwdziałanie pękaniu metalu wymaga stosowania nacisków o wartościach przekraczających granicę plastyczności materiału ciętego. Powoduje to, że siły wywierane przez dociskacze mogą być większe od siły cięcia, co z kolei wywołuje duże trudności w realizacji procesu. Tę metodę wykrawania stosuje się do cięcia blach stalowych o grubości $g \leq 2 \text{ mm}$ lub blach z materiałów nieżelaznych o grubości $g \leq 2,5\div 3 \text{ mm}$.

Bardziej skuteczny sposób wykrawania dokładnego polega na wywołaniu dostatecznie dużych naprężeń ściskających w strefie cięcia. Polega on na zastosowaniu dociskacza z granią klinową (rys. 3.22d), biegnącą wzdłuż linii cięcia. Granią klinową jest wykonywana na powierzchni czołowej dociskacza, gdy wykrawane są przedmioty z miękkich i średnio twardych metali o grubości mniejszej od 4 mm . Natomiast w przypadku materiałów twardych o grubościach powyżej 4 mm stosuje się granię klinową zarówno na dociskaczu jak i na płycie tnącej. Kształt grani klinowej w płaszczyźnie blachy jest zbliżony do linii cięcia (rys. 3.23), która odpowiada kształtowi wykrojki (stosuje się tu jednak szereg zaokrągleń eliminujących ostre naroża).



Rys. 3.23. Kształty grani klinowych (w płaszczyźnie blachy) w zależności od przebiegu linii cięcia

3.10. Cięcie gumą

W procesie cięcia gumą płytę tnącą zastępuje się poduszką z gumy (rys. 3.24), umieszczoną w obudowie stalowej zamocowanej do suwaka prasy. Podczas wykrawania obudowa zapobiega płynięciu gumy na boki. Z kolei stempel zastępuje się wzornikiem (w kształcie wykrojki), wykonanym z cienkiej płyty stalowej i zamocowanym do płyty podstawowej.

W czasie ruchu roboczego suwaka prasy najpierw ściskana guma dociska blachę do wzornika, następnie wygina wystające obrzeże i dociska je do płyty podstawowej. Dalszy ruch suwaka powoduje odkształcenie metalu wystającego za krawędź wzornika, które trwa do wystąpienia pęknięcia blachy wzdłuż tej krawędzi. W tej metodzie cięcia ma miejsce znaczne pocienienie brzegów wykrojki a powierzchnia cięcia jest dość nierówna.

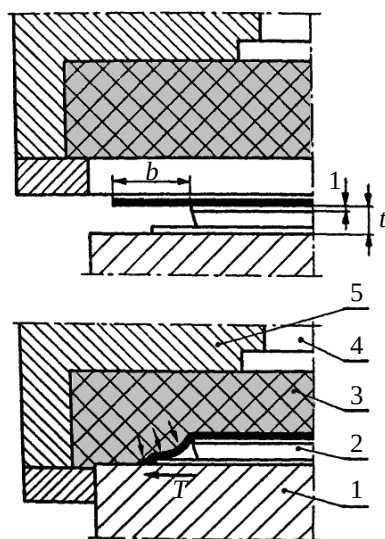
Za pomocą tej metody wycina się przedmioty z miękkich materiałów, jak np.: aluminium (do 2 mm grubości), duraluminium (do 1,2 mm grubości) oraz miękką stal (ok. 1,0 mm grubości). Z reguły cięcie gumą stosuje się w produkcji małoseryjnej, za wyjątkiem wykrawania drobnych przedmiotów z folii, gdzie metoda ta sprawdza się również w produkcji wielkoseryjnej.

Zaletami tej metody cięcia są:

- możliwość zastosowania tej samej poduszki gumowej do wykrawania elementów o różnych kształtach i wymiarach,
- bardzo niskie koszty wykonania narzędzi (zwykle jest to tylko wzornik).

Natomiast za podstawowe wady uznaje się:

- duże straty metalu,
- znaczne pocienienie wykrojek na brzegach,
- nierówną powierzchnię przecięcia,
- konieczność stosowania pras o dużych naciskach.



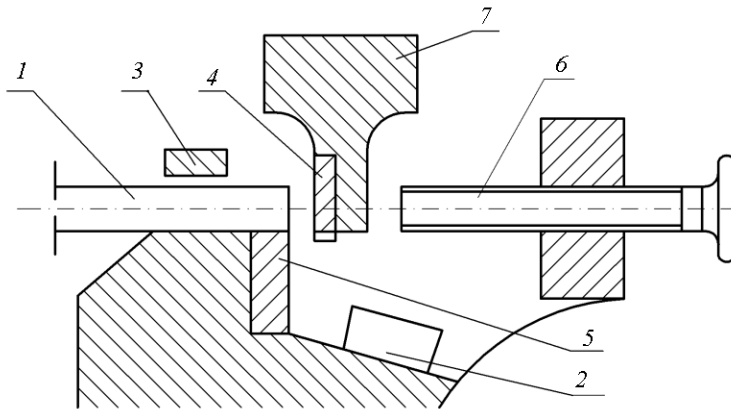
Rys. 3.24. Cięcie gumą [17]: 1 – płyta podstawowa, 2 – wzornik, 3 – guma, 4 – czop, 5 – obudowa

3.11. Cięcie prętów

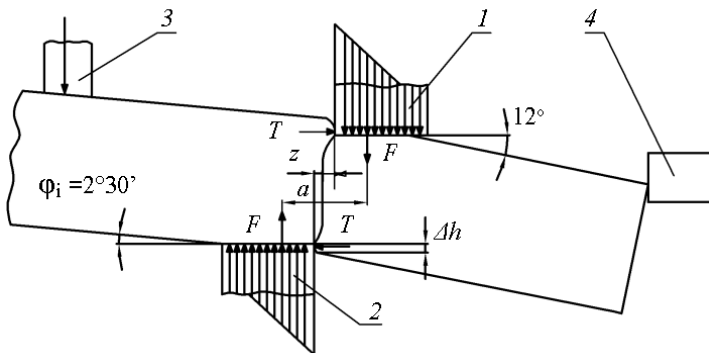
Cięcie prętów na odcinki stosowane jest w celu uzyskania materiału wyjściowego do produkcji elementów metodami obróbki skrawaniem, bądź też metodami objętościowej obróbki plastycznej.

Podstawową metodą dzielenia mechanicznego prętów metalowych jest cięcie na nożycach. Proces cięcia (rys. 3.25) realizuje się przez ułożenie i dociśnięcie pręta do nieruchomego noża dolnego i uruchomienie suwaka z nożem górnym, który podczas ruchu w dół odcina ustalony przez opór odcinek pręta.

Zabieg cięcia przebiega według następującego schematu (rys. 3.26). W następstwie naciśnięcia noży 1 i 2 na metal pojawiają się w nim odkształcenia sprężyste. Ponieważ noże są względem siebie przesunięte to powstaje para sił, która daje moment obrotowy $M = F \cdot a$. Moment ten stara się obrócić i zgiąć pręt, czemu przeciwstawia się opór 4 i dlatego kąt obrotu φ_m jest mały. Z chwilą gdy



Rys. 3.25. Schemat urządzenia do cięcia na nożycach: 1 – pręt, 2 – odcięty element, 3 – docisk, 4 – nóż górny, 5 – nóż dolny, 6 – opór, 7 – suwak



Rys. 3.26. Cięcie prętów na nożycach: 1, 2 – noże; 3, 4 – opory

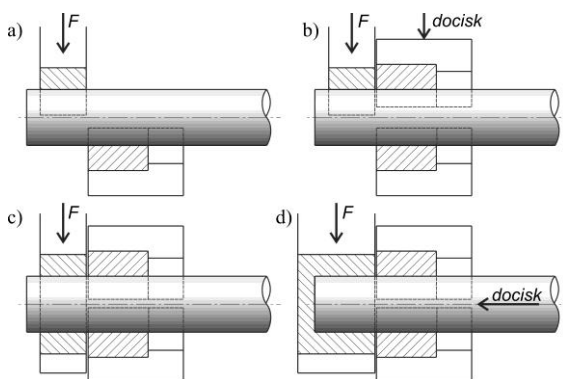
naprężenia wywołane naciskiem noży przekroczyć granicę plastyczności materiału, rozpoczyna się stopniowe wciskanie narzędzi w metal. Po zagłębieniu się noży w metal na głębokość większą od dopuszczalnej (dla danego gatunku materiału) pojawiają się w nim mikropęknięcia, które następnie łączą się w jedno pęknięcie i następuje ścięcie metalu wzdłuż krzywej pokazanej na rys. 3.26 [92].

Wymagania jakościowe stawiane elementom przecinającym spowodowały rozwój układów narzędziowych procesu cięcia na nożycach. W zależności od konstrukcji segmentu tnącego oraz prowadzenia materiału występuje (rys. 3.27):

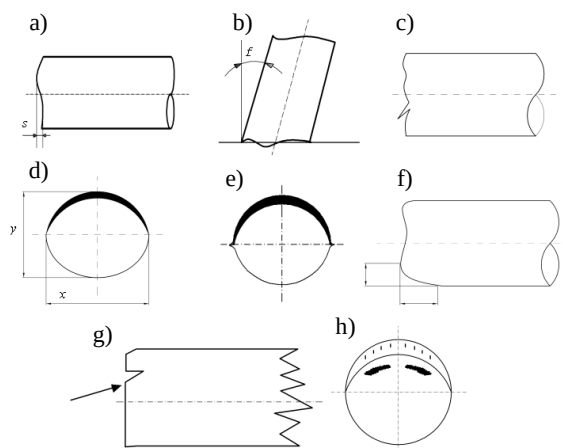
- cięcie bez docisku – rys. 3.27a;
- cięcie z dociskiem pręta (otwarte) – rys. 3.27b;
- cięcie z podtrzymaniem elementu ciętego i pręta (przymknięte) – rys. 3.27c;
- cięcie z podtrzymaniem elementu ciętego i pręta oraz z osiowym dociskiem elementu ciętego (zamknięte) – rys. 3.27d.

Poszczególne rozwiązania stosowane są w zależności od wymagań stawianych elementom ciętym, jak i od wielkości produkcji.

Kształt przeciętej powierzchni zależy głównie od stosunku luzu między nożami do średnicy pręta przecinanego oraz od gatunku metalu. Typowe wady występujące w procesie cięcia metalowych prętów okrągłych na nożycach przedstawia rysunek 3.28.



Rys. 3.27. Schematy cięcia pręta siłą F ; a) bez docisku, b) z dociskiem, c) z podtrzymaniem pręta i elementu ciętego, d) z podtrzymaniem elementu ciętego i pręta oraz z osiowym dociskiem elementu ciętego



Rys. 3.28. Typowe wady elementów występujące podczas przecinania prętów na nożycach: a) nierówna powierzchnia czołowa, b) brak prostokątowości przeciętej powierzchni do osi, c) wypusty, zadziory, d) owalizacja, e) odkształcenie w maksymalnym przekroju tzw. uszy, f) spłaszczenia końców pręta, g) pęknięcia, h) niejednorodna struktura przeciętej powierzchni, ślady pozostawione przez nóż [84]

4. Gięcie

4.1. Charakterystyka metod gięcia

Podział metod gięcia można przeprowadzić ze względu na rodzaj ruchu narzędzi. Wyróżnia się zatem gięcie:

- ❑ na prasach, gdzie narzędzie wykonuje ruch prostoliniowo-zwrotny (rys. 4.1 a-c);
- ❑ za pomocą walców, które poruszają się ruchem obrotowym (rys. 4.1 d-j);
- ❑ przez przeciąganie (rys. 4.1k).

Podstawowym sposobem gięcia na prasach jest wyginanie (rys. 4.1a), w którym pas blachy 1 układany jest na matrycy 2 i następnie poddawany jest działaniu stempla 3. W efekcie wywieranego nacisku blacha jest zakrzywiana pod stemplem i następuje ruch obrotowy ramion elementu wyginanego.

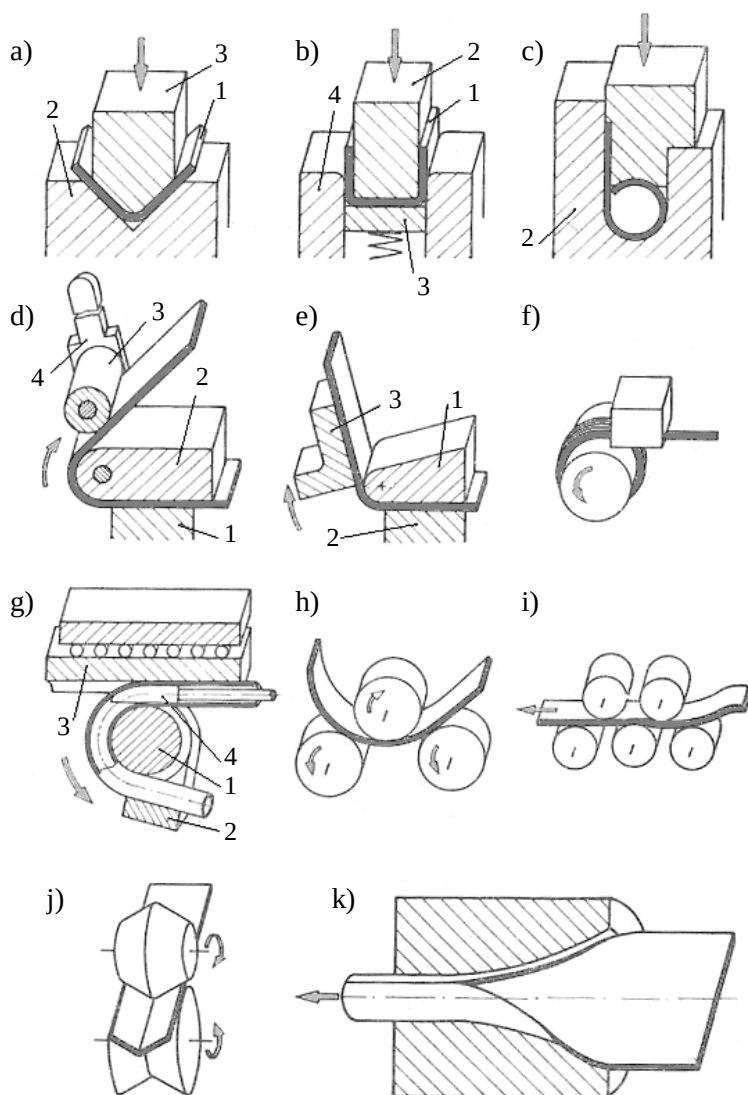
W trakcie zaginania (rys. 4.1b) blacha 1 jest ciągle dociskana przez dociskacz sprężysty 3 do powierzchni stempla 2. Oddziaływanie matrycy 4 na wystające poza stempeł części blachy powoduje zaginanie. W tym procesie kierunek ruchu stempla jest zgodny z kierunkiem ramion zaginanych.

Podczas zwiijania (rys. 4.1c) siła przykładana jest zgodnie z płaszczyzną blachy. Przemieszczana przez stempeł blacha ulega zakrzywieniu, w wyniku ślizgania się metalu po zaokrąglonej powierzchni matrycy 2. W procesie tym można uzyskać zawinięcie blach w kształcie rurki, którą wyjmuje się z matrycy poprzez jej wysunięcie w kierunku równoległym do tworzącej powierzchni walcowej.

Na rysunkach 4.1d-g pokazano schematycznie różne sposoby owijania. Najprostszy przyrząd do owijania płaskowników pokazano na rys. 4.1d. Po umocowaniu końca paska blachy w zacisku 1 pozostała jej część jest owijana wokół wzornika 2, w wyniku działania ruchomej rolki 3, przytwierdzonej do długiej dźwigni 4. Tę samą zasadę stosuje się w zaginarkach gnących szerokie arkusze blachy (rys. 4.1e). Tutaj blacha, utwierdzana przez wzornik 1 i stół 2 zaginarki, odkształcana jest ruchem obrotowym belki 3. Za pomocą owijania na trzpieniu (rys. 4.1f) można wytwarzać sprężyny śrubowe. Na rys. 4.1g pokazano urządzenie do owijania rur, w którym wzornik 1 wraz z uchwytem 2 wykonuje ruch ob-

rotowy. Docisk rury do wzornika realizuje się przez wózek ruchomy 3, który jest przez materiał owijany. Zmianie przekroju poprzecznego rury zapobiega się wprowadzając do jej wnętrza trzpień nieruchomy 4.

Na rys. 4.1h pokazano schematycznie gięcie blachy za pomocą trzech walców. Zakrzywienie blachy uzyskuje się w efekcie ruchu obrotowego walców naciskających w trzech miejscach na tę blachę. Tą metodą można giąć blachy o różnych



Rys. 4.1. Sposoby gięcia plastycznego: a) wyginanie, b) zaginanie, c) zwijanie, d) owijanie płaskowników, e) gięcie na zaginarkach, f) zwijanie sprężyn na trzpieniu, g) owijanie rur, h) gięcie blachy za pomocą trzech walców, i) prostowanie blachy, j) walcowanie wzdłużne kształtowników, k) gięcie przez przeciąganie [18]

grubościach i wymiarach. Metodą gięcia za pomocą wielu walców można również skutecznie prostować taśmy, pręty lub płaskowniki (rys. 4.1i).

Częstym sposobem gięcia taśm jest walcowanie wzdłużne (rys. 4.1j), będące wydajnym sposobem produkcji różnego rodzaju kształtowników. Zwykle obrabianą taśmę przepuszcza się kolejno przez kilka lub kilkanaście par walców poziomych ustawionych jedna za drugą. Dodatkowo, w procesie tym stosuje się pionowe walce prowadzące.

Metodą gięcia przez przeciąganie (rys. 4.1k) można zwinąć taśmę w rurę. W tym celu należy ją przeciągnąć przez nieruchome narzędzie z odpowiednio ukształtowanym otworem roboczym.

4.2. Przebieg procesu gięcia

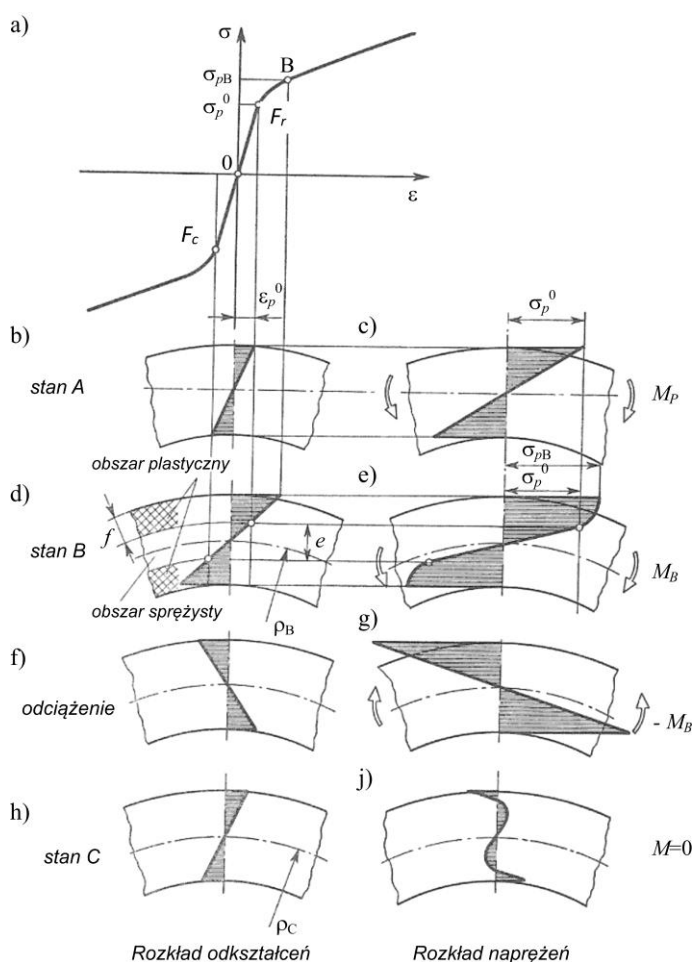
4.2.1. Stan naprężenia i odkształcenia

Na rys. 4.2a przedstawiono typową zależność naprężenie σ – odkształcenie ε , występującą podczas ściskania i rozciągania większości metali i stopów. Odcinek prostoliniowy F_0F_c podanej krzywej odnosi się do stanu sprężystego materiału. Wówczas, gdy naprężenia przekroczą pewną wartość graniczną σ_p^0 (granica plastyczności) materiał przechodzi w stan plastyczny, w którym występują odkształcenia trwałe. Dla zwiększenia odkształceń trwałych konieczne jest działanie coraz większych naprężeń. Zależność między stanem odkształcenia i naprężenia w zakresie plastycznym przedstawiają krzywoliniowe odcinki krzywej σ - ε , leżące na zewnątrz punktów F_r i F_c .

Rozpatrzmy proces zginania prostoliniowego płaskownika, wykonanego z materiału o własnościach określonych krzywą z rys. 4.2a, wywołany momentem zginającym M przyłożonym do obu jego końców. W efekcie działania momentu M płaskownik ulega zakrzywieniu i pojawiają się w nim naprężenia i odkształcenia. Przy czym w zakresie gięcia sprężystego zarówno odkształcenia osiowe jak i naprężenia są proporcjonalne do odległości warstwy analizowanej od warstwy neutralnej (rys. 4.2b i c). Ta faza procesu kończy się wówczas, gdy odkształcenia i naprężenia występujące w skrajnych warstwach płaskownika osiągną wartości graniczne, tj. ε_p^0 i σ_p^0 (stan A).

Dalsze zwiększanie krzywizny płaskownika powoduje przyrost odkształceń, które zachowują w przybliżeniu rozkład liniowy (rys. 4.2d). Jednakże wartość odkształceń w warstwach zewnętrznych o grubości f jest większa od odkształceń granicznych ε_p^0 . Zatem metal leżący w tych warstwach znajduje się w stanie plastycznym i rozdzielony jest warstwą (o grubości ε) materiału będącego jeszcze w stanie sprężystym. W tej sytuacji dla wyznaczenia rozkładu naprężeń

osiowych należy z wykresu podstawowego (rys. 4.2a) odczytać wartości naprężeń σ odpowiadające odkształceniom ε , występującym w poszczególnych warstwach (rys. 4.2d). Analiza otrzymanego w ten sposób rozkładu naprężeń σ (rys. 4.2e) pokazuje, że naprężenia w warstwie środkowej (sprężystej) wzrastają liniowo w miarę oddalania się od warstwy neutralnej i osiągają wartość graniczną σ_p^0 na granicy z warstwą uplastycznioną. Dalejszy wzrost naprężeń (w obszarze uplastycznionym) powodowany umocnieniem odkształconego metalu nie jest już liniowy.



Rys. 4.2. Stan odkształcenia i naprężenia w procesie gięcia plastycznego (opis w tekście) [18]

Założmy, że w momencie osiągnięcia stanu zakrzywienia B (rys. 4.2d i e) następuje odciążenie płaskownika, w wyniku którego moment zginający zmniejsza się do zera. Podczas odciążania zakrzywiony pręt ulega częściowemu wyprostowaniu, a więc jego krzywizna zmniejsza się.

Po całkowitym zdjęciu obciążenia w płaskowniku zagiętym pozostają naprężenia własne pierwszego rodzaju. Rozkład tych naprężeń wyznacza się poprzez nałożenie na rozkład naprężeń w stanie B (rys. 4.2e) rozkładu naprężeń wywołanych przeciwnie skierowanym momentem $-M_B$, przy założeniu, że pasmo znajduje się wówczas w stanie sprężystym (rys. 4.2g). W efekcie takiego zsumowania naprężeń uzyskano rozkład naprężeń własnych pokazany na rys. 4.2i.

Jak widać z tego rysunku w warstwie zewnętrznej, rozciąganej podczas gięcia, pojawiają się ściskające naprężenia własne i odwrotnie, w warstwie wewnętrznej rozciągające naprężenia własne. Oczywiście, jak zawsze przy naprężeniach własnych występuje równowaga sił i momentów.

4.2.2. Związek między momentem gnącym a krzywizną

Z analizy podanej w rozdziale 4.2.1 wynika, że zmiana krzywizny $1/\rho$ giętego pasma następuje w efekcie działania momentu gnącego M . Na rys. 4.3 pokazano typową zależność moment M – krzywizna $1/\rho$, charakteryzującą proces gięcia. Podczas każdego procesu gięcia występują scharakteryzowane poniżej trzy fazy:

- **Faza obciążania sprężystego** (odcinek O-P na rys. 4.3), w której moment zginający wzrasta od 0 do wartości M_p , a krzywizna $1/\rho$ zwiększa się od 0 do $1/\rho_p$ zgodnie z zależnością:

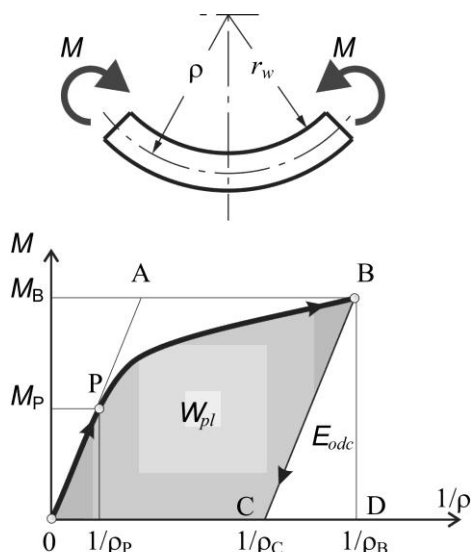
$$\frac{1}{\rho} = (1-\nu) \frac{12M}{Ebg^2}, \quad (4.1)$$

gdzie: E – moduł sprężystości wzdłużnej, ν – współczynnik Poissona, b – szerokość pasa giętego, g – grubość blachy. Wartość momentu uplastyczniającego M_p w przypadku gięcia pasów blachy o znacznej szerokości ($b > 4g$) można obliczyć z następującej zależności przybliżonej:

$$M_p = \frac{bg^2}{(1-\nu^2)6} R_e, \quad (4.2)$$

gdzie przez R_e oznaczono granicę plastyczności metalu, z którego wykonana jest blacha.

- **Faza gięcia plastycznego** (krzywa P-B na rys. 4.3), występująca po przekroczeniu granicznej wartości momentu uplastyczniającego M_p . W tej fazie ma miejsce trwałe zakrzywianie plastyczne blachy. Natomiast przebieg krzywej P-B (rys. 4.3) uzależniony jest od własności plastycznych materiału kształtowanego.
- **Faza odciążania** (odcinek B-C rys. 4.3), w której moment zginający M zmniejsza się od wartości M_B do 0. Powoduje to proporcjonalne (sprężyste) zmniejszenie krzywizny od wartości $1/\rho_B$ do wartości końcowej $1/\rho_C$, przy



Rys. 4.3. Zmiany momentu zginającego M , zachodzące w kolejnych fazach gięcia, w zależności od krzywizny $1/\rho$ [45]

czym zachowany jest tutaj warunek (w przypadku gięcia pasów o szerokości $b > 4g$):

$$\frac{1}{\rho_B} - \frac{1}{\rho_C} = (1 - \nu^2) \frac{12M_B}{Eb g^3}. \quad (4.3)$$

Wartość momentu zginającego M_B , wymaganego do uzyskania zakładanej krzywizny $1/\rho_C$ pasa giętego, można obliczyć na podstawie następującej zależności:

$$M_B = \frac{b g^2}{6} \sigma_g, \quad (4.4)$$

gdzie: σ_g – wartość zastępczego naprężenia gnącego, podanego dla niektórych materiałów w tabeli 4.1. Dla wyznaczenia σ_g z tab. 4.1 wykorzystuje się związek między $1/\rho_C$ a stosunkiem wymiarów r_w/g , opisany zależnością:

$$r_w = \rho_C - 0,5g, \quad (4.5)$$

gdzie: r_w – promień wewnętrzny krzywizny blachy.

4.2.3. Praca gięcia

W wyniku gięcia momentem zginającym M_B , pas blachy o długości l (rys. 4.3) przyjmuje kształt łuku koła określonego promieniem ρ_B (równym ρ_D) oraz kątem środkowym Θ_B równym

$$\Theta_B = l / \rho_B. \quad (4.6)$$

Całkowitą pracę gięcia W wykonaną przez moment M (zmieniający się od wartości 0 do M_B – rys. 4.3) można obliczyć ze wzoru

$$W = \int_0^{\Theta_B} M d\Theta. \quad (4.7)$$

Ponieważ kąt Θ jest proporcjonalny do krzywizny $1/\rho$, zatem zależność między momentem gnącym M a kątem Θ ujmuje (w odpowiedniej skali) rys. 4.3. Całce (4.7) odpowiada na tym wykresie pole ograniczone linią OABDO. Zatem, całkowita praca gięcia W zużyta została na pracę odkształcenia plastycznego W_{pl} oraz została zmagazynowana w pręcie w postaci energii sprężystej. Część energii sprężystej E_{odc} , której na wykresie 4.3 odpowiada pole trójkąta BCD, jest oddana w procesie odciażania. Można ją obliczyć z zależności

$$E_{odc} = \frac{1}{2} M_B \Delta\Theta_{spr}, \quad (4.8)$$

gdzie: $\Delta\Theta_{spr}$ – kąt sprężystego powrotu równy:

$$\Delta\Theta_{spr} = l \left(\frac{1}{\rho_B} - \frac{1}{\rho_C} \right). \quad (4.9)$$

Tabela 4.1.

Wartości naprężenia gnącego σ_g i współczynnika wypełnienia wykresu λ [45]

r_w/g		Stal					Mosiądz		Aluminium
		Granica plastyczności R_e lub $R_{0,2}$ [MPa]							
		190	240	290	320	350	165	275	105
1,0	σ_g	540	670	738	790	793	546	610	182
	λ	0,807	0,815	0,842	0,859	0,857	0,648	0,802	0,992
1,25	σ_g	530	660	725	775	780	530	795	182
	λ	0,805	0,810	0,823	0,850	0,870	0,685	0,805	0,988
1,6	σ_g	525	642	704	764	770	476	753	182
	λ	0,801	0,807	0,816	0,840	0,869	0,691	0,821	0,984
2,0	σ_g	514	627	684	752	762	435	713	183
	λ	0,794	0,805	0,809	0,830	0,865	0,705	0,836	0,976
2,5	σ_g	495	608	660	735	748	395	680	184
	λ	0,785	0,803	0,805	0,828	0,862	0,721	0,850	0,970
3,2	σ_g	466	580	627	706	723	355	646	185
	λ	0,785	0,801	0,800	0,822	0,860	0,738	0,864	0,958
4,0	σ_g	440	555	595	680	700	310	612	186
	λ	0,790	0,801	0,803	0,820	0,860	0,762	0,870	0,940
5,0	σ_g	412	528	565	654	675	297	600	186
	λ	0,800	0,805	0,808	0,818	0,860	0,770	0,870	0,933
6,3	σ_g	385	497	535	628	650	274	583	185
	λ	0,815	0,811	0,820	0,820	0,861	0,805	0,869	0,916
8,0	σ_g	358	467	505	601	628	254	568	185
	λ	0,831	0,819	0,832	0,823	0,865	0,805	0,865	0,900
10,0	σ_g	336	440	475	576	606	238	554	185
	λ	0,848	0,828	0,848	0,827	0,869	0,820	0,860	0,881
12,5	σ_g	318	418	450	554	586	225	538	182
	λ	0,866	0,835	0,865	0,831	0,871	0,830	0,851	0,871
16,0	σ_g	300	394	424	533	565	211	522	180
	λ	0,890	0,846	0,891	0,837	0,867	0,840	0,837	0,841
20,0	σ_g	290	381	405	515	550	201	510	178
	λ	0,905	0,853	0,910	0,836	0,879	0,859	0,825	0,810
25,0	σ_g	277	369	395	500	538	192	497	177
	λ	0,920	0,862	0,908	0,820	0,870	0,855	0,809	0,768

Zawarta w nawiasie różnica krzywizn (wzór (4.9)) w sposób jednoznaczny opisana jest zależnością (4.3).

Pracę odkształcenia plastycznego W_{pl} , której na wykresie 4.3 odpowiada pole figury OPBCO można wyznaczyć korzystając z następującej zależności:

$$W_{pl} = \lambda M_B \frac{l}{\rho_B}, \quad (4.10)$$

gdzie λ jest współczynnikiem wypełnienia wykresu. Współczynnik ten wyrażony jest stosunkiem pola figury OPBCO do pola równoległoboku OABC (rys. 4.3). Wartość współczynnika λ dla niektórych metali i stopów można odczytać z tabeli 4.1. Natomiast dla materiałów nie ujętych w tym wykazie przybliżoną wartość λ (w przypadku, gdy $r_w/g < 50$) można obliczyć z zależności:

$$\lambda = \frac{1}{1+n}, \quad (4.11)$$

gdzie n jest wykładnikiem umocnienia.

4.2.4. Siła gięcia

W procesach gięcia moment gnący M , niezbędny do uzyskania zakładanego zakrzywienia płaskownika, jest efektem działania siły F przykładanej do jego powierzchni. W przypadku gdy siła F działa na ramieniu c względem utwierdzenia (podpory) – rys. 4.4, jej wartość określona jest równaniem:

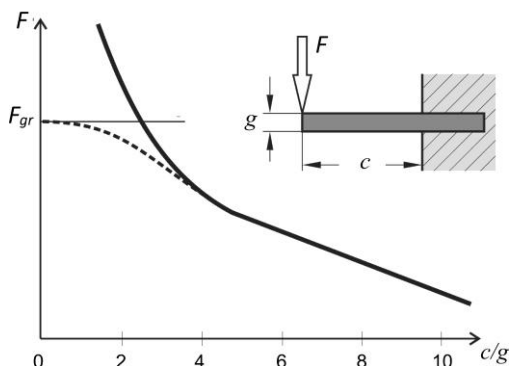
$$F = \frac{M}{c}. \quad (4.12)$$

Powyższą zależność przedstawia hiperbola zaznaczona na rys. 4.4 linią ciągłą.

W miarę zmniejszania się ramienia c , wartość siły F wzrasta. Jednakże wzrost ten ograniczony wartością F_{gr} , przy której zakrzywienie blachy ma miejsce w wyniku działania maksymalnych naprężeń stycznych τ (równych granicy plastyczności k materiału przy czystym ścinaniu). Przybliżoną wartość siły granicznej F_{gr} , przy której następuje ścięcie plastyczne przekroju poprzecznego płaskownika o wymiarach $b \cdot g$, można wyznaczyć z zależności:

$$F_{gr} = (0,3 \div 0,5) b g R_e, \quad (4.13)$$

gdzie: R_e – granica plastyczności materiału zginanego. Ze względu na występowanie wartości granicznej F_{gr} siły gięcia hiperbolę $F(c)$, pokazaną na rys. 4.4, należy uzupełnić w zakresie małych wartości ramienia c (gdy $c < 4g$) krzywą (zaznaczoną linią przerywaną) zbliżającą się asymptotycznie do wartości F_{gr} , gdy c dąży do 0.



Rys. 4.4. Zależność siły gięcia P , skierowanej prostopadle do osi pasma, od stosunku wymiarów c/g [45]

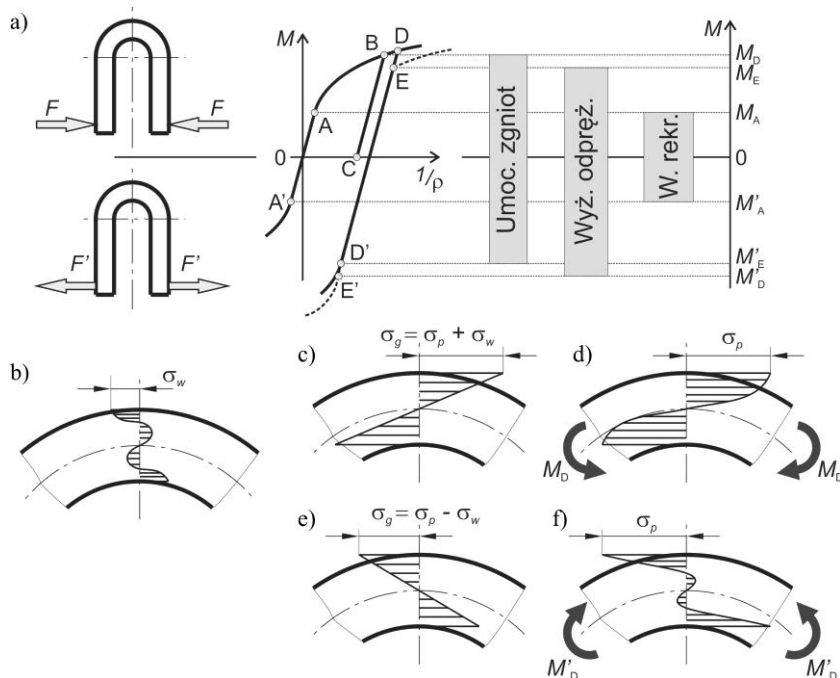
4.3. Własności wyrobów giętych

4.3.1. Wytrzymałość na gięcie

W efekcie umocnienia materiału towarzyszącemu procesowi kształtowania plastycznego na zimno własności wytrzymałościowe przedmiotów otrzymywanych w ten sposób ulegają wydatnemu zwiększeniu. Ponadto, naprężenia własne mogą być przyczyną dalszego wzrostu wytrzymałości, ale tylko wówczas gdy obciążenie robocze przedmiotu jest zgodne z obciążeniem, które wystąpiło podczas obróbki plastycznej tego elementu.

Podana powyżej zasada jest oczywiście słuszna również w odniesieniu do przedmiotów otrzymanych w efekcie gięcia plastycznego. Rozpatrzmy za [18] wytrzymałość przedmiotu w kształcie litery U (rys. 4.5a), który został wykonany przez zginanie plastyczne na zimno odcinka pręta. Przebieg procesu zginania przedstawia na wykresie linia OABC. Po zdjęciu momentu gnącego (punkt C wykresu) w przedmiocie występują naprężenia własne o rozkładzie pokazanym na rys. 4.5b. W takim stanie element jest wmontowany do maszyny (urządzenia).

W czasie pracy przedmiot ten może ulegać doginaniu lub rozginaniu. W efekcie obciążeń roboczych w zakrzywionej części elementu powstają dodat-



Rys. 4.5. Wpływ sposobu obciążania i obróbki cieplnej (wyżarzanie odpężające lub rekrytalizujące) na nośność wyrobu zagiętego na zimno (tj. umacniającego się przez zgniot) [18]

kowe naprężenia które nakładają się na istniejące w nim naprężenia własne. W przypadku doginania (moment zginający działa tak samo jak moment podczas zginania plastycznego elementu) naprężenia w warstwach skrajnych (rys. 4.5c) mają znak przeciwny niż naprężenia własne. Rzeczywisty rozkład naprężeń w elemencie podczas doginania, pokazany na rys. 4.5d, powstaje poprzez zsumowanie naprężeń gnących i własnych. Wychodząc z założenia, że obciążenie robocze nie może wywołać w warstwach zewnętrznych elementu naprężeń uplastyczniających σ_p (nastąpiłoby wówczas odkształcenie trwałe elementu), można obliczyć wartość maksymalną momentu M_D , którym można obciążyć przedmiot podczas jego doginania.

Natomiast wówczas, gdy analizowany przedmiot podczas pracy jest rozginany, to naprężenia robocze (w warstwach skrajnych) mają ten sam znak co naprężenia własne (rys. 4.5e). W efekcie czego moment gnący o wartości $M_D < M_B$ wywoła uplastycznienie skrajnych warstw metalu płaskownika giętego – zgodnie z rys. 4.5f, na którym pokazano rzeczywisty rozkład naprężeń (powstały przez nałożenie naprężeń własnych i gnących).

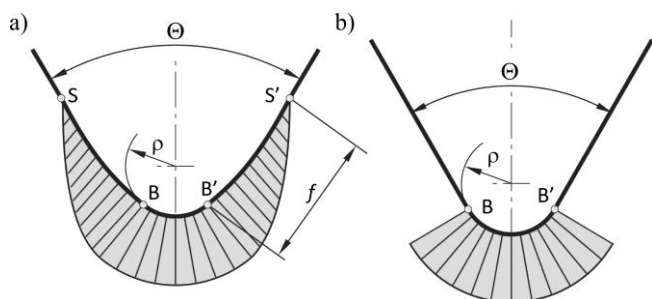
Z przeprowadzonej analizy wynika, że w przypadku doginania naprężenia własne zwiększają nośność elementu, a podczas rozginania zmniejszają. Dla wyrównania nośności (w obu rozważanych przypadkach) należy przeprowadzić wyżarzanie odpężające, usuwające naprężenia własne występujące w elemencie po gięciu.

Należy pamiętać o tym, że wyżarzanie nie powinno przebiegać w zbyt wysokiej temperaturze, gdyż może nastąpić wtedy rekrytalizacja prowadząca do powrotu do początkowych własności metalu. W efekcie takiego faktu nastąpiłoby znaczne zmniejszenie wytrzymałości przedmiotu na zginanie, która nie przekroczyłaby wartości momentu $|M_A| = |M'_A|$ pokazanej na rys. 4.5.

4.3.2. Dokładność zarysu

Typowy zarys wyrobu otrzymanego w procesie wyginania pokazano na rys. 4.6a. Odcinek BB' linii gięcia jest w przybliżeniu równy długości łuku o promieniu zaokrąglenia stempla powiększonemu o połowę grubości płaskownika (blachy) giętego. Natomiast krzywizna blachy występująca na łukach BS i B'S' jest zmienna i zmniejsza się stopniowo do zera. Ramiona elementu giętego leżącego na zewnątrz punktów S i S' są proste, gdyż nie działało na nie dostatecznie duże obciążenie zewnętrzne.

Zarys idealny przedmiotu giętego (rys. 4.6b) zakładany do uzyskania, różni się od zarysu rzeczywistego głównie na odcinkach BS i B'S, gdzie blacha nie powinna być zakrzywiana. Długość odcinka f (rys. 4.6a) można zmniejszyć przez dotłoczenie wyrobu w ostatniej fazie wyginania. Jednakże całkowite usunięcie wzmiankowanej krzywizny wymagałoby zastosowania bardzo dużych sił dotła-



Rys. 4.6. Porównanie krzywizny $1/\rho$ i zarysu przedmiotu wygiętego: a) rzeczywistego, b) idealnego [18]

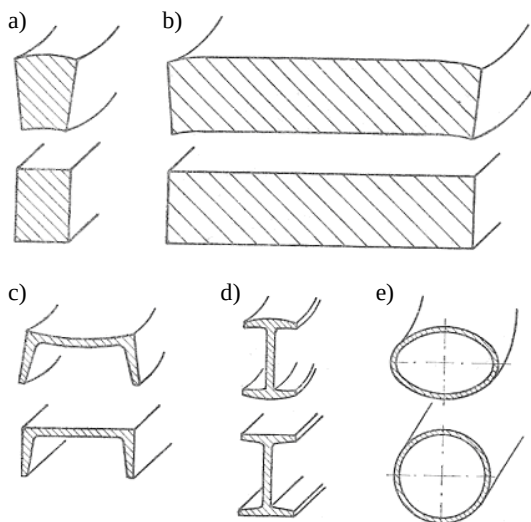
czania, o wartościach praktycznie niemożliwych do osiągnięcia. Z tego też powodu ramiona elementów gnących mają na pewnych odcinkach zarysy różniące się od prostoliniowych zarysów idealnych.

4.3.3. Odształcenia przekroju poprzecznego

Procesowi gięcia plastycznego towarzyszą na ogół zmiany kształtu przekroju poprzecznego wyrobu giętego. Są one powodowane zmniejszeniem się wymiarów poprzecznych warstw rozciąganych oraz zwiększaniem się wymiarów analogicznych warstw obszarów ściskanych. W efekcie podczas gięcia pręta wąskiego (rys. 4.7a) jego przekrój poprzeczny zmienia kształt z prostokątnego w trapezowy. Ponadto warstwy zewnętrzne i wewnętrzne pręta ulegają zakrzywieniu.

W przypadku gięcia płaskowników szerokich (dla których $b \geq 4g$) zakrzywienie powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej występuje tylko w pobliżu brzegów płaskownika – w sposób zgodny z pokazanym na rys. 4.7b.

Znaczące zmiany kształtu przekroju poprzecznego występują podczas gięcia kształtowników cienkościennych (rys. 4.7c i d). Związane są one nie tylko ze zmianą grubości ścianek ale również z odginaniem tych ścianek powodującym zmniejszenie momentu bezwładności przekroju poprzecznego kształtownika.



Rys. 4.7. Zmiany kształtu przekroju poprzecznego podczas gięcia: a) płaskowników wąskich, b) płaskowników szerokich dla których $b \geq 4g$, c) ceowników, d) dwuteowników, e) rur [18]

Z kolei w procesach gięcia rur konieczne jest użycie specjalnych rdzeni w celu przeciwdziałania spłaszczeniu przekroju poprzecznego – rys. 4.7e.

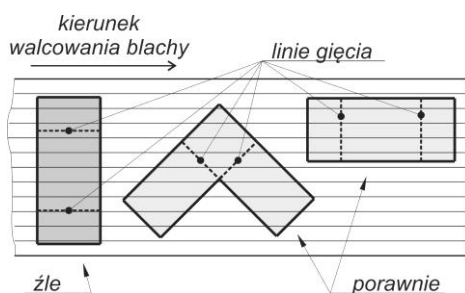
W podsumowaniu należy stwierdzić, że zmiana przekroju poprzecznego jest nieuniknioną konsekwencją gięcia plastycznego i musi być uwzględniona przy opracowywaniu technologii bazujących na tym procesie kształtowania plastycznego metali.

4.3.4. Najmniejszy promień gięcia

Wartość odkształceń występujących w elemencie giętym zależy od promienia gięcia. Przy zbyt małych promieniach w warstwach rozciąganych mogą pojawić się pęknięcia. Z tego powodu najmniejsze promienie gięcia powinny być przyjmowane w zależności od odkształceń dopuszczalnych, występujących w skrajnych rozciąganych warstwach metalu.

Dopuszczalną wartość promienia r_w wewnętrznej powierzchni przedmiotu giętego wyraża się najczęściej odnosząc ją do grubości g elementu. Wartość krytyczna stosunku r_w/g zależy od:

- ❑ rodzaju i stanu materiału, im materiał bardziej się umacnia tym większe winny być promienie gięcia;
- ❑ położenia linii gięcia w zależności od kierunku walcowania (rys. 4.8); najmniejszy promień gięcia można stosować wówczas, gdy linia gięcia jest prostopadła do kierunku walcowania (tj. kierunku włókien);
- ❑ stanu powierzchni – nierówności, rysy oraz naderwania leżące w części rozciąganej przyspieszają pęknięcie metalu. Z tego też względu części wykrawane należy giąć tak, by zadziór przy którym występują pęknięcia poprzeczne umiejscowiony był po stronie ściskanej.



Rys. 4.8. Przykłady poprawnego i wadliwego gięcia elementów wyciętych z arkusza blachy [35, 63]

Przybliżoną wartość najmniejszego promienia gięcia $r_{w \min}$ można określić na podstawie zależności:

$$r_{w \min} = c_w \cdot g, \quad (4.14)$$

gdzie: g – grubość elementu, c_w – współczynnik zależny od rodzaju materiału (patrz tabela 4.2).

Tabela 4.2.

Wartości współczynnika c_w wykorzystywanego przy określaniu najmniejszego promienia gięcia, na podstawie [45, 63]; oznaczenia gatunków stali wg normy PN/H-84020

Materiał	Wyżarzony lub normalizowany		Umocniony	
	Położenie linii gięcia			
	w poprzek włókien	wzdłuż włókien	w poprzek włókien	wzdłuż włókien
Aluminium	0,0	0,2	0,3	0,8
Mosiądz	0,0	0,3	0,3	0,8
Miedź	0,0	0,3	1,0	2,0
Stal 0,05÷0,08% C	0,0	0,3	1,0	2,0
Stal St1, St2	0,0	0,4	0,4	0,8
Stal 15, 20, St3	0,1	0,5	0,5	1,0
Stal 25, 30, St4	0,2	0,6	0,6	1,2
Stal 35, 40, St5	0,3	0,8	0,8	1,5
Stal 55, 60, St7	0,7	1,3	1,3	2,0
Miękkie duraluminium	1,0	1,5	1,5	2,5

4.3.5. Długość materiału wyjściowego do gięcia

Dla wyznaczenia wymiarów (długości) materiału wyjściowego do gięcia konieczna jest znajomość położenia warstwy zerowego wydłużenia, która w procesie gięcia nie doznaje zmian długości.

W przypadku dużych promieni gięcia ($r_w \geq 6g$) można przyjąć, że warstwa zerowa leży po środku grubości metalu. Zatem

$$r_0 = r_w + \frac{g}{2}, \quad (4.15)$$

gdzie: r_0 – promień krzywizny warstwy wydłużenia zerowego, r_w – wewnętrzny promień gięcia, g – grubość blachy.

Natomiast w przypadku stosowania małych promieni gięcia ($r_w < 6g$) materiał ulega pocienieniu, a warstwa nie zmieniająca długości przesuwają się w kierunku warstw ściskanych. Dla wyznaczenia promienia r_0 krzywizny warstwy zerowego wydłużenia stosuje się w tej sytuacji zależność

$$r_0 = r_w + k_x g, \quad (4.16)$$

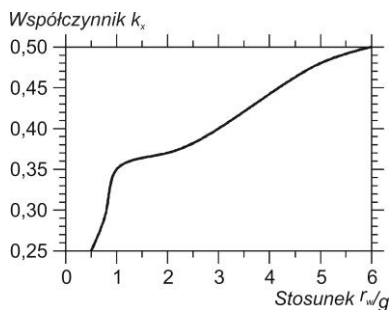
gdzie k_x jest współczynnikiem zależnym od stosunku r_w/g (rys. 4.9).

Wyroby gięte o kształtach złożonych dzieli się na odcinki proste i łuki kół (rys. 4.10). Całkowita długość materiału wyjściowego l jest równa sumie długości

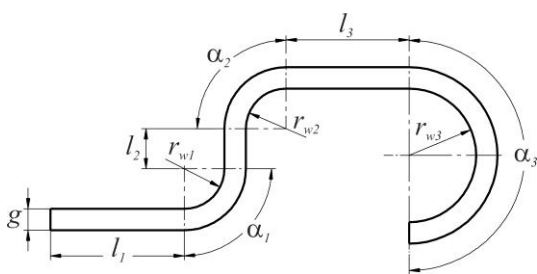
odcinków prostych i łuków, liczonych wg warstwy nie zmieniającej długości podczas gięcia. Zatem

$$l = \sum_i l_i + \sum_j (r_{wj} + k_{xj} g) \alpha_j, \quad (4.17)$$

gdzie kąt gięcia α_j liczony jest w radianach.



Rys. 4.9. Zależność współczynnika k_x od stosunku wymiarów r_w/g

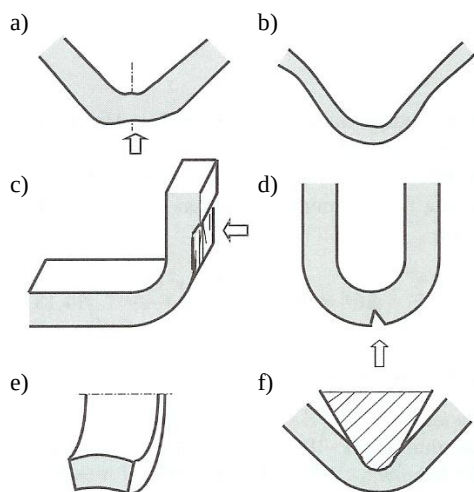


Rys. 4.10. Podział przedmiotu zgiętego na elementarne odcinki proste i łuki

4.4. Wady przedmiotów giętych

Często spotykane wady wytłoczek, wykonywanych gięciem na prasach, pokazano na rys. 4.11. Są to:

- ❑ lokalne wgłębienie w postaci bruzdy, które jest widoczne na zewnętrznej powierzchni blachy i biegnie wzdłuż krawędzi gięcia (rys. 4.11a);
- ❑ esowaty kształt ramienia zagiętego, stanowiący ślad rozginania niepotrzebnie zakrzywionego odcinka (rys. 4.11b);
- ❑ uszkodzenie powierzchni wytłoczki w pobliżu krawędzi gięcia przez ślizgającą się po powierzchni blachy krawędź matrycy (rys. 4.11c);
- ❑ pęknięcie blachy przebiegające wzdłuż zagiętej krawędzi (rys. 4.11d);



Rys. 4.11. Typowe wady wytłoczek giętych [45]: a) lokalne wgłębienie w postaci bruzdy, b) esowaty kształt zagiętego ramienia, c) uszkodzenie powierzchni elementu przez krawędź matrycy, d) deformacja przekroju poprzecznego, f) wgniecenie stempla

- ❑ deformacja przekroju poprzecznego (rys. 4.11e);
- ❑ wgniecenie krawędzi gnącej stępła w wewnętrzną powierzchnię blachy (rys. 4.11f).

Wymienionym powyżej wadom można skutecznie zapobiegać na etapie projektowania technologii. Szczegółowe wytyczne jak należy postępować by uniknąć wystąpienia przedstawionych wad podano w opracowaniu [45].

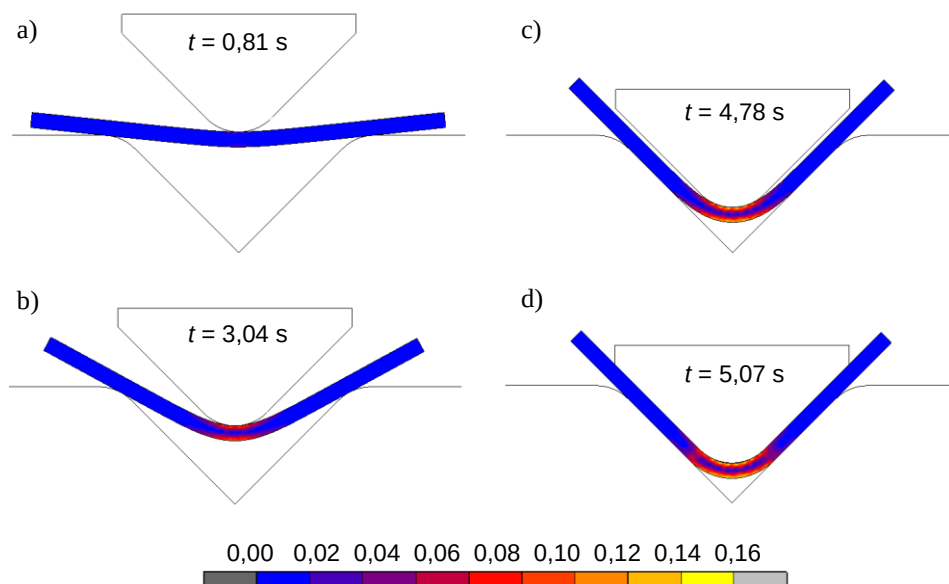
4.5. Procesy technologiczne

4.5.1. Wyginanie

W procesie wyginania (rys. 4.1a) realizowanym na prasach, kierunek ruchu stempla jest w przybliżeniu zgodny z kierunkiem dwusiecznej kąta jaki tworzą ramiona przedmiotu zagiętego.

Rozpatrzmy proces wyginania na zimno płaskownika ze stali C15 (oznaczenie wg EN), o wymiarach 4x50x110 mm, za pomocą stempla i matrycy o zarysie pokazanym na rysunku 4.12. Proces kształtowania takiego płaskownika można podzielić na następujące trzy fazy:

- ❑ Faza I – gięcie sprężyste. W początkowej fazie gięcia stempel naciska wierzchołkiem na płaskownik powodując jego ugięcie sprężyste.



Rys. 4.12. Przebieg procesu wyginania, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w wyrobie giętym, w funkcji czasu t : a) faza gięcia sprężystego; b i c) faza gięcia plastycznego; d) dotłaczanie

W tym etapie (rys. 4.12a) procesu odkształcany materiał zachowuje się jak belka podparta na dwóch podporach (odległych o l), obciążona w środku siłą skupioną F . W takim przypadku największy moment zginający występuje w środku belki i wynosi

$$M = \frac{F \cdot l}{4}. \quad (4.18)$$

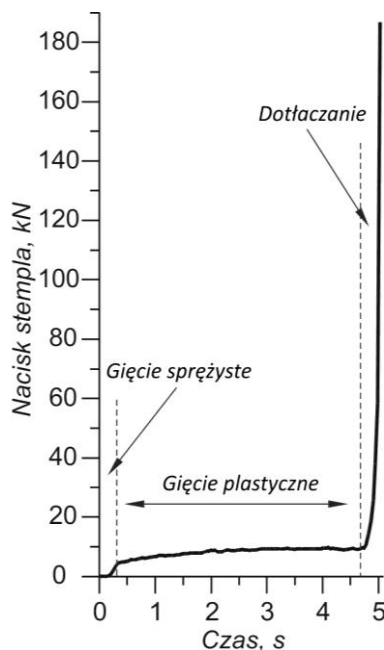
Faza ta kończy się w momencie, gdy moment zginający osiągnie wartość graniczną M_p równą

$$M_p = \frac{b \cdot g^2}{6} \sigma_p, \quad (4.19)$$

odpowiadającą pojawieniu się pierwszych odkształceń plastycznych w warstwach skrajnych.

- Faza II – gięcie plastyczne. Dalszy wzrost nacisku stempła powoduje rozszerzanie się obszaru w którym metal znajduje się w stanie plastycznym. Jest to dobrze widoczne na rys. 4.12, na którym zaznaczono również rozkład intensywności odkształcenia w materiale. Podczas tej fazy gięcia ramiona płaskownika stopniowo unoszą się do góry do momentu, gdy uzyskają pożądaną kąt zgięcia (rys. 4.12c). W tej chwili proces gięcia można byłoby uznać za zakończony, gdyż zagięte ramiona tworzą zadany kąt wierzchołkowy matrycy, a promień zaokrąglenia jest bliski zadanemu. Jednakże w przypadku wyrobów dokładnych zastrzeżenia może budzić odcinek przejściowy (między ramieniem a łukiem) wynikający z luzu między stemplem a matrycą. W takiej sytuacji należy przejść do fazy trzeciej gięcia.
- Faza III – dotłaczanie. W celu zmniejszenia długości odcinka przejściowego, a tym samym zbliżenia się do zarysu nominalnego należy zwiększyć nacisk stempła. W efekcie doprowadza się do sytuacji (rys. 4.12d), gdy płaskie powierzchnie stempła i matrycy dochodzą do powierzchni blachy, powodując jej ściśnięcie i ostateczną korektę kształtu zagięcia.

Na rys. 4.13 pokazano rozkład siły działającej na stempel, w zależności od czasu

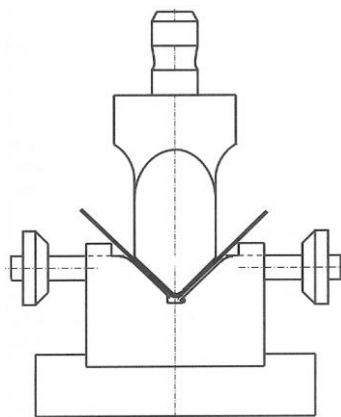


Rys. 4.13. Rozkład siły działającej na stempel w procesie wyginania pasma blachy ze stali w gatunku C15, o wymiarach 4x50x110 mm

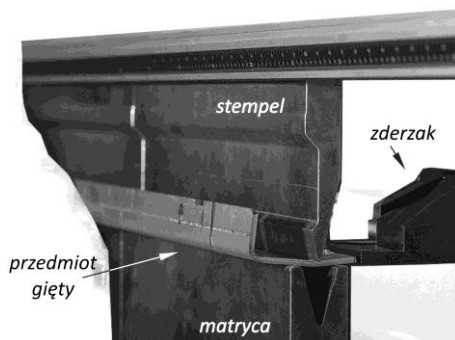
gięcia. W fazie dotłaczania nacisk jest największy i może wielokrotnie przekroczyć wartość siły występującej pod koniec fazy gięcia plastycznego.

Wyginanie przeprowadza się na tłocznikach zwanych wyginakami, które są mocowane do uniwersalnych pras mechanicznych lub hydraulicznych. Na rys. 4.14 pokazano przykładowy wyginak o prostej konstrukcji, przeznaczony do wykonywania niewielkiej partii wyrobów. Proces wyginania można również realizować na maszynach specjalizowanych – prasach krawędziowych, które są

obecnie nowoczesnymi, wysokowydajnymi maszynami sterowanymi numerycznie. Fotografie przedstawiającą wyginanie za pomocą narzędzi zamocowanych na prasie krawędziowej przedstawiono na rys. 4.15.



Rys. 4.14. Najprostszy wyginak typu V [45]



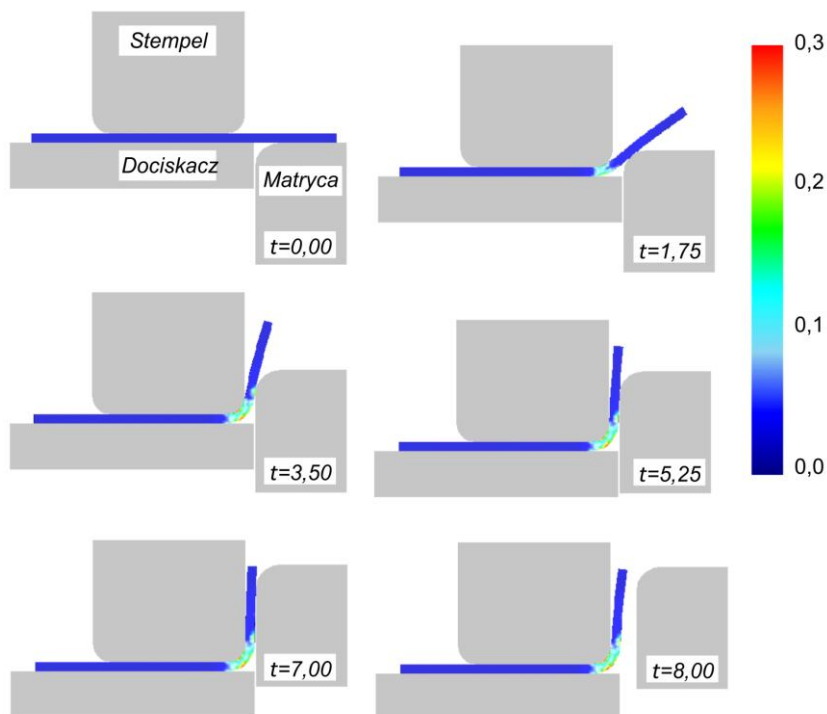
Rys. 4.15. Przykład wyginania realizowanego na prasie krawędziowej

4.5.2. Zaginanie

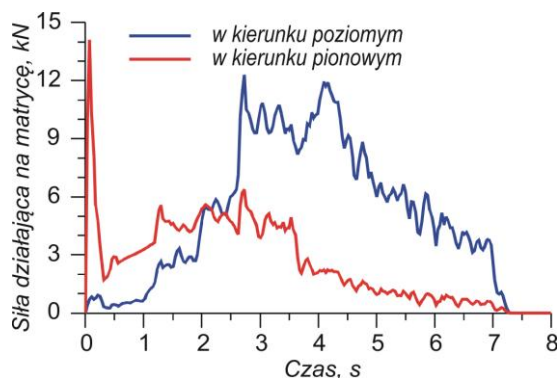
Podczas zaginania (rys. 4.1b) kierunek ruchu stempla pokrywa się na ogół z kierunkiem ramienia zagiętego. Proces zaginania realizowany w tłoczniku zwanym zaginakiem składa się z trzech faz: gięcia sprężystego, gięcia plastycznego i dotłaczania. Przebieg tych faz jest podobny jak podczas wyginania, zatem nie będzie on bardziej szczegółowo omawiany. Natomiast pokrótce przybliżone zostaną podstawowe typy stosowanych zaginaków.

Zaginaki typu L

W tłocznikach tego typu jedno z ramion płaskownika zaginanego dociskane jest za pomocą dociskacza do powierzchni czołowej stempla i przemieszcza się wraz z nim do dołu. W tym samym czasie obraca się po zaokrąglonej powierzchni matrycy, ulegając stopniowemu zaginaniu. W końcowej fazie procesu ramię to ustawione jest zgodnie z kierunkiem ruchu stempla. Po odsunięciu matrycy może wystąpić zjawisko powrotnego sprężynowania materiału (rys. 4.16 dla $t = 8s$), w wyniku którego ramię zagięte ulega pewnemu odchyleniu na zewnątrz.



Rys. 4.16. Przebieg procesu zaginania typu L, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w wyrobie giętym, w funkcji czasu t [s]



Rys. 4.17. Rozkłady sił działających na matrycę w procesie zaginania typu L pasma blachy, w gatunku C15, o wymiarach 3x30x100 mm

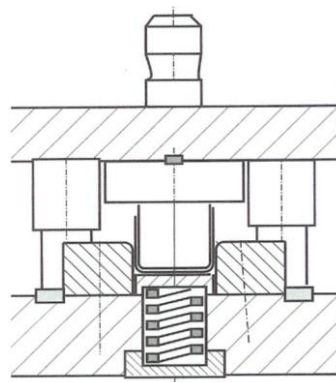
W procesie zaginania typu L na matrycę działa siła skośna, o czym informują nas rozkłady składowych tej siły pokazane na rys. 4.17. Składowa pozioma dąży do odchylenia stempla i zwiększenia szczeliny. Aby temu przeciwdziałać stempel powinien być podparty na poziomie matrycy przez specjalny element prowadzący. Natomiast siła pionowa na matrycy równa jest sile nacisku stempla pomniejszonej o siłę wywieraną pionowo przez dociskacz.

Zaginaki podwójne typu U

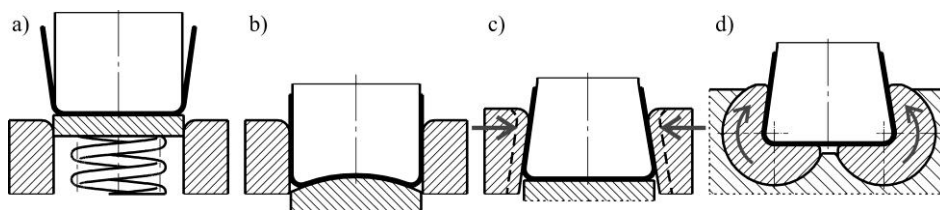
W celu otrzymania wytłoczki o zarysie zbliżonym do litery U należy równocześnie zaginać płaskownik wzdłuż dwóch linii równoległych – rys. 4.18. W tym przypadku gięcia występuje korzystny układ sił, gdyż składowe poziome siły wywieranych przez matrycę wzajemnie się równoważą. Nie ma zatem tutaj potrzeby stosowania dodatkowych prowadnic stempla. Natomiast w wyniku powrotnego sprężynowania metalu następuje rozchylenie na zewnątrz ramion otrzymanego ceownika (rys. 4.19a). Zapobiec temu zjawisku można poprzez:

- ❑ zagięcie ramion o kąt większy od 90° (rys. 4.19b, c i d) licząc na późniejsze zmniejszenie się tego kąta;
- ❑ wywołanie w miejscu zagięcia dodatkowych odkształceń plastycznych (poprzez wciśnięcie grani stempla w materiał), które zmieniają istniejący tam stan naprężeń skutecznie ograniczający zjawisko sprężynowania.

Podobne metody zapobiegania sprężynowaniu metalu po gięciu można również stosować w omówionych uprzednio zaginarkach typu L.



Rys. 4.18. Zaginak podwójny typu U [45]

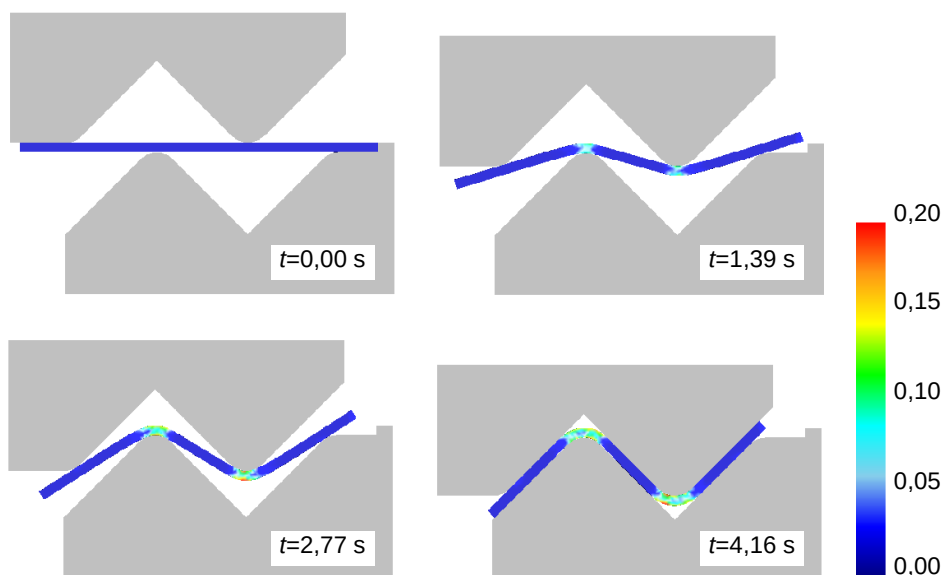


Rys. 4.19. Odształcenie powrotne ramion ceownika (a) oraz sposoby przeciwdziałania jego wystąpieniu, przez: b) sprężyste zakrzywienie dna; c) dotłoczenie szczękami bocznymi; d) zastosowanie obrotowych szczęk gnących

Zaginaki podwójne typu Z

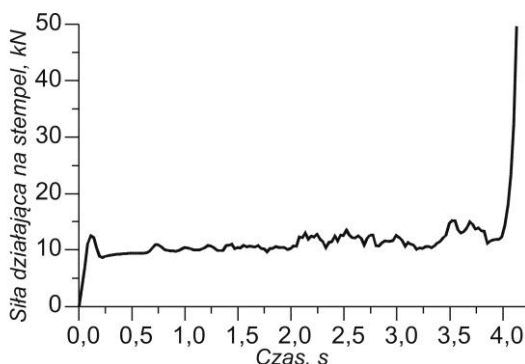
Zaginanie w czasie jednej operacji wytłoczek w kształcie litery Z, a więc mających jedno ramię zagięte do góry a drugie do dołu, może być wykonane za pomocą jednolitych narzędzi, których zarys odpowiada zarysowi gotowego wyrobu – rys. 4.20.

W czasie procesu zaginania siła wywierana przez stempel utrzymuje się mniej więcej na stałym poziomie (rys. 4.21). Dopiero w końcowej fazie gięcia tj. w czasie dotłaczania nacisk stempla wzrasta kilkukrotnie.



Rys. 4.20. Przebieg procesu zaginania typu Z za pomocą jednolitych stempli i matryc, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w wyrobie giętym, w funkcji czasu t

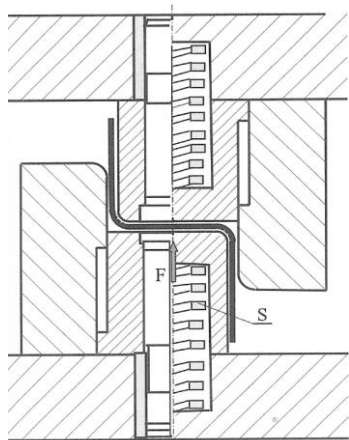
Zaletą omawianej metody gięcia jest prostota i mały koszt wykonania tłoczniaka. Natomiast wadą jest niska jakość wytłoczki, wynikająca ze zwiększającej się podczas gięcia odległości między zagięciami, co powoduje rozciąganie odcinka środkowego oraz ślizganie się blachy po zakrzywionej powierzchni narzędzi. Poprawę jakości wyrobu można uzyskać przez poziome usytuowanie środkowego odcinka wytłoczki, który ponadto jest silnie dociskany do powierzchni narzędzi. Schemat tłoczniaka zapewniającego realizację takiego procesu zaginania pokazano na rys. 4.22.



Rys. 4.21. Siła działająca na stempel w procesie zaginania typu Z kształtownika z blachy C35 o wymiarach początkowych 3x30x110 mm

4.5.3. Zwijanie

W procesie zwijania (rys. 4.1c) na kształtowany materiał wywierany jest nacisk powodujący ślizganie się blachy po zakrzywionej powierzchni narzędzia.

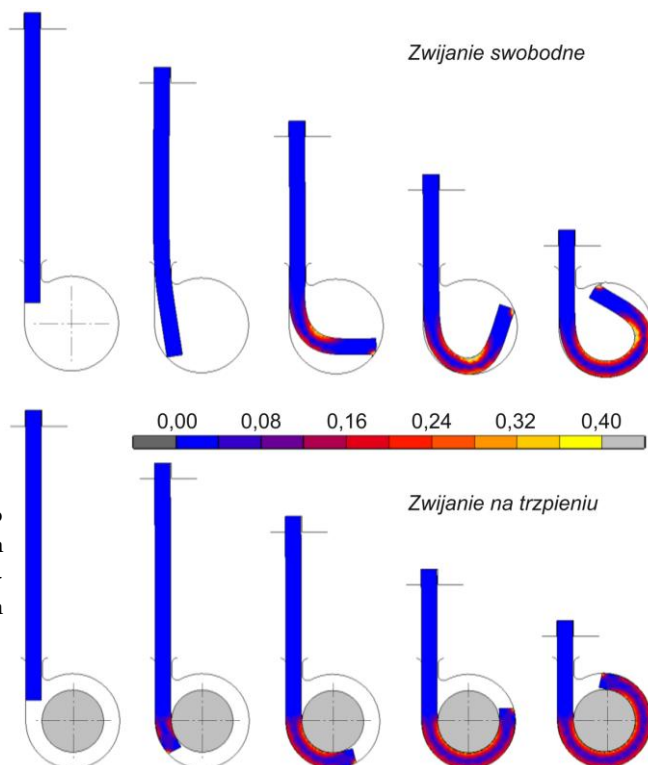


Rys. 4.22. Schemat wyginaka z dociskaczami (sprężyna S), pełniącymi rolę stempli gnących [45]

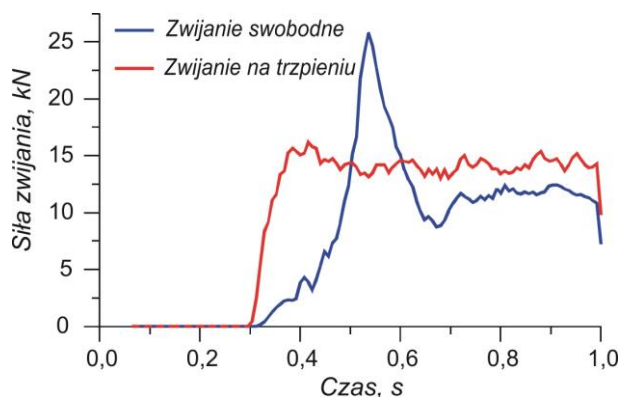
W efekcie zaginana część blachy przyjmuje kształt rurki. Na rys. 4.23 porównano dwa procesy zwijania (swobodne oraz na trzpieniu) pasa blachy o wymiarach początkowych 3x50x50 mm. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że podczas zaginania swobodnego kształt uzyskiwanej rurki odbiega od zarysu narzędzia. Pewną poprawę można tutaj uzyskać wprowadzając wstępne lekkie zagięcie materiału wyjściowego ułatwiające ślizganie się blachy (wymaga to jednak odpowiedniego ukształtowania powierzchni stempla stosowanego do wykrawania elementu lub wprowadzenia osobnej operacji).

W procesie gięcia na trzpieniu uzyskuje się natomiast idealny kształt rurki (rys. 4.23).

Ponadto, korzystny jest rozkład siły zwijania, która utrzymuje stałą wartość w czasie całego procesu, w porównaniu do zwijania swobodnego (rys. 4.24). Należy pamiętać o tym, że przyjęcie zbyt małego promienia rurki może spowodować, iż siła wywierana przez stempel zamiast zwinienia spowoduje wyboczenie blachy lub jej spęczenie plastyczne.



Rys. 4.23. Porównanie przebiegów zwijania swobodnego i na trzpieniu, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w wyrobie giętym (pokazane fazy procesu odnoszą się – licząc od lewej – dla czasu $t = 0,2$ s; $0,4$ s; $0,6$ s; $0,8$ s; $1,0$ s)

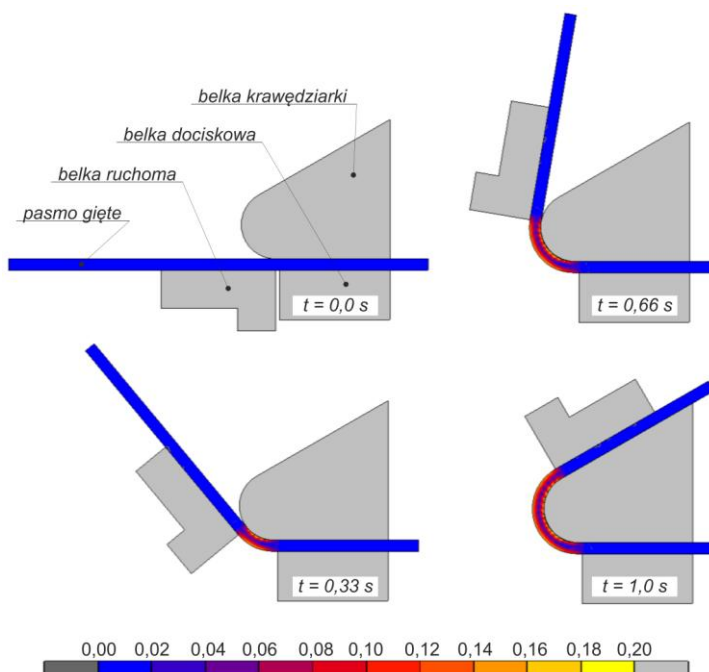


Rys. 4.24. Porównanie sił w procesie zwijania elementów z blachy stalowej (gatunek C15), o wymiarach początkowych 3x50x50 mm

4.5.4. Owijanie

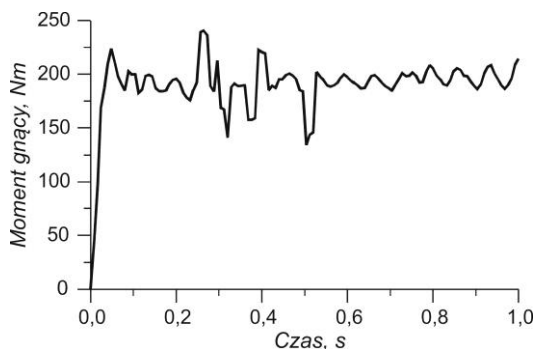
Wspólną cechą procesów owijania (rys. 4.1d-g) jest to, że materiał utwardzony jednym końcem układu się stopniowo na powierzchni narzędzia, przybierając w zarysie jego kształt.

Zagadnienie to dobrze ilustruje przebieg procesu owijania na krawędziarce (pasa blachy o wymiarach 3x100x110 mm), pokazany na rys. 4.25. Obrót belki ruchomej stopniowo rozszerza obszar, w którym metal jest uplastyczniony zachowując



Rys. 4.25. Przebieg procesu owijania na krawędziarce, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w wyrobie giętym, w zależności czasu t

stały rozkład (po grubości blachy) intensywności odkształcenia. Fakt ten powoduje, że moment gnący potrzebny do kontynuowania procesu owijania utrzymywany jest na stałym poziomie – rys. 4.26. Praktycznie może on wzrosnąć znacząco dopiero, gdy belka ruchoma docisnie blachę do belki krawędziarki.

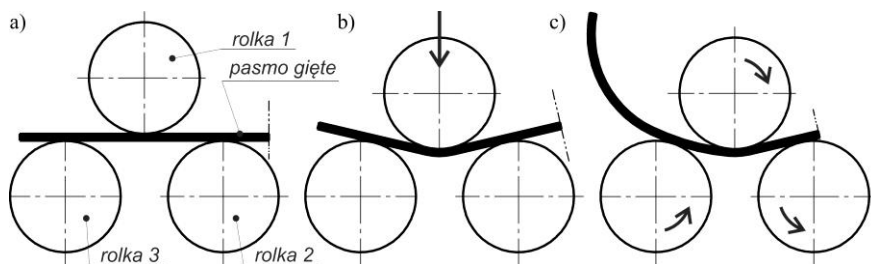


Rys. 4.26. Moment gnący, wywierany przez belkę ruchomą, w procesie owijania na krawędziarce pasa blachy (ze stali C15) o wymiarach 3x100x110 mm

4.5.5. Gięcie za pomocą trzech walców

Stosując trzy walce lub rolki (rys. 4.1h) można giąć blachę o grubości dochodzącej do 50 mm, przy szerokości arkusza do kilku metrów. Metodą tą można również skutecznie giąć kształtowniki i rury.

Poszczególne etapy gięcia pokazane są na rys. 4.27. Przy podniesionej rolce górnej 1 (środkowej) blacha jest wprowadzana pomiędzy rolki (rys. 4.27a). Następnie rolka środkowa jest opuszczana na wysokość, zależną od zastosowanego promienia gięcia. Ruch rolki 1 w dół wywołuje wyginanie blachy (pasma gięte), powodujące uniesienie się do góry jej ramion (rys. 4.27b). Po włączeniu obrotów rolek rozpoczyna się właściwy proces gięcia, gdy blacha jest stopniowo wciągana między rolki i zakrzywiana (rys. 4.27c). Należy tutaj zauważyć, że rolka górna obracająca się przeciwnie do rolek dolnych 2 i 3 jest obciążona największymi siłami, co musi być uwzględnione w konstrukcji giętarki.



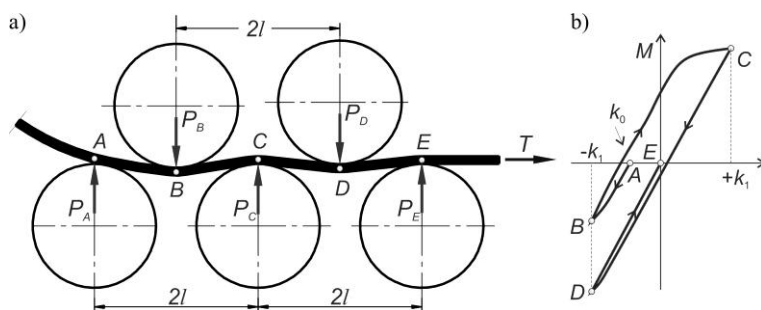
Rys. 4.27. Gięcie pasma blachy za pomocą trzech walców (rolek): a, b, c – kolejne fazy

4.5.6. Prostowanie walcami

Stosując na przemian ułożone względem materiału walce można skutecznie prostować zakrzywione taśmy, płaskowniki czy też pręty. Schemat takiego procesu pokazano na rys. 4.28a. Przechodzący między walcami pas materiału doznaje kolejnych zakrzywień w kierunkach przeciwnych. Jeżeli walce zostaną ustawione w ten sposób, że wartość krzywizny k wywoływana przez nie będzie zbliżona do granicy odkształceń plastycznych, to prosty materiał wejściowy nie dozna żadnych odkształceń trwałych przechodząc między narzędziami i zachowa swą postać pierwotną. Natomiast materiał wstępnie zakrzywiony zostanie wyprostowany [44].

Korzystając z rys. 4.28b można prześledzić proces prostowania taśmy o krzywiznie początkowej $-k_0$, oznaczonej na wykresie moment – krzywizna punktem A. W efekcie przejścia pod walcem B taśma ulega dodatkowemu zakrzywieniu w tym samym kierunku do wartości $-k_1$, określonej przez punkt B na rys. 4.28b. Następnie w wyniku oddziaływania walca C taśma jest zakrzywiana w kierunku przeciwnym do wartości $+k_1$, co powoduje trwałe odkształcenie materiału, gdyż różnica krzywizn (między punktami C i B) przekracza wartość graniczną dla odkształceń czysto sprężystych. Walce czwarty D ponownie nadaje taśmie krzywiznę $-k_1$, jednak odkształcenie to zachodzi niemal całkowicie w zakresie sprężystym (świadczy o tym prosta linia łącząca punkty C i D na wykresie – rys. 4.28b). Ostatecznie pod walcem E moment zginający oraz krzywizna taśmy spadają do zera.

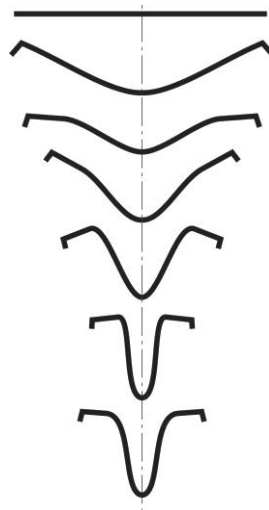
Dla uzyskania dobrego wyprostowania zakrzywionego metalu stosuje się w praktyce 5, 7 a czasem jeszcze większą liczbę walców.



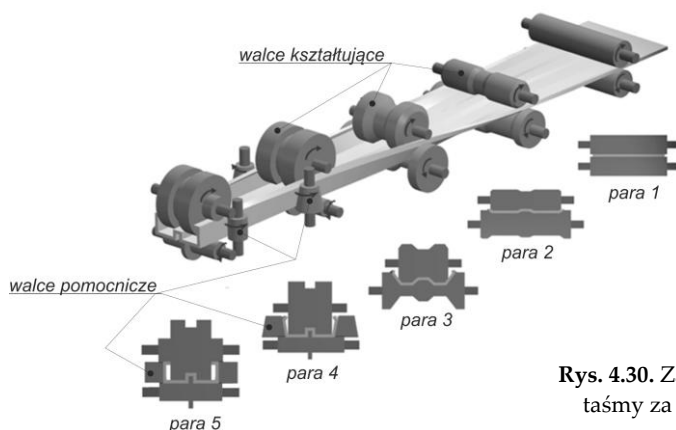
Rys. 4.28. Prostowanie taśmy walcami: a) schemat procesu; b) zależność moment zginający M – krzywizna k [44]

4.5.7. Profilowanie taśm walcami

Jedną ze stosowanych metod produkcji cienkich kształtowników jest ich profilowanie z taśm za pomocą walcowania wzdłużnego. Polega ona na przepuszczaniu taśmy kolejno przez szereg par walców, które stopniowo nadają jej pożądany zarys przekroju poprzecznego (rys. 4.29). Przy złożonym kształcie przekroju liczba par głównych walców kształtujących może dochodzić do kilkunastu, a czasem i więcej. Walce kształtujące na ogół są napędzane i mają osie poziome. Dodatkowo między nimi umieszczane są nie napędzane walce pomocnicze o osiach pionowych, których zadaniem jest doginanie pionowych ścianek kształtownika giętego – rys. 4.30.



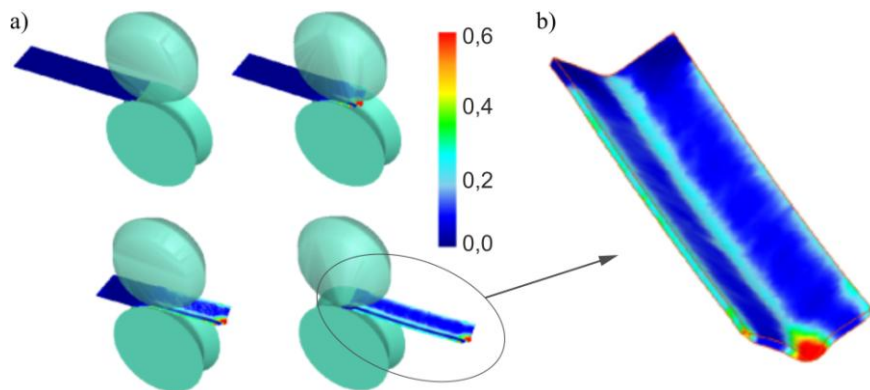
Rys. 4.29. Zmiany zarysu kształtownika uzyskiwanego w kolejnych parach walców [44]



Rys. 4.30. Zaginanie wzdłużne taśmy za pomocą walców

Na kolejnym rys. 4.31a przedstawiono przebieg procesu profilowania taśmy w elementarnym układzie dwóch walców. W wyniku przejścia taśmy między walcami następuje stopniowe zagięcie ramion kątownika połączonych łukiem. W efekcie gięcia taśma doznaje odkształceń w części środkowej (w wyniku oddziaływania wypukłego walca górnego) oraz na brzegach (w efekcie działania wklęsłego walca dolnego), przy czym wartości tych odkształceń są porównywalne – rys. 4.31b. Największe odkształcenia zlokalizowane są w miejscu, w którym doszło do pierwszego kontaktu materiału z walcem górnym. Tamże bo-

wiem wystąpiło lokalne zgniecenie taśmy, a do zainicjowania procesu gięcia konieczne było przyłożenie siły wciskającej taśmę między walce.



Rys. 4.31. Procesu profilowania kształtownika: a) kolejne fazy z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w wyrobie giętym, b) kształtownik po zakończeniu procesu

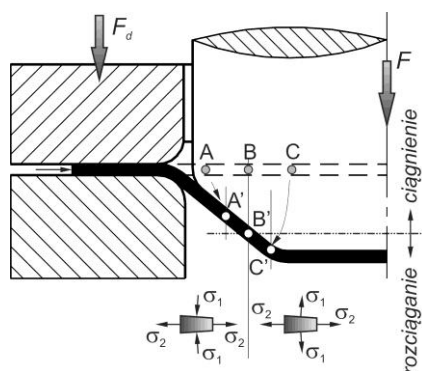
5. Kształtowanie przedmiotów o powierzchni nierozwijalnej

Przekształcenie płaskiego kawałka blachy w element (zwany wytłóczką) o powierzchni nierozwijalnej odbywa się najczęściej przez wytłaczanie. Cechą charakterystyczną wytłoczki jest to, iż nie można jej rozprostować na płaszczyźnie przez rozginanie, bez pocięcia jej na odpowiednie elementy. Na ogół przyjmuje się, że kształtowanie wytłoczek z cienkich blach przebiega w warunkach płaskiego stanu naprężenia, gdyż naprężenie σ_3 działające w kierunku normalnym do powierzchni blachy jest pomijalne ($\sigma_3 \approx 0$). Natomiast pozostałe naprężenia główne (σ_1 i σ_2) działające w płaszczyźnie blachy mogą mieć różne znaki w poszczególnych obszarach wytłoczki.

Rozpatrując klasyczny proces wytłaczania (rys. 5.1) elementu osiowo – symetrycznego, przyjmuje się występowanie dwóch typowych schematów naprężeń – rozgraniczonych linią BB'. I tak w kołnierzowej części wytłoczki (na zewnątrz linii BB') występuje tzw. ciągnięcie, a w części dennej (do wewnątrz od linii BB') – rozciąganie.

Ciągnięcie charakteryzuje się występowaniem naprężeń o znakach różnych. W kierunku obwodowym występują naprężenia ściskające ($\sigma_v = \sigma_1 < 0$), natomiast w kierunku promieniowym – rozciągające ($\sigma_r = \sigma_2 > 0$). W efekcie działania takiego stanu naprężeń materiał przemieszcza się w kierunku osi wytłoczki (np. punkt A $\rightarrow$ A').

Rozciąganie charakteryzuje się występowaniem naprężeń rozciągających zarówno w kierunku promieniowym jak i obwodowym ($\sigma_r = \sigma_2 > 0$, $\sigma_v = \sigma_1 < 0$). Taki stan naprężenia wywołuje oddalanie się materiału od osi wytłoczki (np. punkt C $\rightarrow$ C').



Rys. 5.1. Schemat obrazujący udział ciągnięcia i rozciągania w procesie wytłaczania [18]

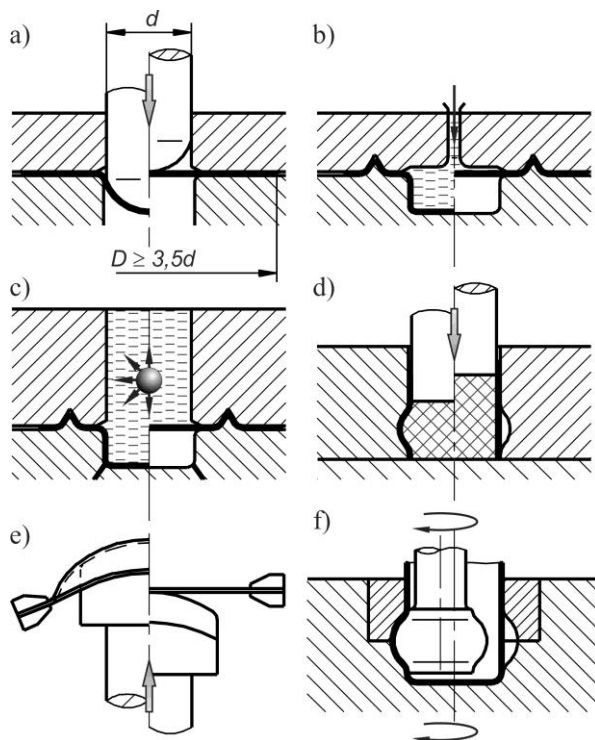
5.1. Kształtowanie wytłoczek przez rozciąganie

Kształtowanie wytłoczek przez rozciąganie ma miejsce podczas wykonywania zagłębień, gdy są one małe w stosunku do rozmiarów blachy lub, gdy obrzeże blachy jest utwardzone. W takim przypadku powierzchnia wytłoczki ulega zwiększeniu kosztem zmniejszenia grubości jej ścianki.

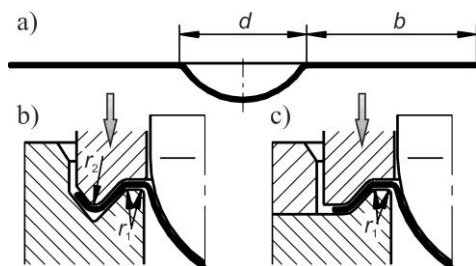
Przedmioty o powierzchni nierozwijalnej można kształtować przez rozciąganie, używając stempla sztywnego (rys. 5.2a), cieczy (rys. 5.2b) lub bardzo dużych mocy (rys. 5.2c). Schemat naprężenia charakteryzujący proces rozciągania występuje także podczas rozpychania (rys. 5.2d), obciągania (rys. 5.2e) oraz wyoblania (rys. 5.2f). We wszystkich przypadkach pokazanych na rysunku 5.2 powierzchnia wytłoczki zwiększa się w efekcie pocienienia jej ścianki.

Warunek utwardzenia obrzeża obszaru rozciąganego, gwarantujący realizację procesu rozciągania może być spełniony na trzy sposoby:

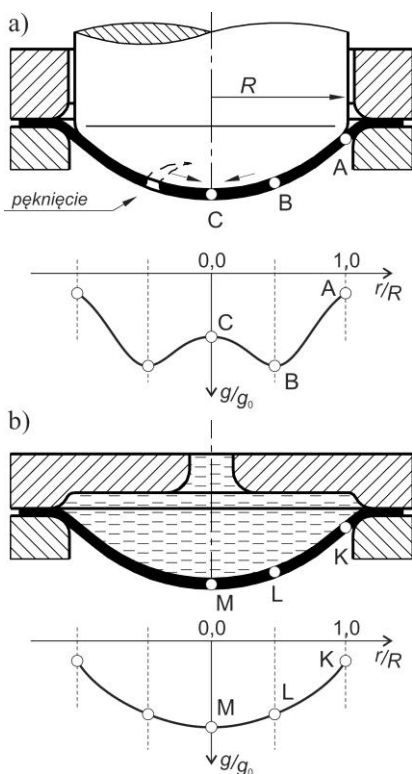
- ❑ przez kształtowanie wypukłości blachy w znacznej odległości od jej krawędzi (średnica kołnierza płaskiego wytłoczki powinna być większa przynajmniej trzy razy od średnicy wypuklenia) – rys. 5.3a;
- ❑ przez kształtowanie wklęsłego dna wytłoczki w końcowej fazie ciągnięcia, gdy ukształtowana wcześniej część zewnętrzna elementu pełni rolę utwardzenia;
- ❑ przez zastosowanie specjalnych progów zaciskowych (rys. 5.3b i c), utwardzających obrzeże w wyniku silnego docięnięcia blachy do matrycy na powierzchni stożkowej kołnierza (promienie zaokrąglenia należy



Rys. 5.2. Sposoby kształtowania wytłoczek przez rozciąganie: a) za pomocą sztywnego stempla, b) za pomocą cieczy, c) za pomocą bardzo dużych mocy, d) rozpychanie, e) obciąganie, f) wyoblanie [18]



Rys. 5.3. Sposoby utwardzania obrzeża podczas rozciągania: a) szeroki kołnierz, b) i c) progi zaciskowe [45]



Rys. 5.4. Rozkłady grubości w wypukleniu kulistym otrzymywanym w procesie rozciągania: a) stemplem sztywnym, b) cieczą [45]

przyjmować jako: na krawędziach wewnętrznych $r_1 > 1,2\rho$, zaś na krawędziach zewnętrznych $r_2 < 0,8\rho$.

5.1.1. Przebieg procesu

Przebieg procesu kształtowania wytłoczek przez rozciąganie jest silnie uzależniony od sił tarcia występujących między stemplem a blachą. W procesie tym metal płynie od środka na zewnątrz, zatem zwiększenie sił tarcia na powierzchni styku metal-stempel powoduje zmniejszenie odkształceń w części środkowej wytłoczki oraz ich zwiększenie w części zewnętrznej.

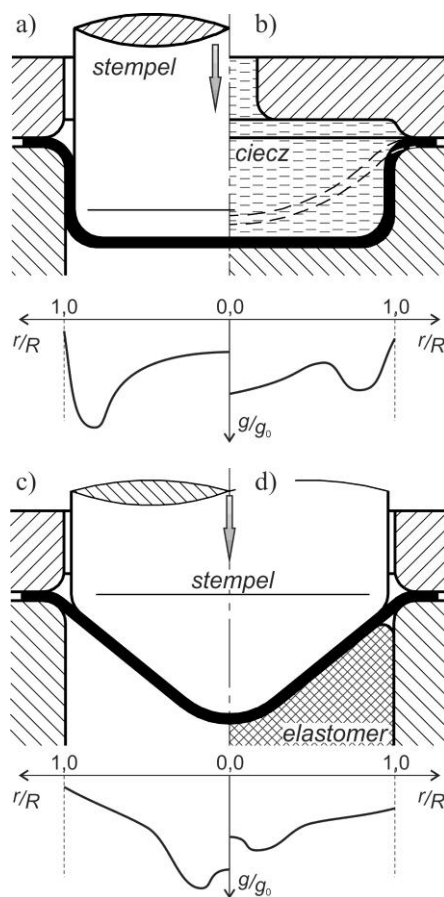
Powyższe spostrzeżenie jest dobrze zilustrowane na rys. 5.4, odnoszącym się do przypadku kształtowania czaszy kulistej. Linia ABC (rys. 5.4a) pokazuje rozkład grubości g/g_0 w wypukleniu wytłoczki. W tym przypadku wskutek tarcia blachy o powierzchnię stempla pocienienie maksymalne blachy występuje nie w jej środku, lecz w punkcie B znajdującym się w pewnej odległości od osi. Tam też należy spodziewać się wystąpienia pęknięcia metalu, w obwodowo biegnącej bruzdzie.

W przypadku kształtowania wytłoczki (o takim samym zarysie) za pomocą ciśnienia cieczy (rys. 5.4b) rozkład ulega zmianie i jest zgodny z linią KLM. W tej sytuacji największe pocienienie elementu występuje w jego osi symetrii (punkt M), gdzie też należy spodziewać się powstania pęknięcia biegnącego promieniowo.

W procesie kształtowania wypuklenia pokazanego na rys. 5.5a tarcie metalu o powierzchnię stempla jest niekorzystne, gdyż utrudnia płynięcie promieniowe metalu z dna wytłoczki. W efekcie zwiększa się odkształcenie w metalu na zewnątrz zaokrąglonej krawędzi stempla, podczas gdy dno wytłoczki jest niemal

nie odkształcone. Potwierdza to rozkład odkształceń (zmian grubości g/g_0) pokazany na dole rysunku 5.5a. Bardziej równomierny rozkład odkształceń w procesie kształtowania omawianego wypuklenia można uzyskać stosując metodę kształtowania ciśnieniem cieczy (rys. 5.5b). W tym przypadku kształtowania największe odkształcenie w fazie początkowej występuje w części środkowej wytłoczki, a w fazie końcowej – głównie na jej brzegu.

Podczas kształtowania wytłoczki o zarysie stożkowym – zgodnym z rys. 5.5c największe pocienienie blachy występuje w wierzchołku stożka. Tam też należy oczekiwać powstania pęknięcia metalu. W tym przypadku tarcie metalu o powierzchnię stempla jest korzystne, gdyż utrudnia płynięcie metalu w kierunku promieniowym (od środka na zewnątrz), co sprzyja osiągnięciu bardziej równomiernego rozkładu odkształceń. Dla spotęgowania tego korzystnego wpływu tarcia, w matrycy umieszcza się poduszkę z elastomeru (rys. 5.5d), dociskającą blachę do powierzchni stempla.



Rys. 5.5. Wpływ warunków rozciągania na rozkłady grubości ścianki [45]

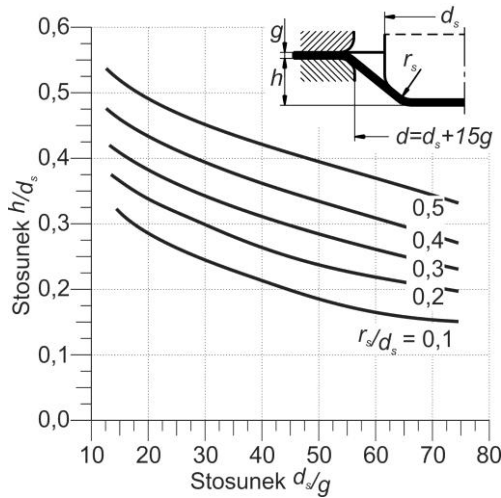
5.1.2. Graniczna wysokość wypuklenia

Wykres pokazany na rys. 5.6 umożliwia wyznaczenie granicznej wysokości h wypuklenia osiowo-symetrycznego, wykonanego metodą rozciągania. Wykres ten dotyczy kształtowania wypuklenia z blachy stalowej charakteryzowanej przez:

- współczynnik anizotropii normalnej $r = 1$;
- wykładnik krzywej umocnienia $n = 0,2$.

W przypadku zastosowania blachy o własnościach bardziej korzystnych (np. $r = 1,25$ i $n = 0,25$) wysokość graniczna wypuklenia zwiększa się o ok. 15÷20%.

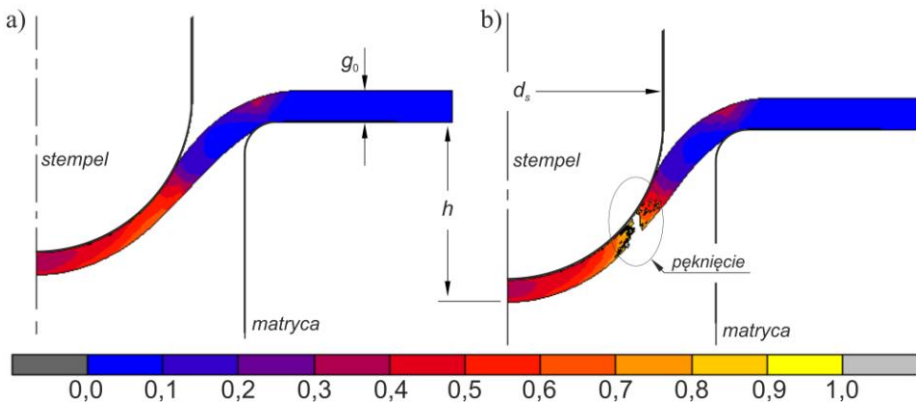
Na podstawie danych zamieszczonych na wykresie 5.6 można stwierdzić, iż wysokość graniczna wypuklenia h wzrasta wraz ze zwiększeniem grubości



Rys. 5.6. Zależność granicznej wysokości wypuklenia h od podstawowych parametrów geometrycznych w procesie rozciągania blachy stalowej, tłocznej [45]

blachy g . Wynika to m.in. ze sposobu wyznaczania granicznej wartości wypuklenia, przyjmowanej zwykle w momencie, gdy siła wywierana przez stempel zaczyna się zmniejszać. Wówczas bruzda jest już częściowo uformowana, a spowodowany jej wystąpieniem przyrost powierzchni (wysokość wypuklenia) jest tym większy, im większa jest grubość blachy.

Graniczną wartość wypuklenia można wyznaczyć stosując metody komputerowego modelowania procesów kształtowania plastycznego metali. Na rys. 5.7 pokazano (obliczony MES) przykład pozwalający na określenie granicznej wysokości wypuklenia kulistego z blachy w gatunku C45, o grubości $g_0 = 3$ mm.



Rys. 5.7. Symulowany MES proces rozciągania blachy stalowej C45, o grubości $g_0 = 3$ mm, stemplem kulistym o średnicy $d_s = 30$ mm, przy $\mu = 0,3$, z zaznaczonym rozkładem odkształcenia: a) wgłębienie maksymalne $h/d_s = 0,52$, b) rozerwanie wytłoczki (obrzeże wsadu utwardzone), gdy przekroczono graniczną wartość h/d_s

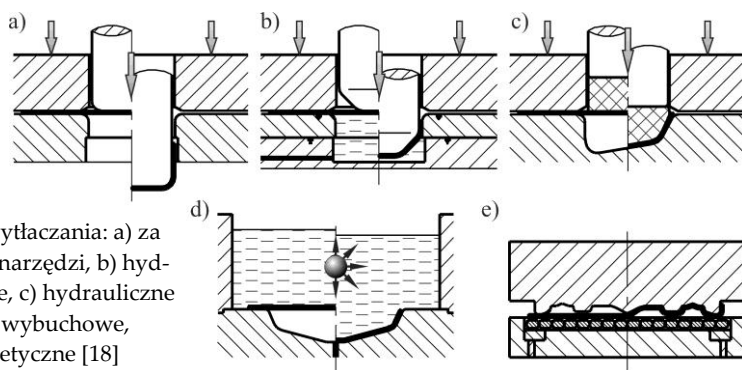
5.2. Kształtowanie wytłoczek przez ciągnięcie

W większości procesów kształtowania obrzeże blachy nie jest utwardzane, w wyniku czego kształtowanie wytłoczek zachodzi z dominującym udziałem

ciągnięcia. Podobnie w procesie przetłaczania polegającym na zwiększeniu wysokości wytłoczki kosztem jej wymiarów poprzecznych, występuje przede wszystkim ciągnięcie.

5.2.1. Wytłaczanie

Proces wytłaczania może być zrealizowany różnymi metodami, z których podstawowe pokazano na rys. 5.8. I tak na rys. 5.8a przedstawiono przetłaczanie za pomocą dwóch narzędzi sztywnych. Należy jednakże zauważyć, że proces wytłaczania można też zrealizować stosując tylko jedno narzędzie sztywne, gdy rolę narzędzia drugiego odgrywa ciecz, guma lub poliuretan. Na rys. 5.8b pokazano schemat kształtowania hydraulicznego zewnętrznego, w którym rolę matrycy odgrywa ciecz zamknięta w naczyniu, którego jedną ze ścian jest blacha wytłaczana. Z kolei przypadek stosowania podczas wytłaczania stempla elastycznego i matrycy sztywnej pokazano na rys. 5.8c. Innym przypadkiem wytłaczania jest kształtowanie za pomocą dużych mocy. Może ono być zrealizowane np. przez działanie impulsu ciśnienia powstałego w wodzie w efekcie detonacji ładunku wybuchowego (rys. 5.8d) lub rozładowania iskrowego baterii kondensatorów. Do tej metody kształtowania można również zaliczyć wytłaczanie za pomocą impulsu pola elektromagnetycznego (rys. 5.8e), powstającego podczas przepływu przez odpowiednio ukształtowaną zwojnicę ładunku elektrycznego uzyskiwanego z rozładowania kondensatorów. Ten proces wytłaczania jest ograniczony jednakże do kształtowania wytłoczek o małej przewodności magnetycznej, a więc wykonywanych z miedzi, aluminium oraz ich stopów.

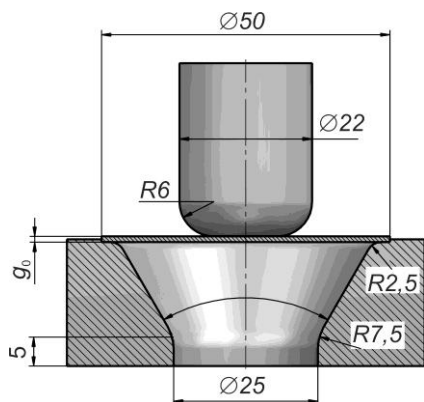


Rys. 5.8. Metody wytłaczania: a) za pomocą sztywnych narzędzi, b) hydrauliczne zewnętrzne, c) hydrauliczne wewnętrzne, d) wybuchowe, e) elektromagnetyczne [18]

Przebieg procesu

Spośród pokazanych na rys. 5.8 metod wytłaczania najczęściej stosuje się wytłaczanie za pomocą dwóch narzędzi sztywnych. Poniżej rozpatrzono przebieg takiego procesu na przykładzie wykonania elementu cylindrycznego – rys. 5.9. Przebieg procesu wytłaczania jest silnie uzależniony od wielkości szczeliny s

(odległość między powierzchnią zewnętrzną stempla i wewnętrzną matrycy) i grubości blachy g_0 . Na rys. 5.10 pokazano jak zmienia się kształt naczynia wytłaczanego narzędziami o wymiarach pokazanych na rysunku 5.9 (tj. przy szczelinie $s = 1,5$ mm), z krążka blachy o grubości $g_0 = 1$ mm i $g_0 = 1,5$ mm. Początkowo wytłaczanie w obu analizowanych przypadkach przebiega w sposób



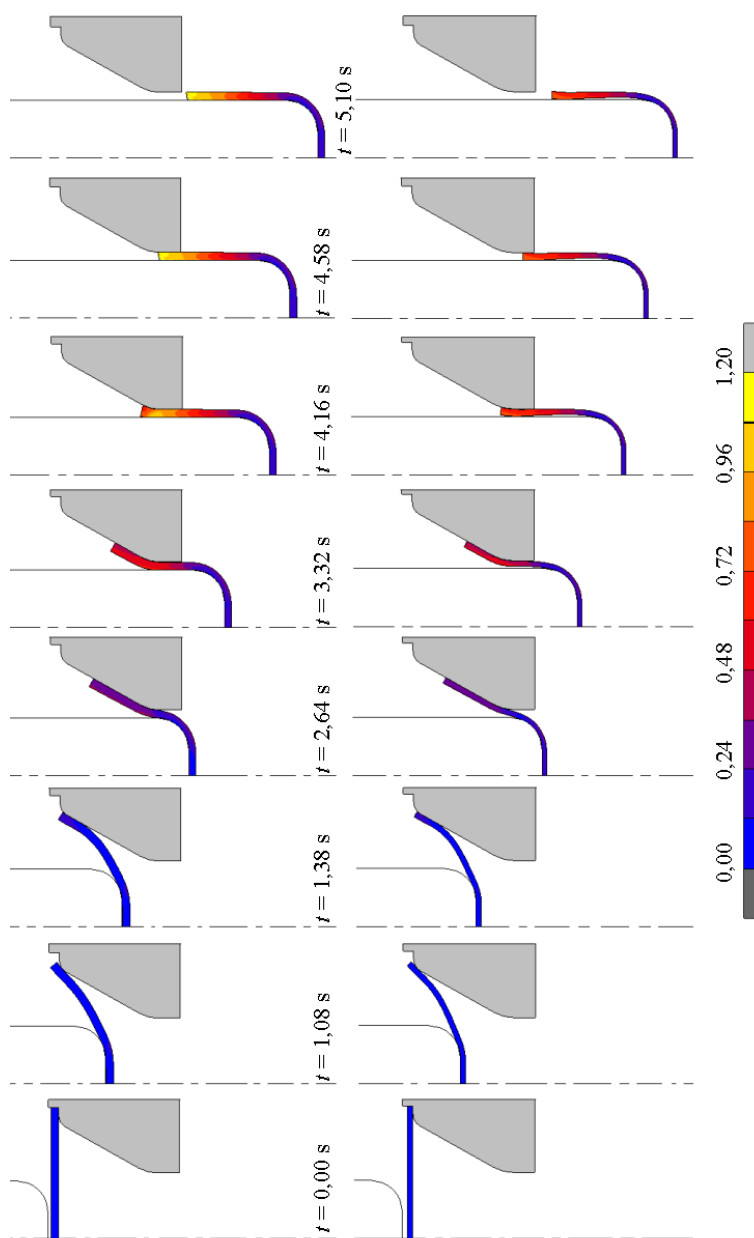
Rys. 5.9. Przykład procesu wytłaczania swobodnego, wykorzystany do analizy płynięcia metalu oraz określenia rozkładu siły działającej na stempel

identyczny – blacha jest wyginana i stopniowo zaczyna przylegać do powierzchni stożkowej pierścienia ciągowego. Różnice pojawiają się w momencie, gdy na materiał zaczyna oddziaływać powierzchnia cylindryczna (kalibrująca) matrycy. Mianowicie w efekcie działania obwodowych naprężeń ściskających blacha ulega pogrubieniu, które zwiększa się wraz z oddalaniem się od osi elementu. Powoduje to, że w przypadku blachy o grubości $g_0 = 1,5$ mm występuje redukcja grubości ścianki bocznej prowadzącej między innymi do wzrostu intensywności odkształcenia.

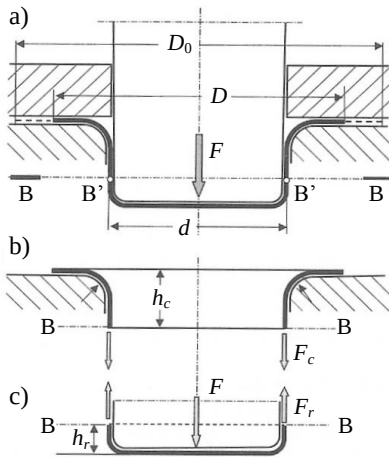
Przebieg procesu wytłaczania zależy od udziału obszarów ciągnięcia i rozciągania w wytłoczce kształtowanej, której przykład pokazano na rys. 5.11. Wytłoczkę tę można podzielić myślowo płaszczyzną BB' na dwie części: górną – ulegającą ciągnięciu oraz dolną, podlegającą rozciąganiu (rys. 5.11b). Wzajemne oddziaływanie na siebie tych części prezentują siły wewnętrzne F_r i F_c , przyłożone do powierzchni podziału. Zgodnie z zasadą akcji i reakcji siły te mają jednakową wartość i kierunek oraz przeciwny zwrot. Załóżmy, że oba obszary wytłoczki mogą odkształcać się niezależnie od siebie w wyniku działania sił osiowych F_c i F_r , przyłożonych do powierzchni podziału

Zależność siły ciągnięcia F_c od wysokości h_c pokazano na wykresie górnym – rys. 5.12. Korzystając z tego wykresu można wskazać siły odpowiadające charakterystycznym fazom wytłaczania. Są to:

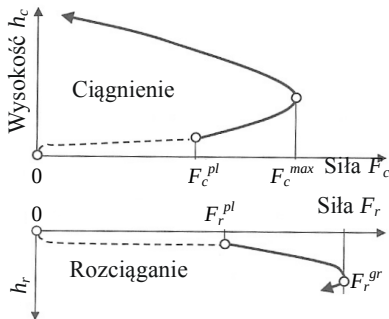
- Siła F_c^{pl} , przy której rozpoczyna się plastyczne płynięcie kołnierza do środka, objawiające się zmniejszeniem średnicy D .
- Siła maksymalna F_c^{max} , występująca w momencie zrównoważenia zmniejszającej się szerokości kołnierza przez jego umocnienie i pogrubienie. Z reguły siła F_c osiąga wartość maksymalną, gdy $D \approx 0,8 D_0$.



Rys. 5.10. Zmiana kształtu wytłoczki w procesie wytłaczania swobodnego, realizowanego zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 5.9, oraz zmiana intensywności odkształcenia w zależności od: grubości g blachy równej 1,5 mm (kolumna z lewej) lub 1,0 mm (kolumna z prawej) oraz czasu t



Rys. 5.11. Obszary kształtowane siłami ciągnienia F_c i rozciągania F_r [45]



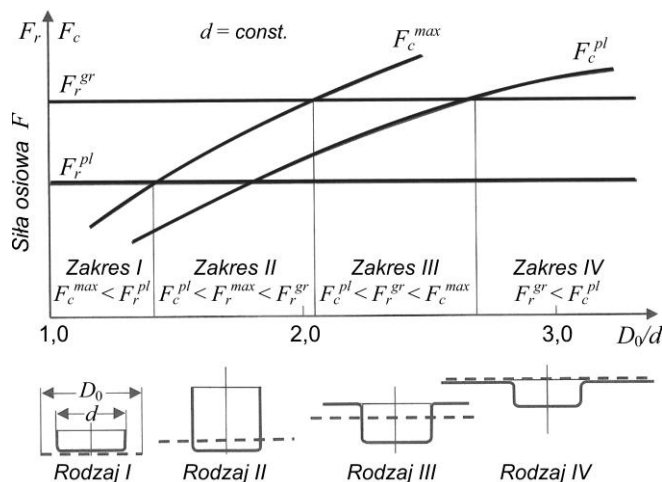
Rys. 5.12. Wykresy sił w zależności od h_c lub h_r [45]

Postępując w sposób analogiczny można prześledzić zmiany siły rozciągania dna F_r , w zależności od wysokości h_r , które przedstawia dolny wykres na rys. 5.12. W tym przypadku można określić następujące, charakterystyczne wartości siły rozciągania F_r :

- Siłę F_r^{pl} uplastyczniającą dno wytłoczki, która występuje na początku rozciągania, gdy grubość dna g zaczyna się zmniejszać.
- Siłę graniczną F_r^{gr} doprowadzającą do rozerwania uprzednio ukształtowanej walcowej ścianki wytłoczki.

W każdej fazie procesu wytłaczania musi być spełniony warunek równowagi sił wewnętrznych $F_c = F_r$, wiążący ze sobą procesy ciągnienia i rozciągania. Konsekwencje wynikające ze spełnienia tego warunku można prześledzić korzystając z wykresu sił F_c^{pl} i F_c^{max} uzależnionych od stosunku D_0/d , pokazanym na rys. 5.13. W zależności od uszeregowania wymienionych sił według ich wartości wyróżnia się następujące, charakterystyczne zakresy:

- Zakres I, w którym maksymalna siła ciągnienia kołnierza jest mniejsza od siły uplastyczniającej dno – tj. $F_c^{max} < F_r^{pl}$. W tym przypadku wytłoczka jest kształtowana wyłącznie przez ciągnienie kołnierza, a grubość jej dna nie ulega zmianie ($g = g_0$). Sytuacja taka ma miejsce przy kształtowaniu wytłoczek o małej wysokości h , czyli wtedy, gdy stosunek wymiarów D_0/d jest niewiele większy od jedności.
- Zakres II, w którym maksymalna siła ciągnienia kołnierza jest większa od siły powodującej uplastycznienie dna, ale jednocześnie jest mniejsza od siły granicznej wywołującej rozerwanie wytłoczki ($F_r^{pl} < F_c^{max} < F_r^{gr}$). W tej sytuacji podczas kształtowania wytłoczki występują oba procesy (ciągnienie i rozciąganie). Możliwe jest wciągnięcie całego kołnierza do otworu matrycy, przy czym grubość dna ulega zmniejszeniu ($g < g_0$).
- Zakres III, w którym maksymalna siła ciągnienia kołnierza jest większa od wytrzymałości ścianek wytłoczki na rozciąganie ($F_c^{max} > F_r^{gr}$). W tym przy-

Rys. 5.13. Przebiegi kształtowania wytłoczki w zależności od stosunku D_0/d [45]

padku, aby nie dopuścić do rozerwania wytłoczki (oderwania denka) proces kształtowania należy przerwać w chwili, gdy $F_c < F_r^{gr}$, a więc gdy część kołnierza pozostaje na powierzchni matrycy. Ten rodzaj wytłaczania umożliwia wyłącznie kształtowanie wytłoczek z kołnierzem o średnicy $D > 0,8 D_0$.

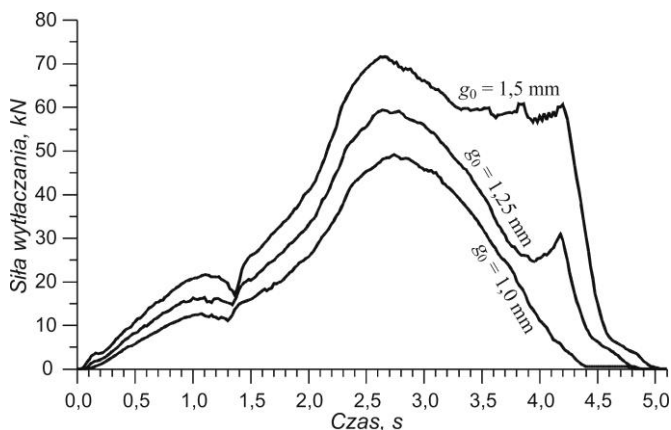
- ❑ Zakres IV, w którym siła uplastyczniająca kołnierz jest większa od siły powodującej oderwanie dna ($F_r^{gr} < F_c^{pl}$). Wytłoczka kształtowana jest wyłącznie przez rozciąganie dna, które przebiega przy nie zmienionej średnicy kołnierza ($D = D_0$).

Wymienionym powyżej czterem zakresom stosunku wymiarów D_0/d odpowiadają cztery rodzaje wytłoczek – rys. 5.13. Są to:

- ❑ Rodzaj I – wytłoczki o ściankach walcowych (bez kołnierza), kształtowane wyłącznie przez ciągnięcie, których grubość dna jest stała ($g = g_0$).
- ❑ Rodzaj II – wytłoczki o ściankach walcowych kształtowanych głównie przez ciągnięcie, przy niewielkim rozciągnięciu dna ($g < g_0$).
- ❑ Rodzaj III – płytkie wytłoczki z kołnierzem płaskim, kształtowane głównie przez rozciąganie dna, przy niewielkim udziale ciągnięcia ($D < D_0$, $g < g_0$).
- ❑ Rodzaj IV – wytłoczki uzyskiwane przez rozciąganie środkowej części krążka, którego średnica zewnętrzna nie ulega zmianie ($D = D_0$).

Siła i praca wytłaczania

Przebieg siły w procesie wytłaczania jest silnie uzależniony od relacji szczelina s – grubość blachy g_0 . Na rys. 5.14 pokazano, obliczone numerycznie, rozkłady sił działających na stempel w procesie kształtowania wytłoczek z blachy o grubości $g_0 = 1,0; 1,25$ i $1,5$ mm, narzędziami pokazanymi na rys. 5.9. Z danych zamieszczonych na rys. 5.14 wynika, że zwiększenie grubości blachy powoduje



Rys. 5.14. Siły w procesie wytłaczania swobodnego realizowanego zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 5.9

nie tylko wzrost siły wytłaczania, ale także zmienia charakter przebiegu siły. I tak początkowo we wszystkich trzech przypadkach siła stopniowo rośnie i przyjmuje wartość maksymalną w momencie, gdy metal zaczyna przywierać do powierzchni stożkowej matrycy ($t \approx 2,64$ s). Następnie siła wytłaczania maleje w efekcie zmniejszania powierzchni styku metal – narzędzie, na której działają siły tarcia przeciwdziałające wytłaczaniu. W przypadku, gdy szczelina s jest mniejsza od grubości blachy g ($s < g$) podczas wytłaczania dochodzi do redukcji grubości ścianki, przejawiającej się m.in. miejscowym zwiększeniem siły wytłaczania (rys. 5.14).

Maksymalną siłę w procesie wytłaczania można oszacować stosując następującą zależność:

$$F_{\max} = \frac{k}{\eta} \left[\pi d g_0 \sigma_p^0 \left(\ln \frac{D}{d} + \frac{g}{2\rho} \right) + 2\mu \frac{d}{D} F_{\text{doc}} \right], \quad (5.1)$$

gdzie: d – średnica walcowa naczynia wytłaczanego, D – średnica krążka wyjściowego, g_0 – grubość początkowa krążka blachy, $\rho = r_m + g/2$ – krzywizna warstwy środkowej blachy na krawędzi matrycy, k – współczynnik określony z rys. 5.15, σ_p^0 – naprężenie uplastyczniające metalu tłoczonego, F_d – siła docisku, η – współczynnik sprawności procesu, który zgodnie z [44] można szacować jako:

$$\eta = 1 - \mu\alpha, \quad (5.2)$$

gdzie: α – kąt opasania narzędzia przez blachę wytłaczaną.

Znając maksymalną wartość nacisku stempla $F_{\max}$ oraz jego skok roboczy $s_r = h + r_m$ można obliczyć pracę wytłaczania W_w . W tym celu wykorzystuje się zależność:

$$W_w = \lambda F_{\max} s, \quad (5.3)$$

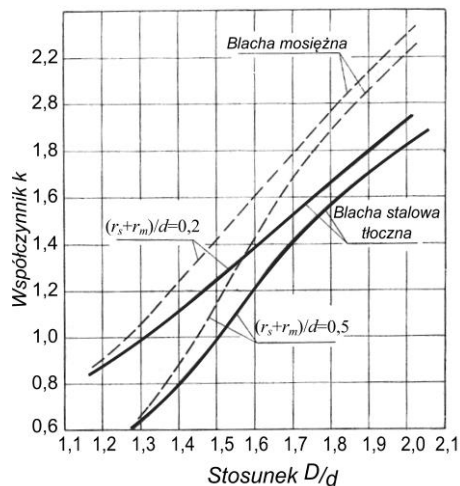
w której przez λ oznaczono współczynnik wypełnienia wykresu siła – droga, przyjmujący wartość w granicach $\lambda = 0,6 \div 0,7$.

Zjawiska ograniczające

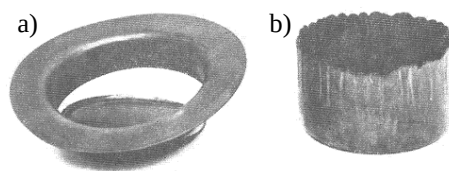
Stabilny przebieg procesu wytłaczania może być zakłócony w efekcie wystąpienia dwóch zjawisk ograniczających, to jest (rys. 5.16):

- pęknięcia obwodowego ścianki,
- fałdowania kołnierza.

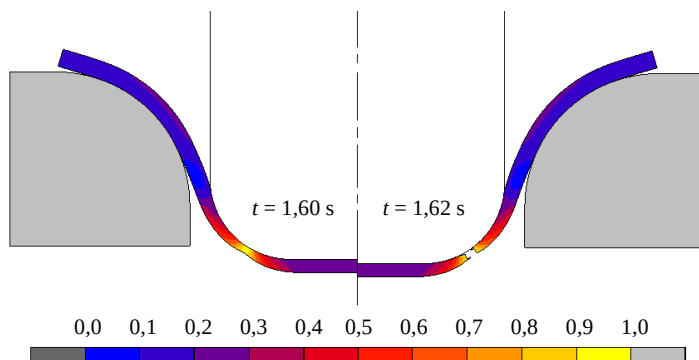
Pęknięcie obwodowe ścianki występuje w pobliżu dna wytłoczki. W tym miejscu wytłoczka ma najmniejszą grubość i jest tylko nieznacznie umocniona. Ponadto, występuje tam stan odkształceń zbliżony do płaskiego, przy którym odkształcenia graniczne osiągają wartości najmniejsze [18]. Pęknięcie obwodowe ścianki wytłoczki poprzedzone jest wystąpieniem lokalnego pocienienia ścianki (rys. 5.17), w sposób analogiczny do przewężenia obserwowanego w próbie jednoosiowego rozciągania.



Rys. 5.15. Zależność współczynnika k od stosunku średnic: krążka wyjściowego D i walcowej części wytłaczanego naczynia d [44]



Rys. 5.16. Zjawiska ograniczające proces wytłaczania: a) pęknięcie obwodowe ścianki, b) fałdowanie kołnierza [18]



Rys. 5.17. Pęknięcie obwodowe ścianki w procesie wytłaczania swobodnego (przy czasie t podanym na rysunku) oraz rozkład intensywności odkształcenia w wytłoczce

W celu niedopuszczenia do pęknięcia ścianki proces wytłaczania należy realizować przy sile tłoczenia mniejszej od siły zrywającej F_r^{gr} . Jak wynika z rys. 5.13 zależność ta jest spełniona wtedy, gdy stosunek średnicy krążka D do średnicy wytłoczki d jest mniejszy od wartości granicznej, co na ogół zapisuje się jako

$$\frac{d}{D} = m_1 < \left(\frac{d}{D} \right)_{gr}, \quad (5.4)$$

gdzie: m_1 – współczynnik wytłaczania.

W celu uniknięcia pęknięcia obwodowego elementu w procesie wytłaczania należy dążyć do: zmniejszenia maksymalnej siły ciągnięcia F_c^{max} oraz zwiększenia siły zrywającej F_r^{gr} . Zmniejszenie siły F_c^{max} można osiągnąć przez:

- ❑ zaokrąglenie krawędzi matrycy (pierscienia ciągowego) możliwie dużym promieniem $r_m > (5 \div 10)g$, przez co zmniejsza się pracę gięcia plastycznego blachy związaną głównie z podwójną zmianą krzywizny na tej krawędzi;
- ❑ zmniejszanie oporów tarcia między blachą a powierzchnią roboczą matrycy i dociskacza przez ich staranne wypolerowanie i smarowanie;
- ❑ ograniczenie do niezbędnego minimum nacisków wywieranych przez dociskacz.

Z kolei zwiększenie siły zrywającej F_r^{gr} można osiągnąć przez:

- ❑ wykonanie możliwie dużych promieni zaokrąglenia krawędzi stempla $r_s = (4 \div 6)g$;
- ❑ zwiększenie tarcia między stemplem i blachą kształtowaną, powodującego odciążenie niebezpiecznego przekroju wytłoczki.

Proces wytłaczania przy zachowaniu możliwie optymalnych warunków można zrealizować przyjmując najmniejsze wartości współczynnika wytłaczania m_1 , zestawione w tabeli 5.1. Wartości m_1 są tym większe im mniejsza jest tzw. względna grubość krążka ($100\% \cdot g/D$). Oznacza to, że kształtowanie metodą wytłaczania krążków cienkich jest trudniejsze niż w przypadku krążków grubych. Należy również zauważyć, iż wartości graniczne współczynnika wytłaczania m_1 nie zależą od rodzaju materiału kształtowanego.

Tabela 5.1.

Najmniejsze dopuszczalne wartości współczynnika wytłaczania m_1 dla naczyń cylindrycznych bez kołnierza

Grubość względna krążka 100% g/D	2,00	1,50	1,00	0,50	0,20	0,06
Współczynnik wytłaczania m_1	0,46	0,50	0,53	0,56	0,58	0,60

Drugim ograniczeniem utrudniającym wykonanie poprawnej wytłoczki jest zjawisko fałdowania kołnierza. Jest ono pewną formą plastycznego wyboczenia blachy, zachodzącego głównie pod wpływem ściskających naprężeń obwodowych, szczególnie wtedy gdy grubość blachy g jest mała w stosunku do średnicy D krążka odkształcanego. Przebieg tworzenia pofałdowania w procesie wytłaczania można prześledzić korzystając z rysunku 5.18.

Najprostszym sposobem zapobiegania tworzeniu pofałdowania jest stosowanie dodatkowego pierścienia dociskającego blachę do powierzchni matrycy (rys. 5.8) z pewną siłą F_d , a więc prowadzenie wytłaczania z dociskaczem. Na rys. 5.19 przedstawiono przebieg procesu wytłaczania, w którym dzięki zastosowaniu dociskacza uniknięto fałdowania kołnierza w sposób pokazany na rys. 5.18. W obu przypadkach kształtowania przyjmowano identyczne parametry procesu.

Należy zauważyć, iż stosowanie dociskacza powoduje pojawienie się dodatkowych oporów wytłaczania, wywołanych siłami tarcia powstającymi między kołnierzem a pierścieniem ciągowym i dociskaczem. Z tego powodu dociskacz należy stosować tylko wtedy, gdy jest to konieczne. Na ogół dociskacz stosuje się, gdy spełniony jest następujący warunek:

$$\frac{g}{D} \cdot 100 \leq 5(1 - m_1), \quad (5.5)$$

gdzie: m_1 – współczynnik wytłaczania.

W przypadku stosowania dociskacza istotny jest poprawny dobór siły dociskającej, która nie może być zbyt mała gdyż wówczas dociskacz nie spełnia swego zadania. Z drugiej strony stosowanie zbyt dużych sił na dociskaczu może prowadzić do nadmiernego wzrostu siły tłoczenia i w konsekwencji do pęknięcia wytłoczki.

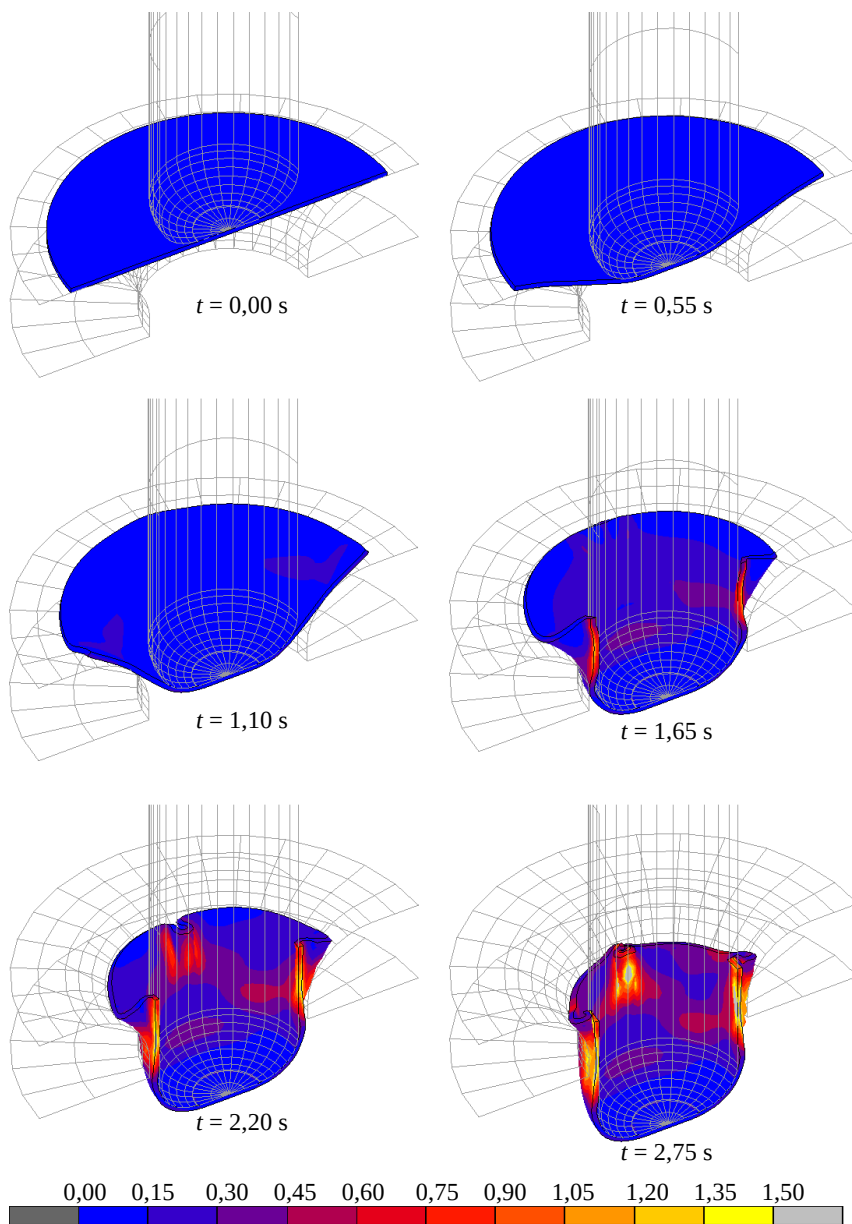
Siłę wywieraną przez dociskacz oblicza się korzystając ze wzoru

$$F_d = S_d q = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d_m + 2r_m)^2] q, \quad (5.6)$$

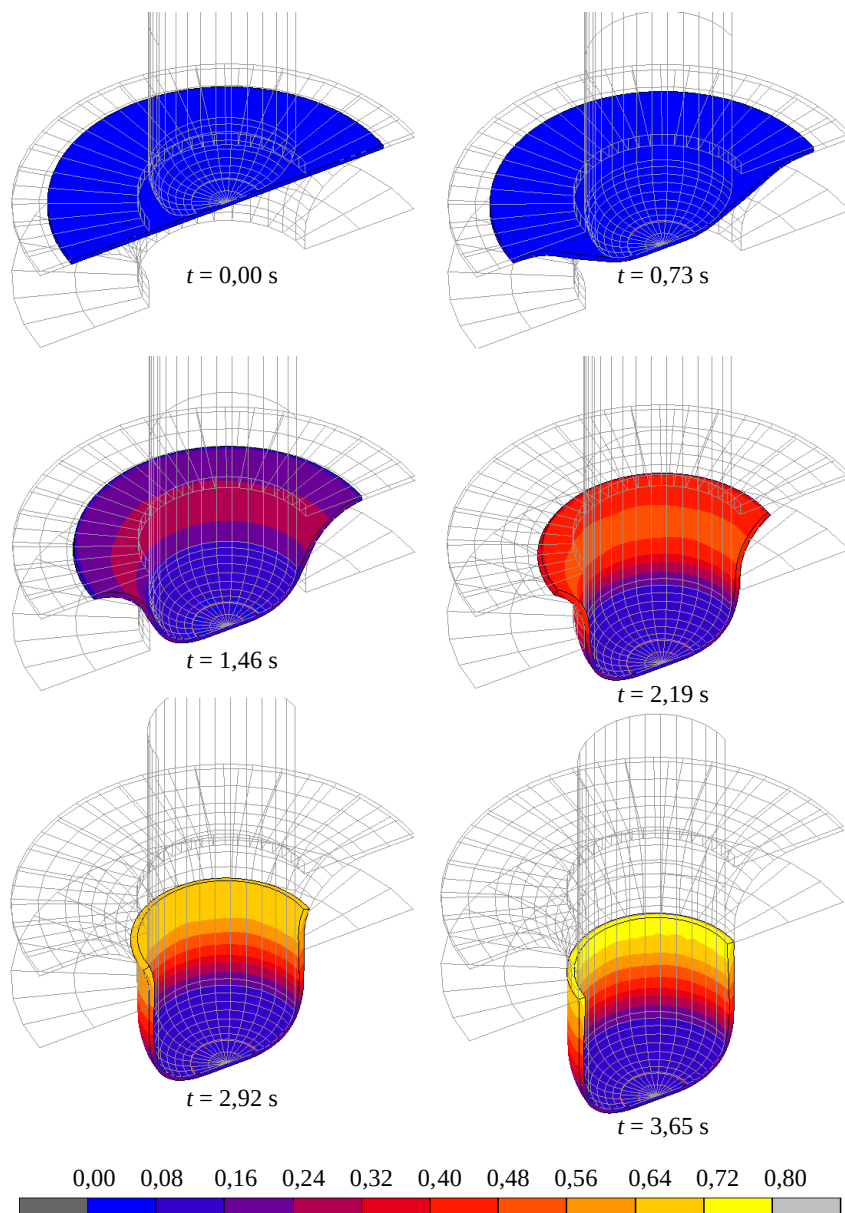
gdzie: S_d – powierzchnia, na którą działa dociskacz, q – nacisk jednostkowy zależny od rodzaju materiału i jego grubości, r_m – promień zaokrąglenia krawędzi matrycy, d_m – średnica otworu matrycy.

Naciski jednostkowe wywierane przez dociskacz należy wyznaczać doświadczalnie lub dobierać z poradników. Stosowane zwykle wartości nacisków jednostkowych q zestawiono w tabeli 5.2. W przypadku kształtowania wytłoczek ze stali miękkiej nacisk q można obliczyć stosując następującą zależność:

$$q \approx 0,02 \left(\frac{1}{m_1} - 1,2 \right) \frac{D_0}{g_0} \text{ [MPa]}. \quad (5.7)$$



Rys. 5.18. Faldowanie kołnierza z zaznaczoną intensywnością odkształcenia w procesie wytłaczania wytłoczki z blachy w gatunku C45, o grubości $g=0,75 \text{ mm}$, przy czasie t podanym na rysunku



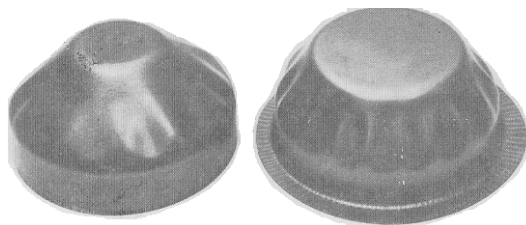
Rys. 5.19. Zmiana kształtu wytłoczki z zaznaczoną intensywnością odkształcenia w procesie wytłaczania z dociskaczem wytłoczki z blachy w gatunku C45, o grubości $g = 0,75 \text{ mm}$, przy czasie t podanym na rysunku

Tabela 5.2.

Naciski jednostkowe wywierane przez dociskacz

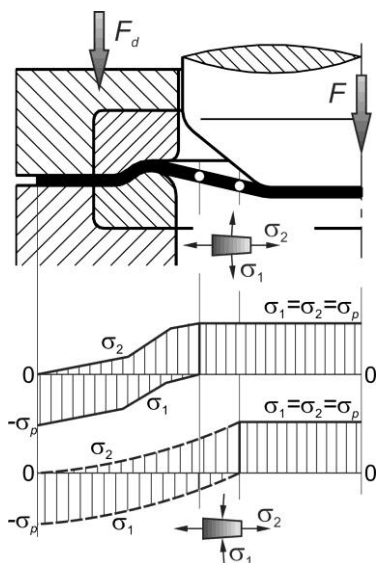
Materiał	Stal miękka $g < 0,5$ mm	Stal miękka $g > 0,5$ mm	Mosiądz	Miedź	Aluminium	Brąz
Nacisk [MPa]	2,5÷3,0	1,5÷2,5	1,5÷2,5	1,0÷1,5	0,7÷1,2	2,0÷2,5

Zastosowanie dociskacza zapobiega jedynie tworzeniu się fałd na płaskim kołnierzu wytłoczki. Przy kształtach wytłoczek innych niż cylindryczne, fałdy mogą powstawać poza kołnierzem, a więc w obszarach swobodnych. Ma to miejsce przede wszystkim przy kształtowaniu wytłoczek typu karoseryjnego oraz naczyń cienkościennych o kształcie stożków ściętych (rys. 5.20), paraboloid



Rys. 5.20. Fałdy utworzone poza kołnierzem, w obszarze swobodnym [18]

obrotowych itp. Przyczyną powstawania pofałdowań tego typu są zbyt duże naprężenia ściskające, działające w kierunku obwodowym. Naprężenia te można zmniejszyć lub wręcz usunąć przez zwiększenie promieniowych naprężeń rozciągających. W tym celu w procesach wytłaczania stosuje się żebra lub progi ciągowo-



Rys. 5.21. Zasada działania progu ciągowego w procesie wytłaczania

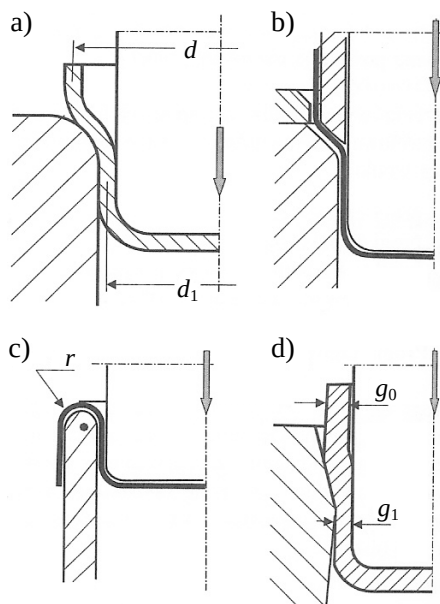
Przykład wpływu progu ciągowego na stan naprężenia występujący w procesie kształtowania wytłoczki stożkowej pokazano na rys. 5.21. Przedstawione na tym rysunku rozkłady naprężeń obwodowych σ_1 i promieniowych σ_2 dotyczą materiału idealnie plastycznego i warunku plastyczności określonego równaniem $\sigma_p = \sigma_1 - \sigma_2$. Linią ciągłą przedstawiono rozkłady naprężeń w początkowej fazie procesu wytłaczania z progiem ciągowym. Natomiast linią przerywaną pokazano jak naprężenia te zmieniają się w procesie wytłaczania w matrycy płaskiej z wykorzystaniem dociskacza. Jak widać z danych zamieszczonych na rys. 5.21 wprowadzenie progu ciągowego zmniejsza obszar występowania niekorzystnych, obwo-

dowych naprężeń ściskających. Zatem dobór właściwego kształtu progu ciągowego oraz siły dociskacza F_d umożliwia wykonanie wytłoczki bez fałd.

5.2.2. Przetłaczanie

W operacji wytłaczania można uzyskiwać wytłoczki, których wysokość h nie przekracza ok. $0,75 \div 0,85$ ich średnicy d . W celu uzyskania wytłoczek o większej wysokości konieczne jest zastosowanie dodatkowej operacji kształtowania, zwanej przetłaczaniem.

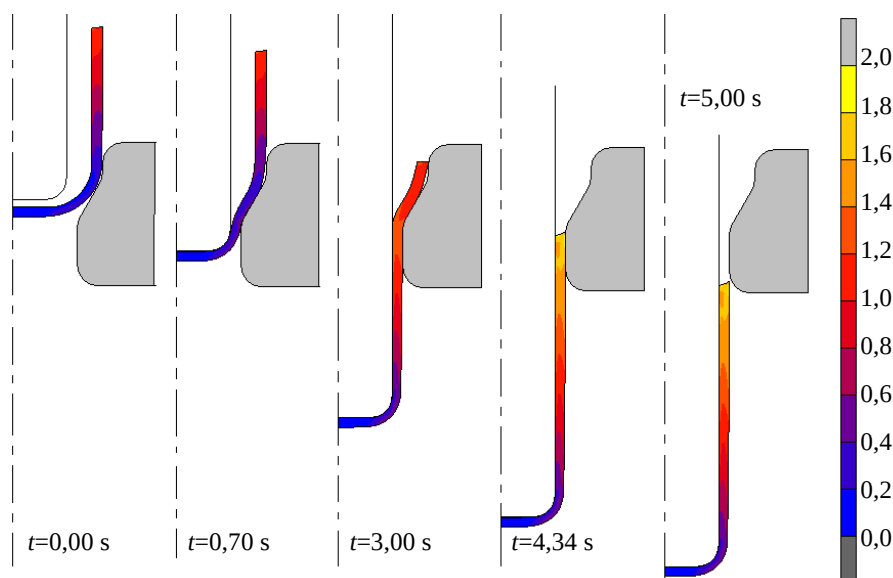
Najczęściej zwiększenie wysokości wytłoczki h uzyskuje się kosztem zmniejszenia jej średnicy. W przypadku, gdy grubość blachy jest dostatecznie duża (w porównaniu ze średnicą wytłoczki d), to pofałdowanie blachy nie występuje i przetłaczanie przebiega w sposób pokazany na rys. 5.22a. Natomiast przy małej grubości ścianki g należy stosować tuleję dociskową (rys. 5.22b), w celu niedopuszczenia do tworzenia się fałd. Inny często stosowany sposób przetłaczania polega na przewijaniu walcowej ścianki wytłoczki przez tuleję ciągową, w sposób pokazany na rys. 5.22c. W operacji tej ma miejsce nicowanie wytłoczki, w efekcie czego jej powierzchnia zewnętrzna przekształca się w wewnętrzną. Ten sposób przetłaczania stosuje się wtedy, gdy promień r jest nie mniejszy od czterokrotnej grubości ścianki wytłoczki g . Osobną grupę stanowią operacje wyciągania, w których zwiększenie wysokości wytłoczki następuje w efekcie zmniejszenia grubości jej ścianki walcowej – rys. 5.22d. W operacji tej dominuje promieniowe ściskanie metalu, wywołane naciskiem powierzchni roboczych matrycy i stempla, któremu towarzyszy rozciąganie osiowe, powodowane naciskiem stempla na dno wytłoczki.



Rys. 5.22. Sposoby przetłaczania:
a) swobodne; b) z dociskaczem,
c) przewijanie, d) wyciąganie [45]

Przebieg procesu

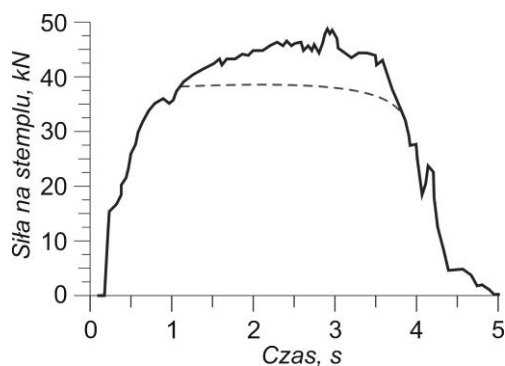
Przebieg przetłaczania zostanie rozpatrzony na przykładzie wykonania wytłoczki cylindrycznej – rys. 5.23. W efekcie nacisku wywieranego przez stempel na dno wytłoczki jego swobodna część przechodząc przez stożek matrycy stopniowo przekształca się w ściankę pionową. Przebieg kształtowania dna jest



Rys. 5.23. Zmiana kształtu wytłoczki oraz intensywności odkształcenia w procesie przetłaczania swobodnego w zależności od czasu t

zbliżony do procesu wytłaczania. Następnie przez stożek matrycy przechodzi cylindryczna część wytłoczki, której średnica ulega zmniejszeniu. Kształtowanie w tej fazie przebiega w sposób charakterystyczny dla procesów ciągnięcia.

Na rys. 5.24 pokazano przebieg siły w procesie przetłaczania wytłoczki. Na początku procesu występuje szybki wzrost siły. Po ustaleniu warunków geometrycznych procesu siła powinna być stała (linia przerywana na wykresie). Jednakże w rzeczywistości obserwowany jest pewien jej wzrost, który jest powodowany m.in. niejednorodną grubością ścianki wytłoczki. Grubość ta jest najmniejsza w pobliżu dna, a największa na obrzeżu wytłoczki. Wartość maksymalna siły przetłaczania występuje pod koniec procesu, gdy w szczelinę wchodzi ścianka wytłoczki o największej grubości. Następnie obserwowany jest nagły spadek siły do wartości potrzebnej do pokonania oporów tarcia obrzeża wytłoczki o powierzchnię cylindryczną matrycy.

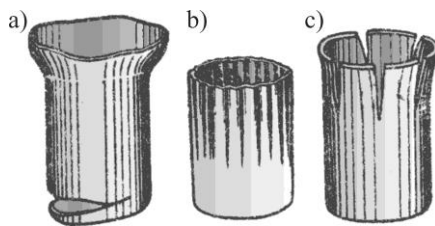


Rys. 5.24. Rozkład siły działającej na stempel w procesie przetłaczania wytłoczki stalowej (z rys. 5.10 – kolumna lewa), którego przebieg pokazano na rys. 5.23; linia przerywana pokazuje przebieg teoretyczny

Zjawiska ograniczające

Przebieg procesu przetłaczania może być zakłócony wystąpieniem następujących zjawisk:

- ❑ obwodowego rozdzielenia wytłoczki w pobliżu jej dna (rys. 5.25a), następującego w efekcie przekroczenia wytrzymałości ścianki bocznej;
- ❑ fałdowania ścianki wytłoczki (rys. 5.25b) wywołanego działaniem obwodowych naprężeń ściskających;
- ❑ pęknięcia wzdłużnego ścianek przy obrzeżu wytłoczki (rys. 5.25c), w następstwie nadmiernego umocnienia materiału i niekorzystnego działania naprężeń własnych.



Rys. 5.25. Rodzaje uszkodzeń elementów przetłaczanych: a) pęknięcie obwodowe ścianki bocznej, b) pofałdowanie ścianki bocznej, c) pęknięcie wzdłużne ścianki bocznej [18]

Wymienione powyżej zjawiska ograniczają zakres stosowania operacji przetłaczania, jednakże można im przynajmniej w pewnym zakresie przeciwdziałać. Aby uniknąć podczas przetłaczania pęknięcia obwodowego wytłoczki, należy tak prowadzić proces, by maksymalna siła przetłaczania F_{max} była zawsze mniejsza od siły zrywającej:

$$F_{max} < F_r. \quad (5.8)$$

Warunek ten jest spełniony wówczas, gdy stosunek średnic d_2/d_1 , zwany także współczynnikiem przetłaczania m_2 , będzie większy od pewnej wartości granicznej $(d_2/d_1)_{gr}$. Powtarzając wielokrotnie operację przetłaczania można stopniowo zmniejszać średnicę wytłoczki, która po kolejnych ciągach będzie równa $d_2, d_3, \dots, d_{n-1}, d_n$. Jednakże w każdej z tych operacji musi być spełniony warunek:

$$m_i = \frac{d_i}{d_{i-1}} > \left(\frac{d_i}{d_{i-1}} \right)_{gr}. \quad (5.9)$$

Wartości współczynnika m_i dla kolejnych operacji przetłaczania ulegają zwiększeniu, co jest następstwem zwiększającego się umacniania materiału w ścianach wytłoczki, przy niemal niezmiennych własnościach metalu w okolicy dna. Najmniejsze dopuszczalne wartości współczynników przetłaczania m_i , w zależności od grubości blachy, zestawiono w tabeli 5.3. Należy pamiętać o tym, że podane w tej tabeli wartości m_i odnoszą się do kolejnych operacji przetłaczania, prowadzonych bez stosowania wyżarzania rekrytalizującego. W przypadku zastosowania wyżarzania usuwającego skutki zgniotu w metalu, w kolejnej operacji przetłaczania dobór współczynnika ponownie rozpoczyna się od m_2 .

Tabela 5.3.

Najmniejsze dopuszczalne wartości współczynników przetłaczania dla kolejnych operacji, w zależności od względnej grubości krążka

Oznaczenie współczynnika przetłaczania	Względna grubość krążka 100% (g/D)					
	2,00	1,50	1,00	0,50	0,20	0,06
$m_2 = d_2/d_1$	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80
$m_3 = d_3/d_2$	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82
$m_4 = d_4/d_3$	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
$m_5 = d_5/d_4$	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86

Drugie ograniczenie, tj. fałdowanie, występuje wtedy, gdy pomimo spełnienia warunku (5.9) wartość stosunku grubości ścianki wytłoczki do jej średnicy jest zbyt mała. Występuje wtedy zjawisko wyboczenia blachy, następujące w efekcie zbyt dużych naprężeń ściskających. Przyjmuje się, że fałdowanie w procesie przetłaczania nie wystąpi w przypadku spełnienia następującej zależności:

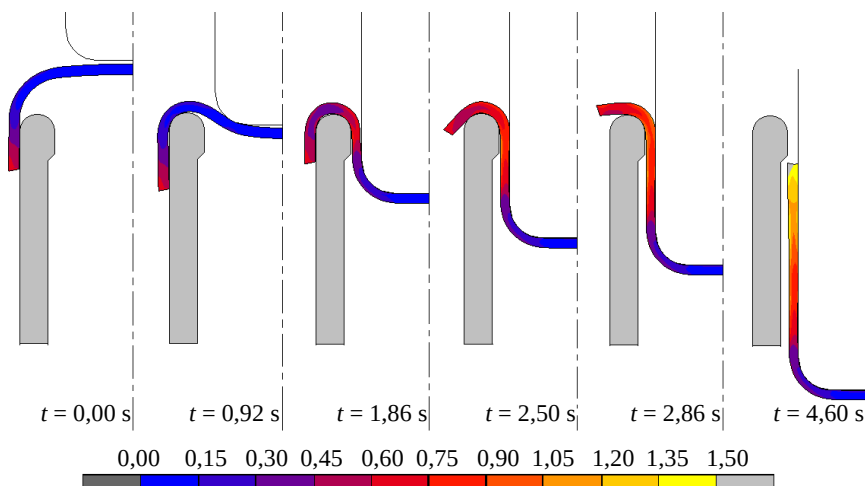
$$\frac{g}{d_{i-1}} 100 > \frac{1}{m_i}. \quad (5.10)$$

W przypadku, gdy warunek powyższy nie jest spełniony fałdowaniu zapobiega się stosując dociskacz, w sposób pokazany na rys. 5.22b. Wartość siły dociskającej dociskacz ustala się doświadczalnie, przy czym naciski jednostkowe są dużo mniejsze od stosowanych w procesie wytłaczania, podanych w tab. 5.2.

W pewnych przypadkach, gdy prowadzi się po sobie szereg operacji przetłaczania może dojść do utraty własności plastycznych materiału wytłoczki, powodującej powstawanie pęknięć wzdłużnych ścianki (rys. 5.25c). Przy czym pęknięcia te mogą pojawić się natychmiast po przetłoczeniu wyrobu lub po pewnym czasie. Przyjmuje się, że główną rolę przy tym pękaniu odgrywają naprężenia własne, które mogą osiągnąć wartości niebezpieczne, gdy szczelina między stemplem a matrycą pozwala na swobodne pogrubianie się ścianek wytłoczki. W przypadku, gdy w trakcie przetłaczania dochodzi do pocienienia ścianki naprężenia własne są znacznie mniejsze i pęknięcie wzdłużne nie występuje. Wówczas, gdy pęknięcia wzdłużnego ścianek nie daje się opanować należy zastosować międzyoperacyjne wyżarzanie rekrytalizujące.

Przewijanie

Proces przetłaczania można zrealizować także metodą przewijania (rys. 5.26). Cechą charakterystyczną procesu przewijania jest przekształcanie powierzchni zewnętrznej wytłoczki w wewnętrzną i odwrotnie – wewnętrzną w zewnętrzną. Przewijaniu poddaje się wytłoczki cienkościenne, których

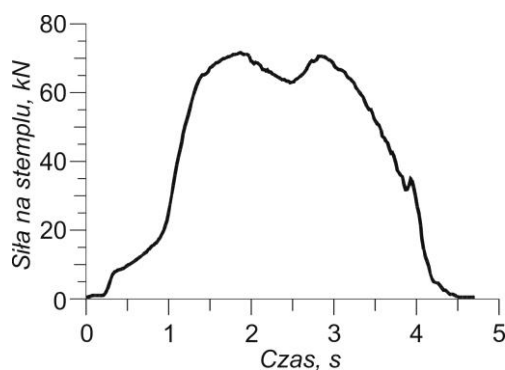


Rys. 5.26. Zmiana kształtu wytloczki oraz intensywności odkształcenia w procesie przewijania w zależności od czasu t

grubość ścianki $g < 0,025 d_{i-1}$. Przy przewijaniu stosuje się współczynniki przetłaczania o wartościach od $m_2 = 0,65$ do $0,85$ dla dalszych operacji [17].

Przewijanie w stosunku do przetłaczania metodą zwykłą odznacza się następującymi zaletami:

- ❑ możliwością większej redukcji średnicy naczynia w jednym zabiegu przetłaczania;
- ❑ ograniczeniem konieczności stosowania dociskacza, która występuje przy znacznie mniejszej grubości ścianki w stosunku do średnicy wytloczki;
- ❑ możliwością łączenia w jednej operacji wytłaczania z przewijaniem, dzięki czemu można uzyskać wytlózkę o średnicy wynoszącej nawet $0,36$ średnicy krążka.



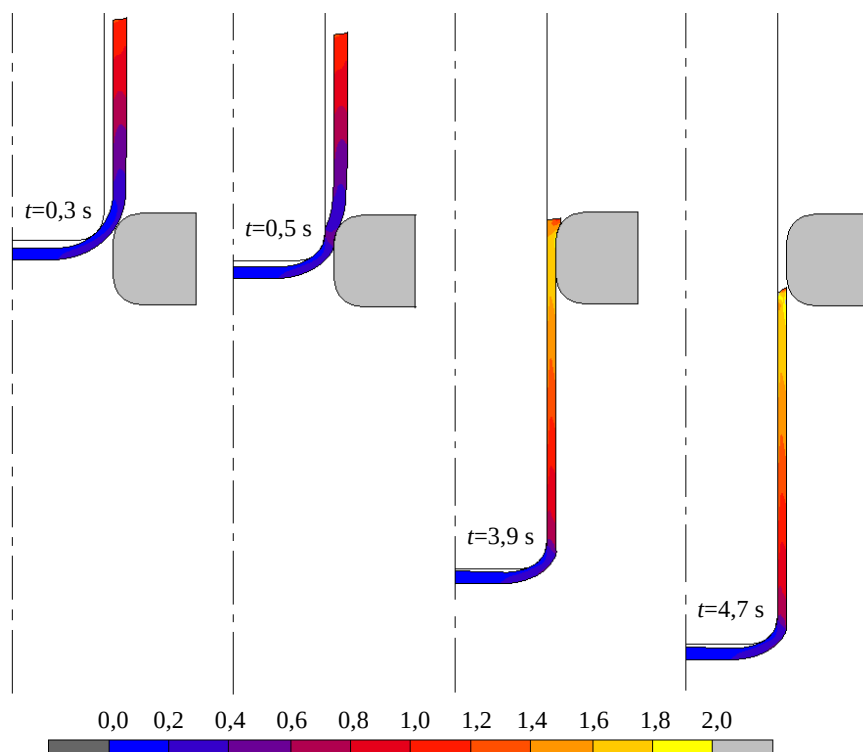
Rys. 5.27. Przykładowy rozkład siły działającej na stempel w procesie przewijania wytloczki stalowej, którego przebieg pokazano na rys.5.26

Podstawowymi wadami procesu przewijania są natomiast: dość skomplikowane narzędzie i konieczność stosowania pras o dużym skoku. Bardziej złożona kinematyka płynięcia metalu w procesie przewijania (w stosunku do przetłaczania zwykłego) znajduje swoje odzwierciedlenie w rozkładzie siły działającej na stempel, której rozkład ulega większym wahaniom – rys. 5.27.

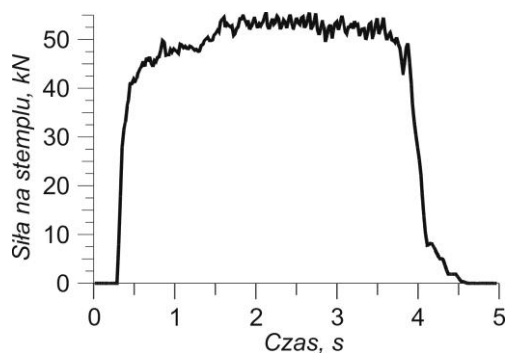
Wyciąganie

Wyciąganie polega na zwiększeniu wysokości wytłoczki przez zmniejszenie grubości jej ścianki, przy czym średnica wewnętrzna wytłoczki nie ulega zazwyczaj większej zmianie – rys. 5.28.

Operację wyciągania wykonuje się w tłocznikach, w których szczelina między stemplem a powierzchnią wewnętrzną pierścienia ciągowego jest mniejsza od początkowej grubości ścianki. W procesie tym, podobnie jak przy przetłaczaniu, maksymalne zmniejszenie grubości ścianki (w jednej operacji) ograniczone jest możliwością wystąpienia rozerwania wytłoczki. Jednakże podczas wyciągania na dno wytłoczki działa tylko część siły całkowitej wywieranej przez stempel, której przykładowy rozkład pokazano na rys. 5.29. Dzieje się tak dlatego, iż część tej siły przenoszona jest przez siły tarcia występujące między stemplem a wewnętrzną powierzchnią walcowych ścianek wytłoczki w obszarze odkształcenia plastycznego. W efekcie tego całkowity nacisk stempla może być większy od siły wywołującej rozerwanie wytłoczki w jej najszlakszym przekroju, leżącym w pobliżu dna. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż w procesie wyciągania istnieje możliwość znacznie większego



Rys. 5.28. Zmiana kształtu wytłoczki oraz intensywności odkształcenia w procesie wyciągania w zależności od czasu t



Rys. 5.29. Przykładowy rozkład siły działającej na stempel w procesie przewijania wyłóczki stalowej, którego przebieg pokazano na rys.5.26

wydłużenia wyłóczki w jednej operacji, niż ma to miejsce w typowym przetłaczaniu.

W tabeli 5.4 zestawiono wartości największej redukcji przekroju poprzecznego wyłóczki R_p , jakie można uzyskać w operacji wytłaczania w połączeniu z wyciąganiem, lub przy samym wyciąganiu. Wartość R_p można obliczyć z zależności:

$$R_p = \left(1 - \frac{S}{S_0} \right) 100\% \quad (5.11)$$

gdzie: S_0 , S – pole przekroju poprzecznego (pierścienia) wyłóczki przed i po procesie wyciągania.

Tabela 5.4.

Najmniejsze wartości redukcji przekroju poprzecznego wyłóczki w stanie wyżarzonym, możliwe do otrzymania w jednej operacji wyciągania [17]

Materiał	$R_p = (1 - S/S_0) 100\%$	
	Wytłaczanie z wyciąganiem	Wyciąganie
Stal miękka	55 ÷ 60	35 ÷ 45
Stal średnio twarda	35 ÷ 40	25 ÷ 30
Mosiądz	60 ÷ 70	50 ÷ 60
Aluminium	60 ÷ 65	40 ÷ 50

Własności wytrzymałościowe i geometria wyłóczek

Odształcenie jakiego doznaje materiał płaskiego kawałka blachy podczas przekształcania go w element o powierzchni nierozwijalnej nie jest jednakowe i zależy od wielu czynników (umiejscowienia w elemencie, metody kształtowania, tarcia itd.). Powoduje to zmiany własności mechanicznych oraz geometrii wyrobu kształtowanego, które charakteryzuje się poniżej na przykładzie wyłóczki cylindrycznej bez kołnierza.

Własności wytrzymałościowe bocznej ścianki wyłóczki są zależne od intensywności odkształcenia, które największe wartości przyjmuje na obrzeżach wyłóczki. Jest to dobrze widoczne np. na rys. 5.10, pokazującym przebieg typowego procesu wytłaczania swobodnego. Podobne spostrzeżenie można poczynić dla elementów kształtowanych przez przetłaczanie (rys. 5.23), przewijanie

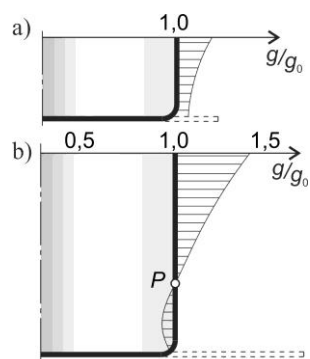
(rys. 5.26) i wyciąganie (rys. 5.28). Natomiast we wszystkich tych przypadkach kształtowania odkształcenie w pobliżu dna wyrobu jest pomijalnie małe. Powoduje to, że wytłoczka w obszarze dna ma dobre własności plastyczne i najmniejszą wytrzymałość. Natomiast na jej obrzeżu metal odznacza się największą twardością, wytrzymałością oraz najmniejszą plastycznością (określoną np. wydłużeniem względnym). Przejście między skrajnymi wartościami parametrów opisujących własności wytrzymałościowe w różnych obszarach wytłoczki odbywa się płynnie (zgodnie z rozkładem intensywności odkształcenia).

Według Erbla i in. [18] w naczyniu otrzymanym w procesie wytłaczania (charakteryzowanym współczynnikiem $m_1 = 0,5$) wartość granicy plastyczności zmienia się przy przejściu wzdłuż tworzącej od dna wytłoczki do jej obrzeża, w zależności od rodzaju materiału, w zakresie:

- stal miękka: $230 \div 590$ MPa,
- miedź Cu 99,95 (CW008A wg PN-EN 1412): $65 \div 350$ MPa,
- aluminium Al 99,5 (AW1050 wg PN-EN 373-3): $30 \div 110$ MPa.

Zmiany grubości. W procesie wytłaczania dno wytłoczki ulega dwuosiowemu równomiernemu rozciąganiu. W przypadku wytłoczek płytkich naprężenia te nie są w stanie wywołać uplastycznienia dna. Jednakże podczas znacznie częstszego wykonywania naczyń o większej głębokości, z zastosowaniem minimalnych dopuszczalnych współczynników wytłaczania, występuje niewielkie pocienienie dna. Największe pocienienie ścianki wytłoczki występuje zwykle w obszarze przejścia strefy zaokrąglenia w ściankę pionową i jest związane z zanikaniem korzystnego oddziaływania sił tarcia na dno wytłoczki – przeciwdziałającego jego rozciąganiu. W miarę oddalania się od dna pocienienie maleje, co jest wynikiem wzrostu umocnienia materiału powodowanego zwiększeniem się odkształceń obwodowych. Na pewnej wysokości pocienienie ścianek znika, a powyżej niej grubość ścianki wytłoczki jest większa od grubości g_0 i przyjmuje wartości największe na obrzeżu. Orientacyjne zmiany grubości ścianki wytłoczki płytkiej i głębokiej pokazano na rys. 5.30.

Dokładność kształtu. Bardzo często kształt wytłoczek różni się od kształtu stempla wykorzystanego w procesie wytłaczania. Zwykle jest to: odchylenie ścianki bocznej od kształtu cylindrycznego, nieokrągłość przekrojów poprzecznych, nierówności obrzeża oraz wypukłość dna. Z reguły średnica wewnętrzna wytłoczki w pobliżu jej dna odpowiada średnicy stempla. Natomiast w obszarze obrzeża jest ona



Rys. 5.30. Rozkład grubości walcowej części wytłoczki: a) niskiej, b) wysokiej [44]

większa i zależy od wielkości szczeliny między stemplem i matrycą. Odchyłki od kształtu walcowego są tym większe im szczelina jest większa w stosunku do grubości blachy. W przypadku, gdy wymagania odnośnie dokładności kształtu wytłoczki są duże, proces wytłaczania należy prowadzić przy szczelinie o równej grubości blachy g_0 . W tej sytuacji dochodzi do obciskania blachy na stemple, co wpływa korzystnie na dokładność kształtu wyrobu, ale jest to okupione zwiększeniem siły tłoczenia i szybszym zużywaniem się matrycy. Ilustrację graficzną wpływu grubości blachy g_0 (przy stałej szczelinie s) na przebieg wytłaczania stanowi rys. 5.10.

Nieokrągłość kształtu wytłoczki jest następstwem anizotropii własności plastycznych blachy w jej płaszczyźnie. Powoduje to dodatkowo utworzenie czterech uch na obrzeżu wytłoczki, które najczęściej należy usunąć w dodatkowej operacji wyrównania obrzeża.

Płaskość dna wytłoczki jest odpowiednia, gdy podczas wytłaczania zachodzą w nim odkształcenia trwałe. Wówczas, gdy uplastycznienie dna nie ma miejsca, to przyjmuje ono pewną wypukłość, która zwiększa się wraz ze wzrostem wartości g/D i m_1 .

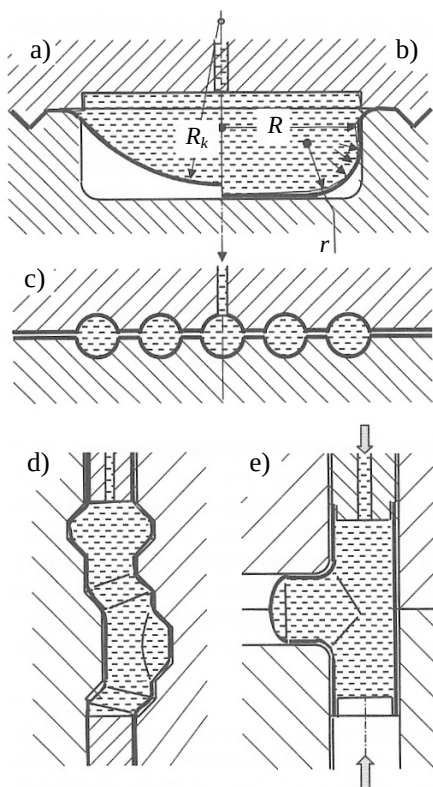
Należy podkreślić, iż wymienione błędy kształtu występują tym wyraźniej im większa jest szczelina w porównaniu z grubością ścianki. Dla zmniejszenia tych błędów w ostatniej operacji ciągnięcia należy stosować szczelinę równą grubości blachy, a nawet nieco od niej mniejszą.

Jakość powierzchni. Chropowatość powierzchni zewnętrznej wytłoczki nie jest jednakowa. W pobliżu dna jest ona taka sama jak blachy zastosowanej do tłoczenia, a na promieniu zaokrąglenia ulega zwiększeniu (np. w efekcie ujawniania się poszczególnych ziaren podczas tłoczenia blach gruboziarnistych). Najmniejszą chropowatość ma ścianka boczna wytłoczki [18]. Odnośnie chropowatości na powierzchni wewnętrznej wytłoczki, stwierdza się, iż jest ona uzależniona od wielkości szczeliny. I tak przy szczelinie większej od grubości blachy chropowatość blachy wyraźnie wzrasta (w porównaniu do chropowatości blachy), a przy pocienieniu ścianki praktycznie nie ulega zmianie.

5.3. Kształtowanie ciśnieniem cieczy

Na rys. 5.31 pokazano typowe operacje kształtowania wytłoczek przez rozciąganie, w których nacisk na powierzchnię blachy wywierany jest ciśnieniem cieczy lub elastomeru. W takich procesach żądany kształt wytłoczki nadawany jest wewnętrzną, wklęsłą powierzchnią matrycy (rys. 5.31a).

Ciśnienie cieczy p konieczne do dociśnięcia blachy do powierzchni matrycy można wyznaczyć korzystając np. z zależności:



Rys. 5.31. Kształtowanie wytłoczek ciśnieniem cieczy (opis w tekście) [45]

$$p = \frac{2g}{r} \sigma_p, \quad (5.12)$$

gdzie: r – promień zaokrąglenia wytłoczki (rys. 5.31b), g – grubość blachy, σ_p – naprężenie uplastyczniające.

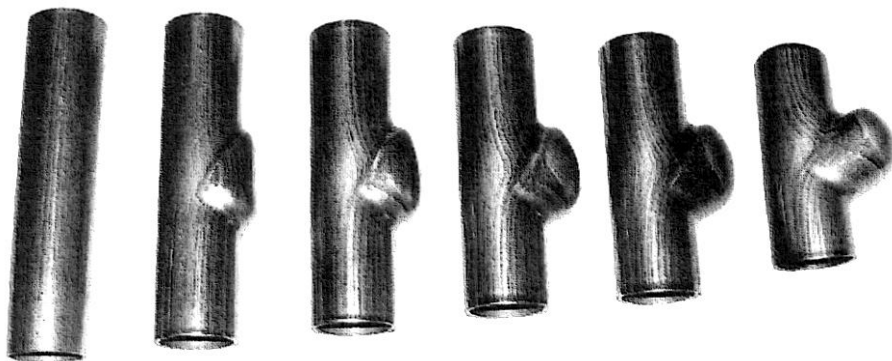
Zatem przy kształtowaniu wytłoczki pokazanej na rys. 5.31b, największe ciśnienie musi być wywierane pod koniec procesu, by docisnąć materiał do ścianki walcowej. Ta metoda kształtowania stosowana jest również przy produkcji zbiorników płaskich i płyt z kanałami wewnętrznymi (np. wymienniki ciepła – rys. 5.31c). Wówczas ciecz wprowadzana jest między dwie, początkowo płaskie blachy, zespawane lub zgrzane na obrzeżu.

W ostatnim okresie coraz częściej stosowane jest kształtowanie wytłoczek zamkniętych ze wstępnie zagiętych odcinków rur – rys. 5.31d. Wstępniaki takie umieszcza się w matrycach dzielonych i kształtuje ciśnieniem cieczy włączanej do ich wnętrza.

Podczas kształtowania trójkników ma miejsce współdziałanie oddziaływania ciśnienia cieczy ze ściskaniem osiowym rury za pomocą stempli ruchomych (rys. 5.31e). Metoda ta jest wykorzystywana także przy kształtowaniu złączy cztero-wylotowych oraz mieszków sprężystych. Kolejne etapy kształtowania trójknika skośnego, wyznaczone w badaniach doświadczalnych przez Stadnika [79], pokazano na rys. 5.32.

5.4. Wyoblanie i zginięcie obrotowe

Metodami wyoblania i zginięcia obrotowego można wytwarzać wyroby osiowo-symetryczne o złożonych kształtach, których wykonanie metodami tłoczenia jest utrudnione, a czasami wręcz niemożliwe. Z powodu małych kosztów oprzyrządowania metody te znajdują również zastosowanie w produkcji niewielkich serii wyrobów, możliwych do wykonania w procesie tłoczenia.



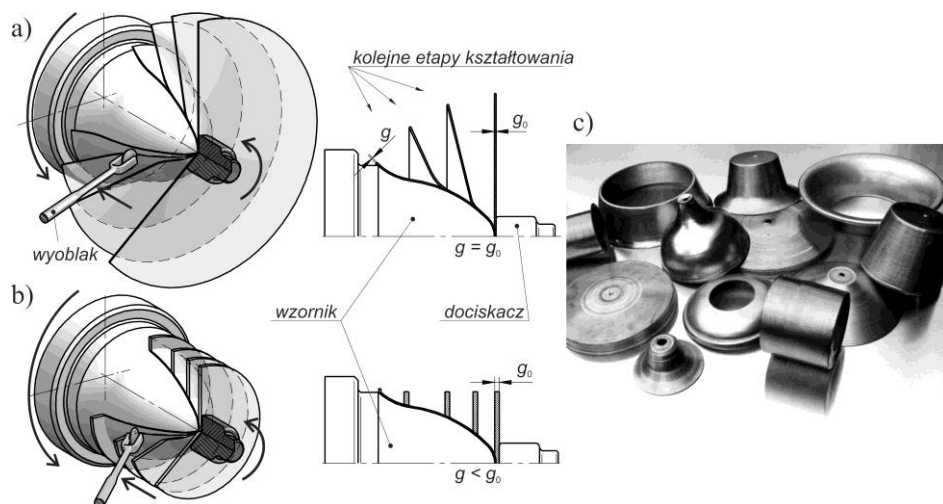
Rys. 5.32. Kolejne etapy kształtowania trójnika skośnego od wyjściowego odcinka rury do elementu gotowego [79]

Wyoblanie to kształtowanie wirującego krążka lub półwyrobu (wytłoczki) przez wywarcie nacisku miejscowego przez narzędzie zwane wyoblakiem (rys. 5.33a). Element kształtujący tego narzędzia może toczyć się lub ślizgać po powierzchni blachy. Cechą charakterystyczną procesu wyoblania jest, iż grubość blachy g_0 , z której kształtowany jest element, zmienia się tylko w bardzo małym zakresie – tj. przyjmuje się, że grubość wyrobu $g = g_0$.

W trakcie kształtowania odkształcany krążek lub półwyrób przyjmuje stopniowo kształt wzornika, który na ogół wykonywany jest z drewna lub z metalu. W przypadku wyoblania naczyń o kształtach złożonych stosuje się wzorniki składane lub jednolite, ustawione mimośrodowo w stosunku do osi wyrobu. Wzornik wraz z materiałem wykonuje ruch obrotowy. Chropowatość elementów wyoblanych odpowiada zwykle 6 lub 7 klasie (z widocznymi śladami wyoblaka) i można ją poprawić wprowadzając dodatkowy zabieg wygładzania.

Zgniatanie obrotowe polega na wyoblaniu połączonym z jednoczesnym dużym pocienieniem ścianki w efekcie jej rozwałcowania (tj. $g < g_0$). Zgniataniu obrotowemu poddaje się krążki lub wytłoczki, z których otrzymuje się naczynia walcowe, stożkowe, o zarysie krzywoliniowym, z grubym dnem i cienkimi ściankami. Schemat zgniatania obrotowego i przykłady wyrobów kształtowanych pokazano na rys. 5.33b i c.

Ten proces kształtowania wykonuje się w maszynach specjalistycznych, odznaczających się bardzo sztywną konstrukcją. Naciski jednostkowe w procesach zgniatania obrotowego dochodzą do 2800 MPa, prędkość obwodowa do 5 m/s, a posuw przyjmowany jest w zakresie $0,01 \div 0,2$ mm na obrót. Podczas kształtowania stosuje się środki smarujące, najczęściej zawiesiny cynku koloidalnego lub powłoki fosforanowe. Element otrzymywany metodą zgniatania obrotowego charakteryzuje bardzo gładka powierzchnia oraz zwiększone własności mechaniczne.

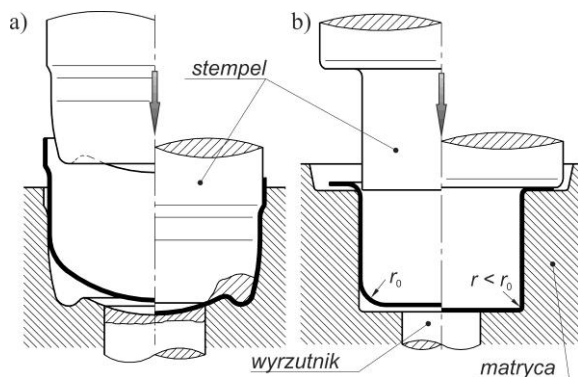


Rys. 5.33. Schemat procesów wyoblania (a) i zgniatania obrotowego (b) naczynia z krążka blachy oraz przykładowe wytłoczki uzyskane w prezentowanym procesie (c)

5.5. Operacje wykańczające

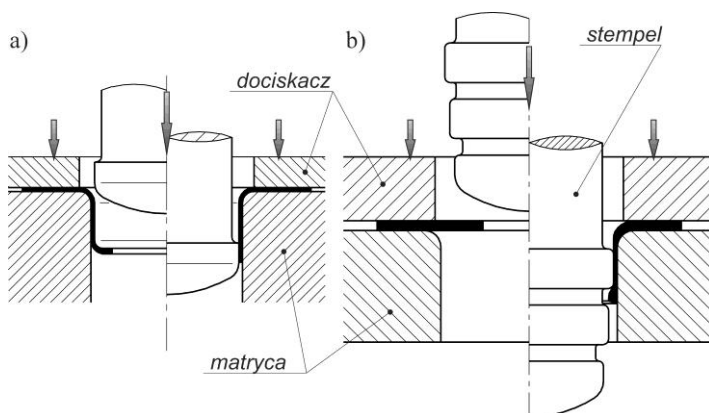
Operacje wykańczające mają na celu nadanie ostatecznego kształtu elementowi otrzymanemu np. podczas operacji tłoczenia. Do operacji tych zaliczane są:

- Dotłaczanie, polegające na nadaniu uprzednio wykonanej wytłoczce ostatecznego kształtu. Ma ono na celu poprawienie kształtu i uzyskanie żądanych wymiarów (np. promieni zaokrągleń) wytłoczki, którą poddaje się intensywnemu ściskaniu między powierzchniami stempla i matrycy (rys. 5.34). Dotłaczanie prowadzone jest w końcowej fazie podstawowej operacji kształtowania lub jako operacja oddzielna.



Rys. 5.34. Schematy operacji dotłaczania: a) zmiana kształtu dna wytłoczki, b) dotłaczanie promieni zaokrąglenia krawędzi wytłoczki

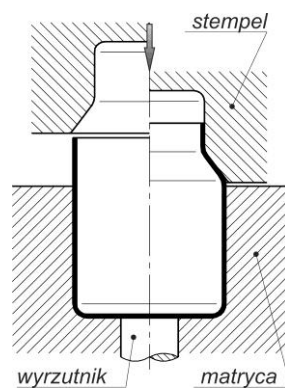
- Wywijanie, powodujące zwiększenie średnicy otworu uprzednio wyciętego, z jednoczesnym wynięciem dookoła tego otworu kołnierza walcowego (rys. 5.35) lub stożkowego.
- Obciskanie, w efekcie którego następuje zmniejszenie wymiarów poprzecznych rur lub wytłoczek.



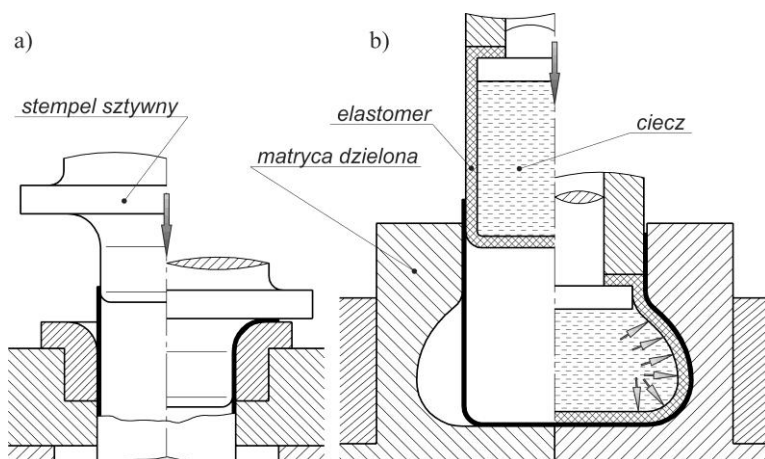
Rys. 5.35. Schematy operacji wywijania: a) dna wytłoczki, b) z pocienieniem ścianki

czek na określonym obcinku ich długości. Operacja tego typu stosowana jest np. podczas wytwarzania: butli na sprężane gazy, syfonów itp. Przykładowy proces obciskania pokazano na rys. 5.36.

- Rozpychanie, doprowadzające do powiększenia wymiarów poprzecznych wytłoczki. Operacja ta jest wykorzystywana do kształtowania obrzeża lub ścianek bocznych na określonym odcinku długości wytłoczek lub rur. Przykładowe operacje rozpychania realizowane narzędziami sztywnymi lub za pomocą ciśnienia cieczy pokazano na rys. 5.37.



Rys. 5.36. Schemat operacji ociskania



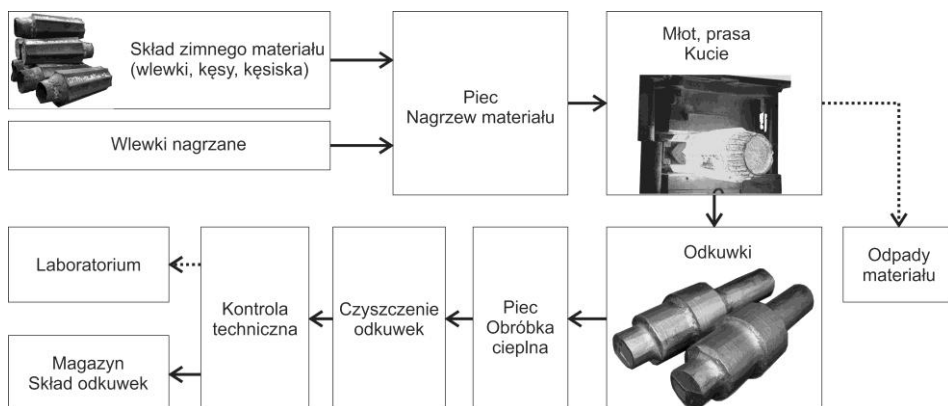
Rys. 5.37. Schematy operacji rozpychania: a) za pomocą narzędzi sztywnych, b) za pomocą ciśnienia cieczy

6. Kucie swobodne

Kuźnictwo to dział obróbki plastycznej metali obejmujący całokształt zagadnień związanych z wytwarzaniem wyrobów kutych za pomocą maszyn i narzędzi kuźniczych. Przez kucie rozumie się zmianę kształtu obrabianego metalu następującą w wyniku działania bijaka młota lub suwaka prasy, przy wykorzystaniu własności plastycznych metalu odkształcanego. Jeżeli narzędzia wywierają nacisk tylko na część powierzchni metalu, który może płynąć w kilku dowolnych kierunkach to taki proces kucia lub prasowania nazywa się swobodnym. Częściowe ograniczenie swobody płynięcia metalu, przy jednoczesnym wywieraniu nacisku na część powierzchni nazywa się kuciem półswobodnym, które realizowane jest w przyrządach kuźniczych.

Schemat procesu kucia swobodnego pokazano na rys. 6.1. W jego skład wchodzi następujące główne operacje: nagrzanie metalu (najczęściej w postaci wlewki), kucie na młocie lub prasie, obróbka cieplna odkuwek oraz kontrola jakości. Dla partii odkuwek wykonuje się również badania laboratoryjne (np. wytrzymałość, twardość, struktura). W tym celu z wybranych odkuwek są pobierane odpowiednie próbki.

Podczas kucia stopień przerobienia materiału w stosunku do stanu wyjściowego określa się stopniem przekucia (współczynnikiem wydłużenia). W przypadku



Rys. 6.1. Schemat blokowy procesu technologicznego kucia swobodnego

ogólnym, gdy kucie polega tylko na wydłużeniu stopień przekucia λ równy jest stosunkowi powierzchni przekroju początkowego S_0 do przekroju końcowego S odkuwki:

$$\lambda = \frac{S_0}{S}. \quad (6.1)$$

Stopień przekucia ma znaczący wpływ na stan własności mechanicznych i strukturę metalu. Kierunek przebiegu włókien jest uzależniony od zastosowanej metody kucia. W przypadku kucia swobodnego pod młotem w efekcie dużej prędkości odkształcenia oraz nierównomiernych odkształceń, kierunek włókien może znacznie odbiegać od kierunku płynięcia metalu. Przy kuciu swobodnym na prasie odchylenia te są znacznie mniejsze.

Zgodnie z wymaganiami technologicznymi przy kuciu swobodnym odkuwek najmniejsze wartości stopnia przekucia powinny wynosić $\lambda = 3,5 \div 4$. Wówczas własności mechaniczne w kierunku wzdłużnym i poprzecznym są dobre i zapewniają spełnienie wymagań wytrzymałościowo-konstrukcyjnych.

6.1. Asortyment wyrobów kutych swobodnie

Kucie swobodne stosuje się do produkcji odkuwek bardzo dużych oraz w przypadku produkcji w małych seriach (rys. 6.2). Odkuwki małe (o masie $0,5 \div 20$ kg) wykonuje się najczęściej na młotach sprężarkowych o masie części spadających od 50 do 1000 kg. Odkuwki średniej wielkości (o masie $8 \div 200$ kg) kuje się na młotach parowo-powietrznych, których części spadające mają masę $500 \div 5000$ kg. Natomiast odkuwki duże wykonuje się w prasach hydraulicznych o nacisku $6 \div 200$ MN. Masa tych odkuwek wynosi na ogół do 160 ton, a w niektórych krajach nawet do 250 ton.

Odkuwki kute swobodnie dzieli się na półwyroby kute i wyroby kute. Półwyrobami są kęsy i kęsiska przeznaczone do dalszej przeróbki plastycznej w kuźniach, ciągarniach i walcowniach. Natomiast do wyrobów kutych zalicza się pręty kute o znacznej długości ($1,5 \div 6$ m) i stałym przekroju poprzecznym (okrągłym, kwadratowym, prostokątnym, trapezowym, trójkątnym, sześciokątnym, ośmiokątnym i innym) oraz odkuwki kształtowe, które można podzielić na dwie grupy:

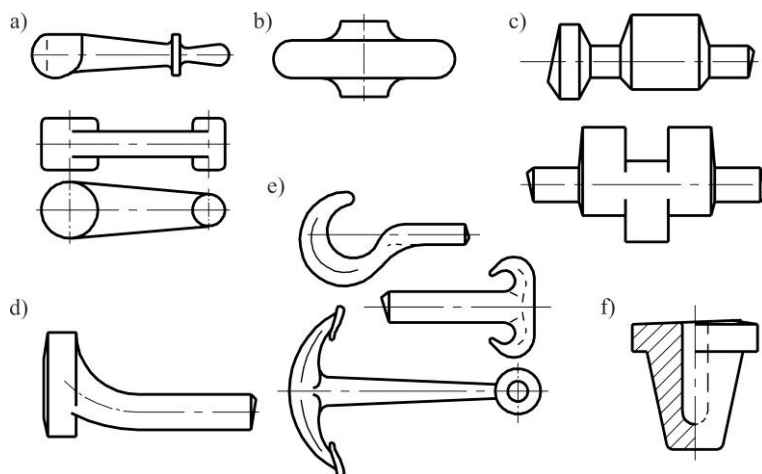
- odkuwki symetryczne do których należą m.in.: płyty, krążki, tarcze, kostki, graniastosłupy o przekroju



Rys. 6.2. Przykłady odkuwek kutych swobodnie w warunkach polskich kuźni

regularnym, pierścienie przebijane i rozkuwane, tuleje, odkuwki wydłużone, wały kołnierzowe, wały odsadzane, walce oraz bijaki młotów;

- odkuwki niesymetryczne, nieregularne (rys. 6.3), z których przede wszystkim należy wymienić wały korbowe i mimośrodowe oraz odkuwki wydłużone o osi przesadzonej lub zgiętej (okrętowe trzony sterowe i kotwiczne, haki, kotwice itp.).



Rys. 6.3. Odkuwki nieregularne kute swobodnie: a) dźwignia i korbowód, b) tarcza turbiny, c) jednorodny wał korbowy, d) trzon strefowy, e) haki i kotwice, f) odkuwka wgłębiona [98]

6.2. Podstawowe operacje kucia swobodnego

W procesie technologicznym kucia swobodnego łączy się zwykle w dowolnej kolejności oraz dowolnej ilości podstawowe operacje kuźnicze. Są to: spęczanie, wydłużanie, przebijanie, gięcie, cięcie, skręcanie i zgrzewanie.

6.2.1. Spęczanie

Spęczanie polega na zwiększeniu przekroju poprzecznego kosztem wysokości lub długości materiału, osiąganego w efekcie odpowiedniego nacisku prasy lub uderzenia młota. Operację tę stosuje się w celu:

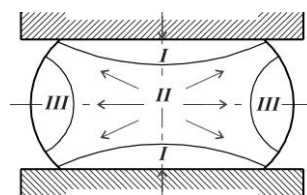
- uzyskania odkuwek o przekrojach poprzecznych większych od przekroju wsadu;
- polepszenia jakości odkuwki przez przerób plastyczny struktury lanej, wywołujący rozdrobnienie i rozproszenie składników strukturalnych oraz zwiększenie gęstości stali wskutek zgrzania pustek i nieciągłości występujących we wlewkach;

- ❑ uzyskania porównywalnych własności mechanicznych odkuwki w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym.

W czasie realizacji operacji spęczania należy kierować się następującymi zasadami:

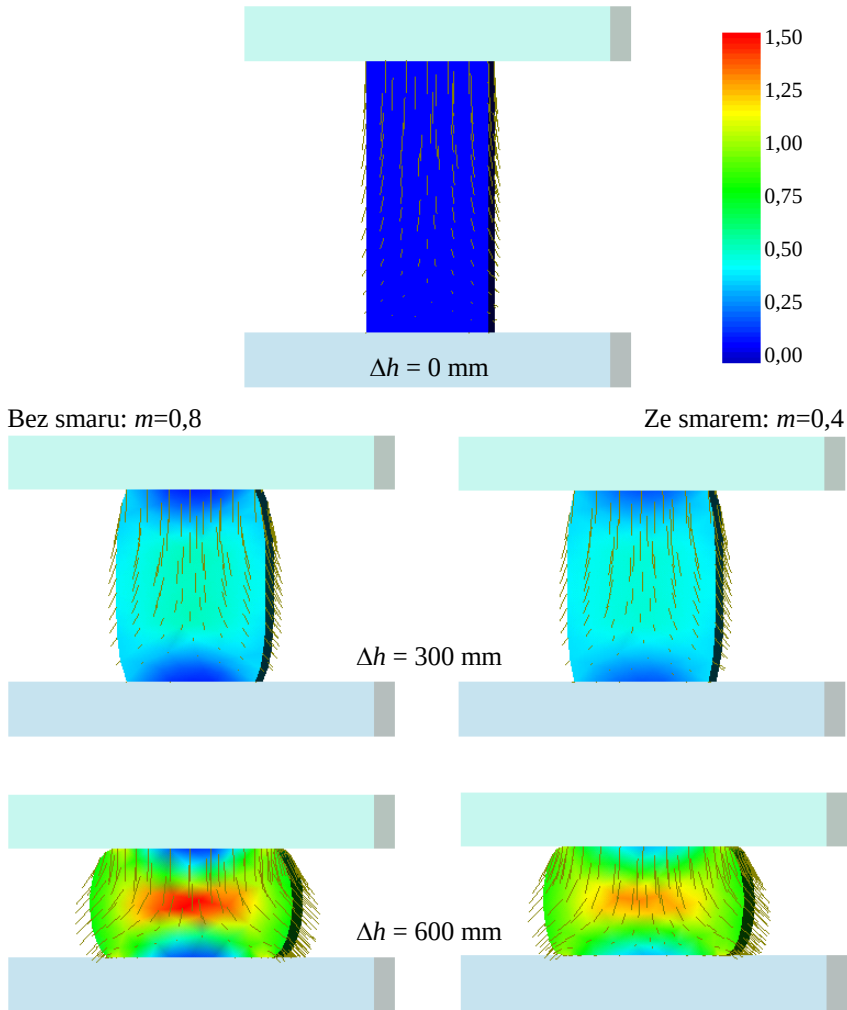
- ❑ stosunek wysokości wsadu do wymiaru charakteryzującego przekroju poprzecznego (średnica, długość krótszego boku) nie powinien przekraczać wartości granicznej wynoszącej 2,5 lub 3,5 – odpowiednio dla wsadu w kształcie walca lub prostopadłościanu;
- ❑ materiał spęczany powinien być nagrany równomiernie (do największej temperatury kucia) w całej swej objętości;
- ❑ wlewek przed spęczaniem powinien być przekuty na okrągło;
- ❑ spęczanie należy wykonywać w ten sposób by odkształcenia powstające po każdym uderzeniu młota lub w efekcie nacisku suwaka prasy przekraczały wartości odpowiadające gniotom krytycznym;
- ❑ powierzchnia wsadu do spęczania powinna być wolna od wad zewnętrznych, a jego powierzchnie czołowe (stykające się z kowadłami) powinny być prostopadłe do osi wzdłużnej;
- ❑ podczas spęczania odkuwek o dużych wymiarach, zwłaszcza w przypadku stali wykazujących umocnienie przy odkształcaniu ciągłym, należy stosować przerwy umożliwiające pełną rekrytalizację metalu.

W przekroju wzdłużnym (osiowym) spęczanego walca można wyodrębnić trzy obszary odkształceń, pokazane schematycznie na rys. 6.4. Materiał ze strefy I odkształca się w stopniu najmniejszym, w efekcie działania sił tarcia (na powierzchni styku z kowadłami) hamujących płynięcie metalu. Największe odkształcenia występują w obszarze II, natomiast w obszarze III odkształcenia przyjmują wartości pośrednie. Należy przy tym podkreślić, że przejście pomiędzy poszczególnymi obszarami zachodzi w sposób ciągły. Jest to dobrze widoczne na kolejnym rys. 6.5, na którym pokazano rozkłady intensywności w przekroju wzdłużnym spęczanego walca, w zależności od zaawansowania procesu oraz czynnika tarcia na powierzchni styku materiał-narzędzie. Zastosowanie smarowania w procesie spęczania jest korzystne, gdyż materiał odkształca się w sposób bardziej jednorodny, a siły kształtowania ulegają zmniejszeniu.



Rys. 6.4. Obszary odkształceń w przekroju wzdłużnym spęczanego walca [98]

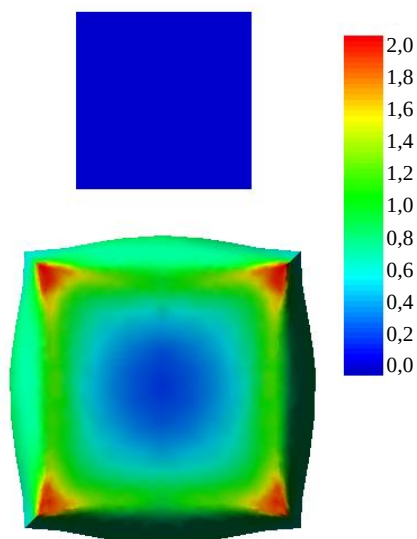
W efekcie działania sił tarcia na powierzchni styku metal – narzędzie wsad walcowy po procesie spęczania przyjmuje charakterystyczny kształt beczkowaty (rys. 6.5). Przy czym beczkowatość odkuwki wzrasta ze zwiększeniem wartości



Rys. 6.5. Porównanie procesów spęczania swobodnego walca o wymiarach początkowych $\varnothing 500 \times 1000$ mm, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, realizowanych przy różnym tarcia i przemieszczeniu kowadła górnego Δh (wektory pokazują prędkość przemieszczania metalu)

współczynnika (czynnika) tarcia opisującego warunki brzegowe na powierzchni styku. Natomiast zmiany kształtu przekroju poprzecznego wsadu prostopadłościennego, następujące w procesie spęczania, są bardziej złożone i zgodne z rys. 6.6.

Spęczanie na prasach hydraulicznych realizowane jest za pomocą kowadeł płaskich (rys. 6.4) lub specjalnych płyt wykorzystywanych przy spęczaniu wlewków. Płyty te mają nawiercone z boku otwory ułatwiające ich transport.

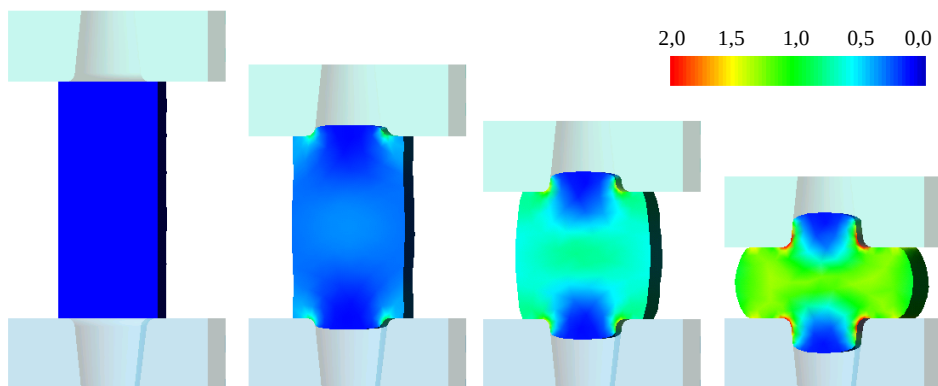


Rys. 6.6. Zmiana kształtu prostopadłościanu (w widoku z góry), o podstawie 500 x 500 mm i wysokości 1000 mm (rys. górny), poddanego spęczaniu na wysokość 400 mm (rys. dolny), z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

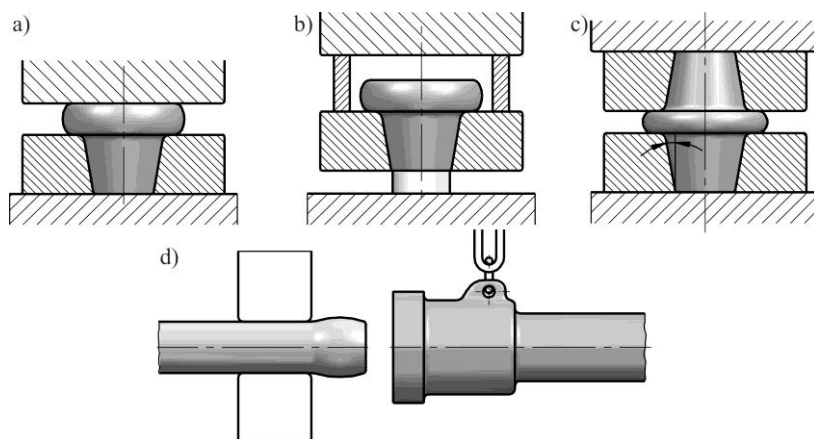
Czasami stosuje się płyty wklęsłe, przez co uzyskuje się możliwość centrowania odkuwki podczas spęczania, a tworzenie wypukłej powierzchni czołowej wlewka zapobiega powstawaniu wklęśnięć w tej części odkuwki podczas wydłużania.

Do kucia krążków przeznaczonych na koła zębate, tarcze i kołnierze z występami stosuje się spęczanie z podkładkami pierścieniowymi (rys. 6.7). W tej metodzie część materiału wpływa do otworów stożkowych w podkładkach, dzięki czemu zostają odkute czopy.

Na rys. 6.8 przedstawiono różne sposoby spęczania miejscowego. I tak na rys. 6.8a pokazano spęczanie w pierścieniu końca pręta, zaś na rys. 6.8c spęczanie środka pręta w dwóch pierścieniach. W obu przypadkach materiał spęczany jest tylko na części swojej długości nie objętej pierścieniami. Zdjęcie pierścieni z odkuwki wymaga zastosowania dodatkowej operacji wybijania, realizowanej w sposób pokazany na rys. 6.8b. W przypadku spęczania prętów długich nie mieszczących się w przestrzeni roboczej maszyny kuźniczej (młota, prasy) stosuje się sposób pokazany na rys. 6.8d. Polega on na zaciśnięciu pręta między



Rys. 6.7. Przebieg procesu spęczania półswobodnego (w dwóch pierścieniach), z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia



Rys. 6.8. Różne sposoby spęczania: a) spęczanie końca pręta, b) sposób wybijania odkuwki z pierścienia, c) spęczanie w dwóch pierścieniach środkowej części pręta, d) spęczanie prętów długich za pomocą stępóra [95]

kowadłami i spęczaniu części wystającej z narzędzi bijakiem (stęporem) zawieszonym na haku suwnicy.

W przypadku spęczania ważnym zadaniem jest określenie siły kucia, którą można obliczyć z wzoru:

$$F = w z k \sigma_p S, \quad (6.2)$$

gdzie: w – współczynnik uwzględniający wpływ prędkości odkształcenia, przyjmowany dla pras o prędkości ruchu suwaka $0,1 \div 1$ m/s w zakresie $w = 1 \div 2,5$, a dla młotów $w = 3 \div 4$; z – współczynnik zależny od kształtu narzędzi, wynoszący dla kowadeł płaskich $z = 1$, a dla kowadeł profilowych $z = 1,25$; σ_p – granica plastyczności w temperaturze końca kucia, szacowana na podstawie wykresu pokazanego na rys. 6.9; S – pole przekroju poprzecznego materiału po spęczeniu; k – współczynnik uwzględniający wpływ tarcia metalu o powierzchnię narzędzia, obliczany z zależności:

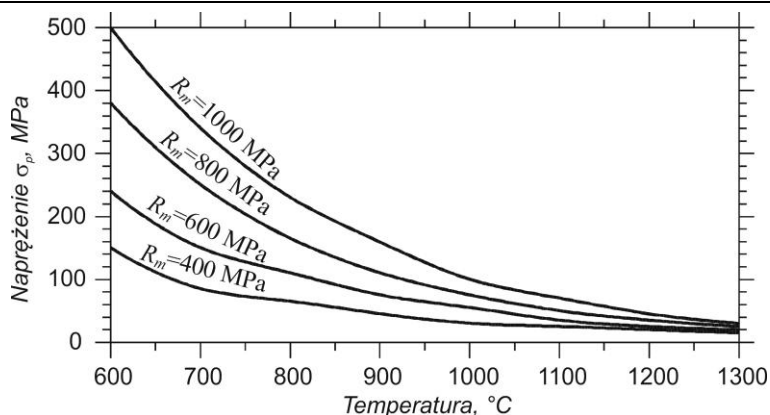
□ dla walca

$$k = 1 + \frac{\mu d}{3h}, \quad (6.3)$$

□ dla prostopadłościanu

$$k = 1 + \frac{\mu}{6} \frac{31-b}{a} \frac{b}{h}, \quad (6.4)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia; h – wysokość odkuwki po spęczeniu; d – średnia średnica spęczanego materiału; a , b – długość i szerokość prostopadłościanu po spęczeniu, przy czym $a \geq b$.

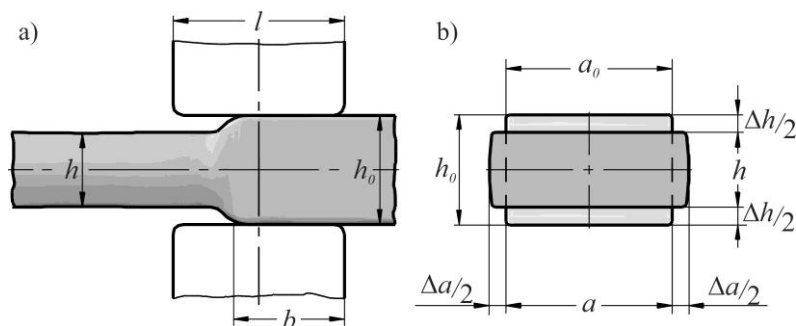


Rys. 6.9. Wartości naprężenia uplastyczniającego σ_p w różnych temperaturach, w zależności od wytrzymałości R_m stali w temperaturze otoczenia

6.2.2. Wydłużanie

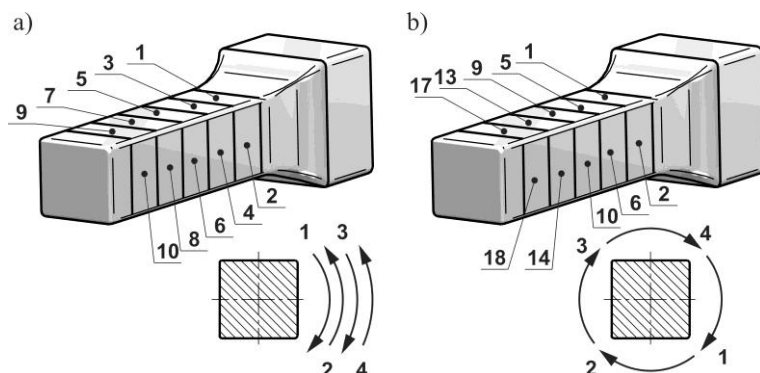
Wydłużanie polega na zwiększeniu długości przedmiotu w kierunku jednej z jego osi kosztem zmniejszenia przekroju poprzecznego prostopadłego do tej osi. Operację tę wykonuje się w ten sposób, iż materiał nagrany do temperatury kucia układu się na dolnym kowadlu i naciska lub uderza kowadłem górnym (rys. 6.10a). Następnie materiał obraca się o 90° i ponownie naciska (uderza) w miejsce poszerzone. Dwa kolejno następujące po sobie gnioty z jednoczesnym obrotem materiału o 90° nazywa się przejściem. Po każdym przejściu następuje przesunięcie materiału po kowadlu dolnym i przejście jest powtarzane. W wyniku oddziaływania narzędzi materiał zmniejsza swą wysokość o wartość $\Delta h = h_0 - h$, poszerza się o $\Delta a = a - a_0$ i jednocześnie wydłuża o $\Delta l = l - l_0$. W czasie wydłużania następuje zmniejszenie przekroju poprzecznego z $S_0 = h_0 \cdot a_0$ do wartości $S = a \cdot h$ (rys 6.10b).

W trakcie wydłużania obracanie materiału może odbywać się ruchem wahadłowym w prawo i w lewo (rys. 6.11a) lub w jedną stronę (rys. 6.11b). Drugi



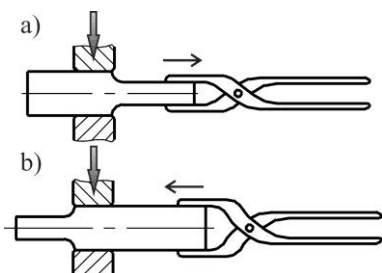
Rys. 6.10. Operacja wydłużania: a) schemat operacji, b) zmiana przekroju poprzecznego podczas wydłużania [95]

z tych sposobów (określany mianem śrubowego) stosuje się podczas kucia twardej gatunków stali (np. narzędziowych) oraz metali mających małą prędkość rekrytalizacji w temperaturze kucia. W przypadku wydłużania odkuwek długich i ciężkich kształtowanie przeprowadza się od środka ku jednemu z końców (rys. 6.12a), po czym po przeniesieniu uchwytu na koniec przeciwny kuje się drugą połowę odkuwki. Natomiast wydłużanie odkuwek krótkich i lekkich rozpoczyna się od końca i prowadzi do środka (rys. 6.12b). Przy pierwszym sposobie kucia kowal po każdym nacisku (uderzeniu) oddala się od kowadła, a przy drugim przybliża się do niego.



Rys. 6.11. Kolejność uderzeń podczas operacji wydłużania, przy obracaniu materiału:

a) ruchem wahadłowym, b) w jedną stronę



Rys. 6.12. Kierunek przesuwania wydłużanego materiału: a) długiego i ciężkiego, b) krótkiego [95]

Inny sposób wydłużania, w porównaniu z metodami przedstawionymi na rys. 6.11, pokazano na kolejnym rys. 6.13 i polega na wykonaniu szeregu nacisków (uderzeń) tylko na jednej stronie przesuwanego wzdłużnie pręta, który następnie obraca się o 90°.

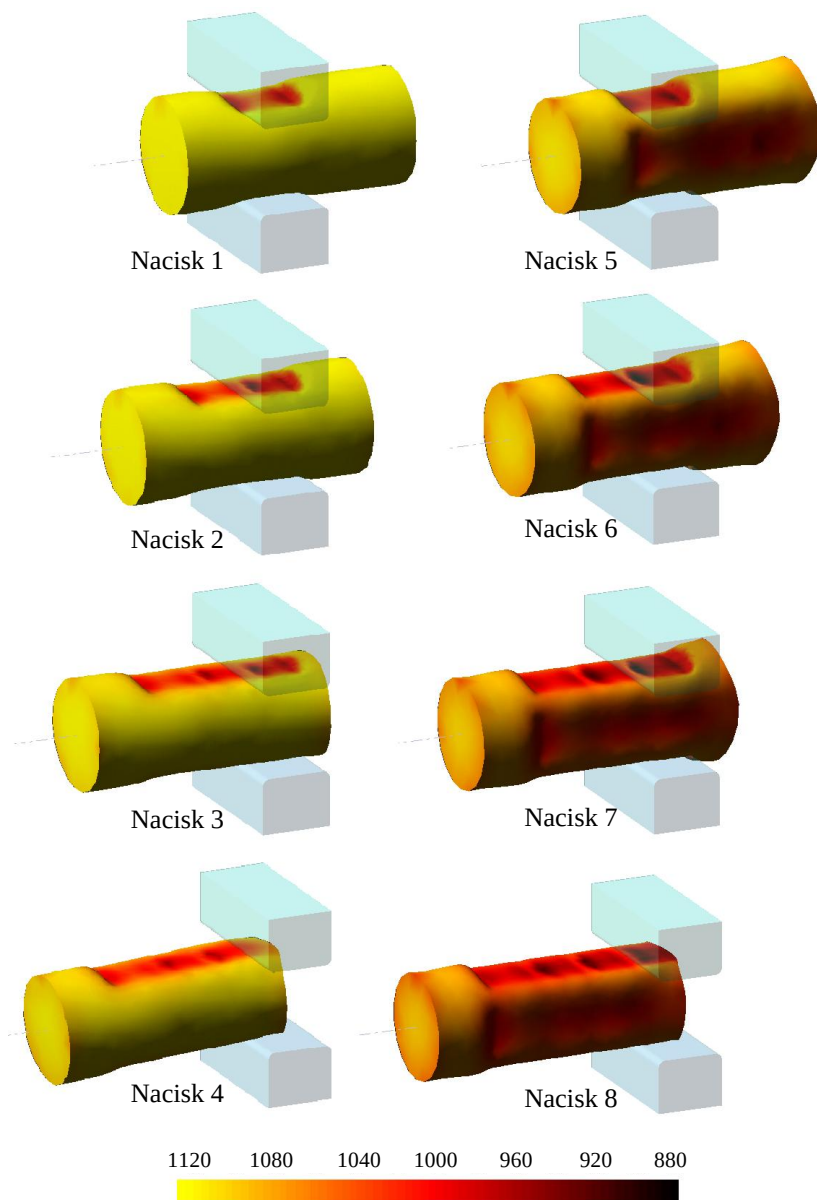
Procesy wydłużania można realizować stosując kowadła płaskie (rys. 6.13) lub profilowe (rombowe, półokrągłe, asymetryczne [14]). Drugi z wymienionych sposobów kształtowania, polecany w przypadku

kucia materiałów mniej plastycznych oraz wlewków okrągłych, zilustrowano graficznie na rys. 6.14.

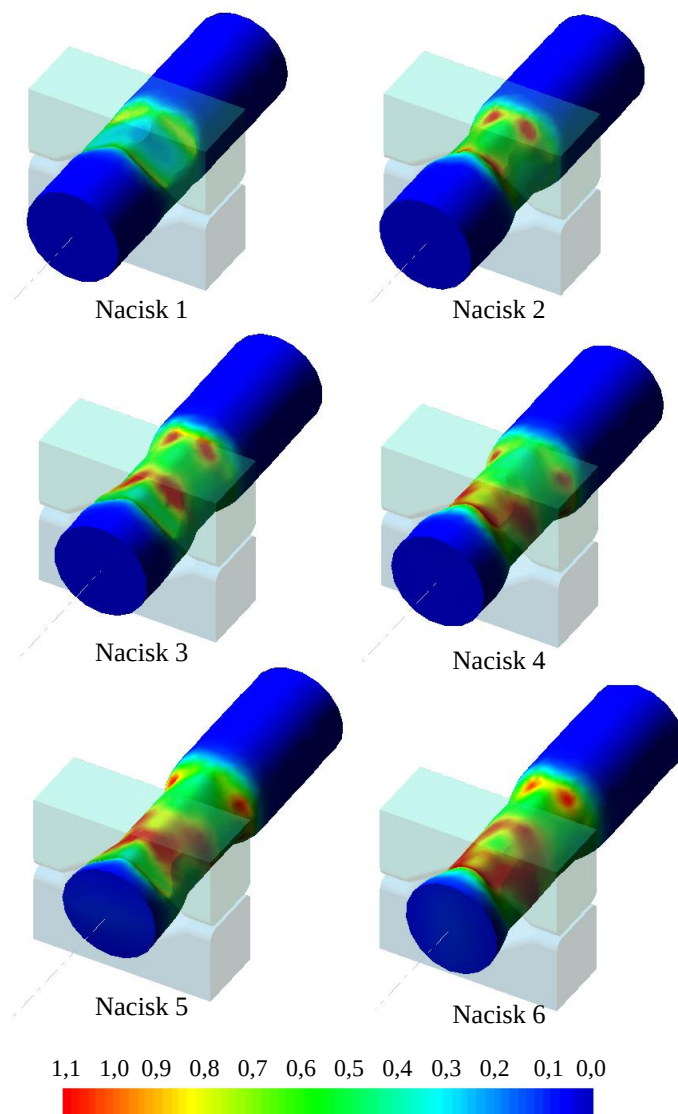
Proces wydłużania należy prowadzić w ten sposób by gniot jednostkowy ε – określony równaniem

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{\Delta h}{h}, \quad (6.5)$$

gdzie: h_0 , h , Δh wymiary zgodnie z rys. 6.10 – wynosił: dla pras $\varepsilon = 0,2 \div 0,3$ (powyżej zgniotu krytycznego); dla młotów $\varepsilon = 0,03 \div 0,06$ (poniżej zgniotu krytycznego).

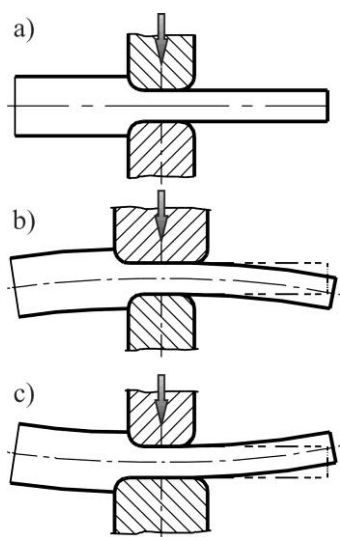


Rys. 6.13. Przebieg procesu wydłużania w kowadłach płaskich wsadu ze stali 12X18H9T o wymiarach początkowych $\varnothing 400 \times 800$ mm, realizowanego z gniotem 25% (z zaznaczonym rozkładem temperatury w °C)



Rys. 6.14. Przebieg procesu wydłużania w kowadłach rombowych (o kącie 90°) wsadu, ze stali 20XGHM, o wymiarach początkowych $\varnothing 100 \times 300$ mm na kwadrat o boku 80 mm (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia)

Kowadła przeznaczone do wydłużania powinny mieć powierzchnie czołowe wzajemnie równoległe oraz jednakową szerokość i jednakowe zaokrąglenia krawędzi. Przy niejednakowej szerokości kowadeł oś odkuwki ulega skrzywieniu (rys. 6.15), co powoduje niekorzystne i niebezpieczne warunki pracy kowala.



Rys. 6.15. Wpływ szerokości kowadeł na przebieg procesu wydłużania: a) kowadła o szerokości jednakowej; b) kowadło górne szersze od dolnego; c) kowadło górne węższe od dolnego [34]

Długość wyrobu l_n po n -tym przejściu oblicza się z zależności

$$l_n = \lambda_n \cdot l_{n-1}, \quad (6.6)$$

w której współczynnik wydłużenia λ_n określa się za pomocą wzoru Chile'a

$$\lambda_n = \frac{1}{1 - \varepsilon_n(1 - f_n)}, \quad (6.7)$$

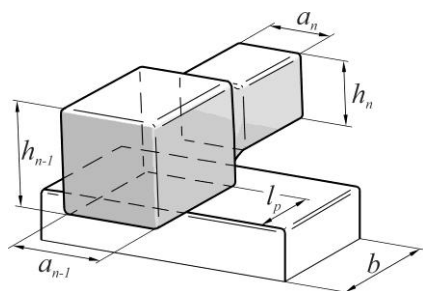
gdzie: ε_n – gniot w n -tym przejściu – zależność (6.5), f_n – współczynnik zależny od stosunku posuwu materiału na kowadło l_p do szerokości powierzchni zginatej przed przejściem a_{n-1} (rys. 6.16). Wartości współczynnika f_n można dobierać z wykresu przedstawionego na rys. 6.17.

Liczbę nacisków i_n prasy (uderzeń młota) przy uwzględnieniu danego gniotu ε_n wyznacza się dzieląc długość odkuwki (wsadu) l_{n-1} przez posuw l_p . Zatem

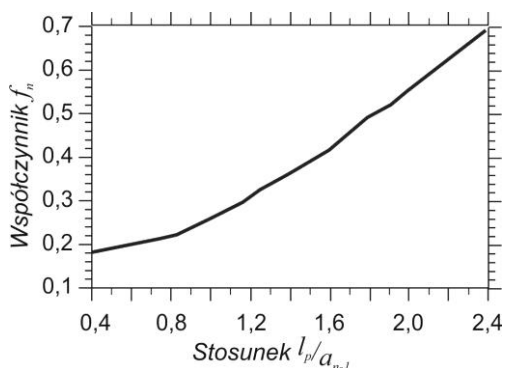
$$i_n = \frac{l_{n-1}}{l_p}. \quad (6.8)$$

Oprócz normalnych sposobów wydłużania na płaskich lub profilowych kowadłach dokonuje się wydłużenia stosując specjalne narzędzia pomocnicze. Do takich procesów zalicza się:

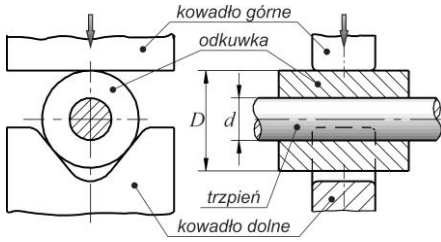
- wydłużanie na trzpieniu (rys. 6.18), za pomocą którego zwiększa się długość odkuwki drażonej przy jednoczesnym zmniejszeniu jej średnicy wewnętrznej; w procesie tym stosuje się dolne kowadło w kształcie litery V, górne – płaskie oraz trzpień o małej zbieżności;



Rys. 6.16. Zmiany wymiarów odkuwki w procesie wydłużania

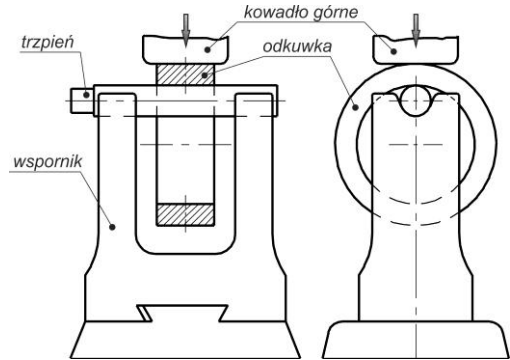


Rys. 6.17. Zależność współczynnika f_n od stosunku posuwu l_p do szerokości a_{n-1}

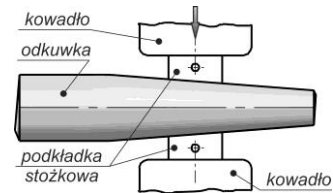


Rys. 6.18. Wydluzanie odkuwki pierścieniowej na trzpieniu [95]

- ❑ rozkuwanie pierścienia na trzpieniu (rys. 6.19) polegające na zwiększeniu średnicy zewnętrznej i wewnętrznej odkuwki kosztem zmniejszenia grubości jej ścianki;
- ❑ wydłużanie na stożek (rys. 6.20), które przeprowadza się za pomocą podkładek stożkowych.



Rys. 6.19. Rozkuwanie pierścienia pod młotem lub prasą [11]



Rys. 6.20. Wydłużanie na stożek [95]

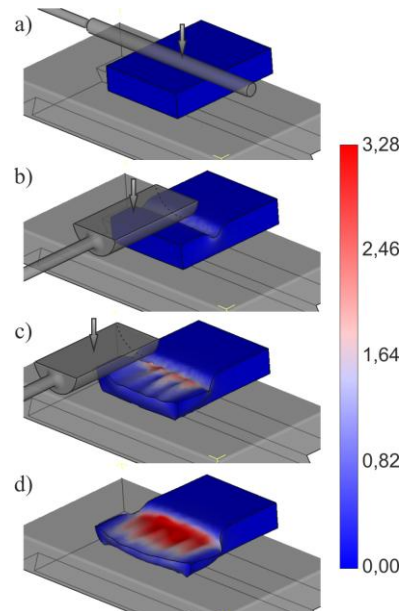
W procesie wydłużania wykorzystuje się szereg operacji pomocniczych. Najważniejsze z nich to: rozszerzanie, odsadzanie, przesadzanie.

Rozszerzanie

Rozszerzanie (poszerzanie) polega na zwiększeniu szerokości odkuwki, która wzrasta bardziej niż jej długość. Operację tę wykonuje się wywierając na materiał nacisk za pomocą żłobnika (rys. 6.21b, c). Przy czym stosuje się tu zasadę, iż rozszerzanie rozpoczyna się od środka. W przypadku gdy rozszerza się tylko część pręta, należy najpierw wykonać za pomocą odsadzki nacięcie w sposób pokazany na rys. 6.21a.

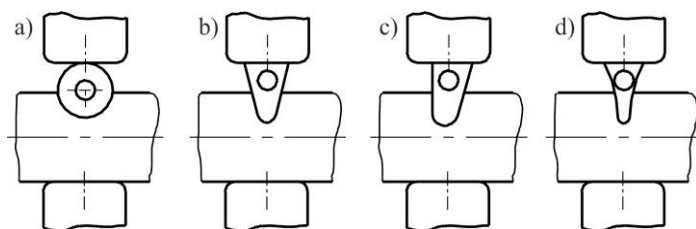
Odsadzanie

Odsadzanie, to zmniejszanie przekroju poprzecznego pręta w jednym kierunku od ściśle określonego miejsca. Operacja ta dzieli się na zabiegi: znaczenia, pogłębiania i wydłużenia. Znaczenie prowadzi się stosując

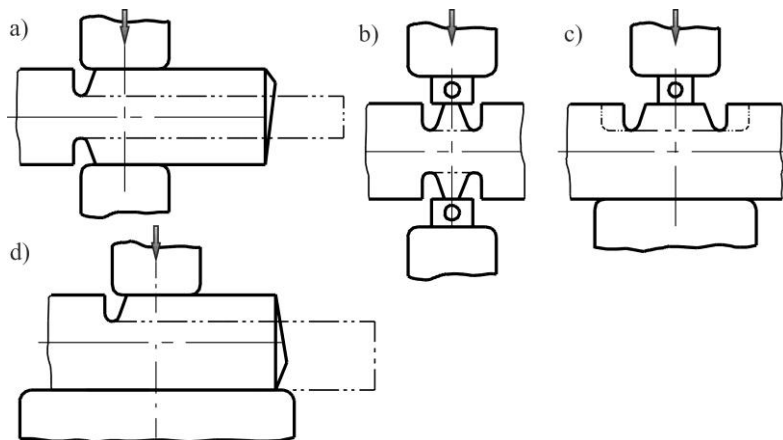


Rys. 6.21. Rozszerzanie z użyciem odsadzki i żłobnika płaskownika ze stali C35 o wymiarach 170x60 mm (pokazany rozkład intensywności odkształcenia)

odsadzkę o małym promieniu. Następnie znaczne miejsce pogłębia się za pomocą odsadzek o odpowiednim kształcie (rys. 6.22) po czym przeprowadza się zmniejszanie przekroju. Znaczenie i pogłębianie umożliwia zmniejszenie przekroju na końcu lub w środku odkuwki. Wówczas, gdy zmniejszenie przekroju występuje na znacznej długości to odsadzenie przeprowadza się bezpośrednio w kowadłach (rys. 6.23a). Natomiast, gdy długość odsadzenia jest mała to wykonuje się je za pomocą płaskich lub półokrągłych podkładek (rys. 6.23b). W przypadku, gdy zmniejszenie przekroju jest jednostronne, to dla zapewnienia dostatecznej gładkości powierzchni od strony wybrania odsadzenie wykonuje się za pomocą podkładki (rys. 6.23c) lub kowadełkami ustawionymi na krzyż (rys. 6.23d).



Rys. 6.22. Pogłębianie za pomocą odsadzek: a) okrągłej, b) i c) trójkątnej, d) kształtowej [95]

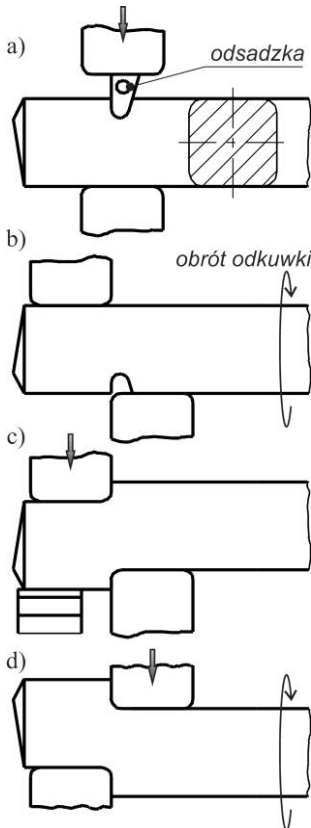


Rys. 6.23. Przykłady odsadzania: a) bezpośrednio w kowadłach, b) podkładkami płaskimi lub półokrągłymi, c) podkładką, d) kowadełkami ustawionymi na krzyż [95, 98]

Przesadzanie

Przesadzanie można zrealizować dwoma sposobami: z jednostronnym nadcięciem materiału (rys. 6.24) oraz z dwustronnym nadcięciem (rys. 6.25). Podczas przesadzania wg sposobu pierwszego materiał nadcina się od góry za pomocą

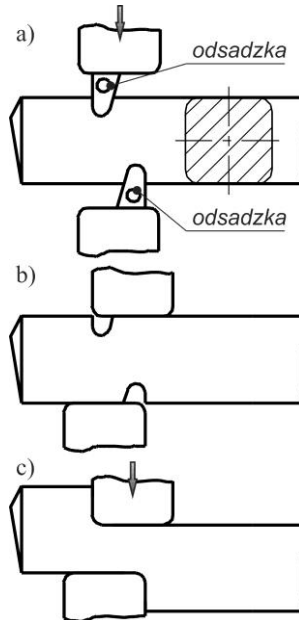
odsadzki trójkątnej (rys. 6.24a). Następnie materiał obraca się o 180° i umieszcza na kowadło dolnym w sposób zilustrowany na rysunku 6.24b. W efekcie



Rys. 6.24. Przebieg procesu przesadzania z jednostronnym nacięciem materiału (opis w tekście) [95]

nacisku kowadła górnego metal przemieszcza się wzdłuż lewej ściany kowadła dolnego (rys. 6.24c). Po ponownym obróceniu odkuwki o kąt 180° można zwiększyć przesadzenie do wielkości wymaganej (rys. 6.24d). Nierówności w miejscu

przesadzenia wyrównuje się na kowadłach płaskich.



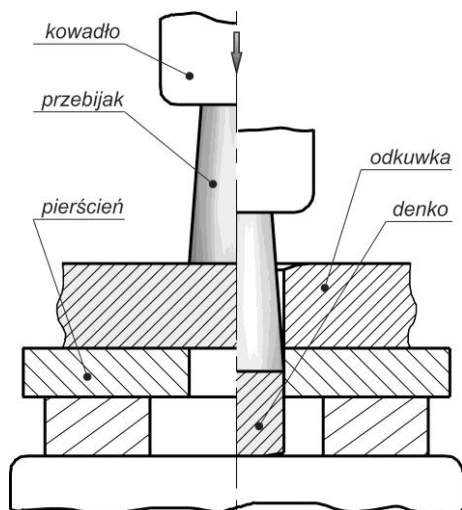
Rys. 6.25. Przebieg procesu przesadzania z dwustronnym nacięciem materiału (opis w tekście) [95]

Podczas przesadzania wg drugiego sposobu materiał nadcina się odsadzką trójkątną z dwóch stron (rys. 6.25a). Następnie przesuwają go tak by podczas uderzenia boczne ściany kowadeł były przesunięte od ścian prostopadłych nacięć (rys. 6.25b). Pod wpływem nacisku narzędzi następuje ostateczne przemieszczenie jednej części materiału względem drugiej (rys. 6.25c).

6.2.3. Dziurowanie

Dziurowaniem nazywa się operację kuźniczą, w efekcie której wykonuje się w odkuwce otwory lub wgłębienia. W praktyce stosuje się dwie metody zasadnicze dziurowania, tj: z podkładanym pierścieniem i bez podkładanego pierścienia.

Dziurowanie z podkładanym pierścieniem (rys. 6.26) nazywane także wycinaniem, stosuje się przy niewielkiej grubości materiału, mniejszej od wysokości przebijaka. Proces ten prowadzi się następująco: układa się nagrany mate-



Rys. 6.26. Dziurowanie z pierścieniem podkładanym przed przebicciem (rys. z lewej) oraz po przebicciu (rys. z prawej) [95]

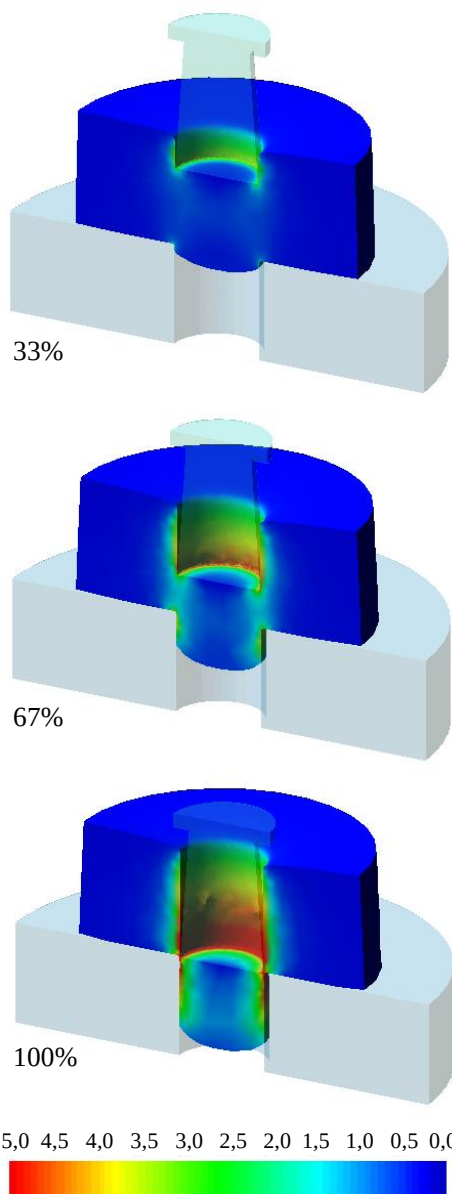
riał na pierścieniu spoczywającym na kowadło dolnym, na materiale ustawa się przebijak – centralnie do otworu w pierścieniu – większą średnicą ku dołowi, a następnie kowadłem górnym wciska się przebijak w materiał do momentu gdy dojdzie on do pierścienia. Przebieg przebijania odkuwki omawianym sposobem zilustrowano graficznie na rys. 6.27.

Siłę F wycinania można oszacować na podstawie zależności:

$$F = (0,7 \div 0,8) \sigma_p \pi d h, \quad (6.9)$$

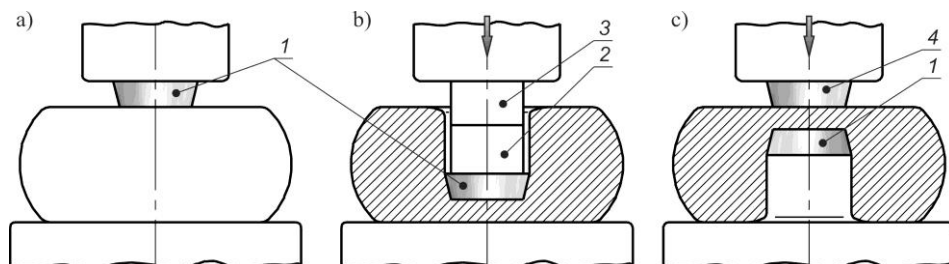
gdzie: h , d – wysokość i średnica odkuwki; σ_p – granica plastyczności materiału w temperaturze kucia (rys. 6.9).

Dziurowanie bez pierścienia podkładanego można zrealizować dwoma sposobami: przebijakiem pełnym oraz przebijakiem drążonym. Dziurowanie za pomocą przebijaka pełnego realizuje się w sposób następujący.



Rys. 6.27. Przebijanie na podkładanym pierścieniu przebijakiem pełnym o średnicy $\varnothing 300$ mm wsadu ze stali C45 o wymiarach $\varnothing 1000 \times 400$ mm, nagrzanego wstępnie do temperatury 1200°C przy temperaturze narzędzi 250°C (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia) oraz zaawansowaniu podanym na rysunku

Po ustawieniu materiału w osi prasy ustawia się na nim centralnie przebijać mniejszą średnicą skierowaną ku dołowi (rys. 6.28a). Po lekkim wgłębieniu przebijać wyjmuje się, a do wgłębienia wsypuje się miarę węglowy, który spalając się wydzielając gaz (tworząc warstwę izolacyjną między narzędziem i materiałem i przeciwdziałając w ten sposób zakleszczaniu przebijać) a następnie ustawia przebijać. Po wciśnięciu narzędzia na całą wysokość kontynuuje się dziurowanie umieszczając na przebijać nadstawki (rys. 6.28b), których liczba zależy od głębokości otworu. W momencie, gdy grubość denka osiągnie wartość odpowiadającą $10\div 15\%$ wysokości odkuwki obraca się ją i w środku śladu wyznaczonego wyraźnie przez przebijać wgłębiający ustawia się przebijać wycinający (rys. 6.28c), który służy do wycięcia denka i wypchnięcia przebijać wgłębiającego. Przebijać stosowany do wycinania powinien mieć nieco mniejszą średnicę od wgłębiającego, dla ułatwienia jego przejścia przez otwór.



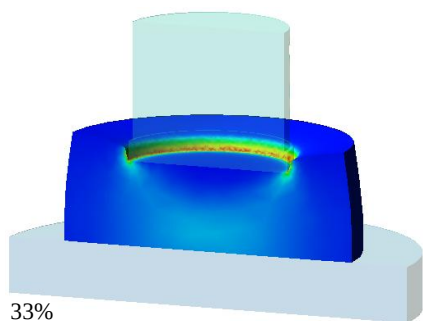
Rys. 6.28. Schemat procesu dziurowania odkuwki przebijać pełnym: 1 – przebijać pierwszy, 2 – nadstawka pierwsza, 3 – nadstawka druga, 4 – przebijać drugi [95]

Podstawową wadą tej metody dziurowania jest duże zniekształcenie odkuwki. Można je zaobserwować na kolejnych rysunkach 6.29 i 6.30, na których przedstawiono zmiany kształtu odkuwek podczas dziurowania przebijać pełnym. Należy tutaj podkreślić, iż zwiększenie średnicy przebijać (przy zachowaniu wymiarów wsadu) zwiększa zniekształcenia odkuwki, pogarszając jakość procesu wytwarzania. Drugą wadą procesu przebijania przebijać pełnym jest konieczność stosowania dużych sił, które również zwiększają się wraz ze średnicą wykonywanego otworu (rys. 6.31).

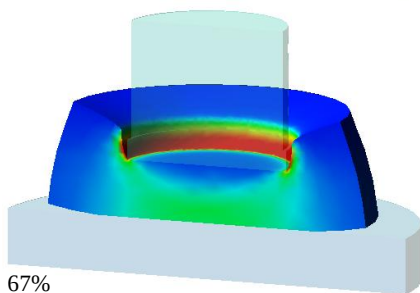
Dziurowanie przebijać drażnionym (rys. 6.32) stosuje się przy wykonywaniu w spęczkach otworów o średnicy większej niż 450 mm. W tej metodzie za pomocą przebijać i nadstawek wykonuje się we wlewku otwór na głębokość ok. $2/3$ grubości materiału. Następnie odkuwkę ustawia się na pierścieniu i kontynuuje kształtowanie aż do przebicia na wylot.

Przebijanie przebijką pełnym odznacza się szeregiem zalet takich jak:

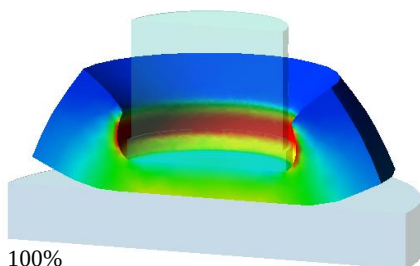
- ❑ wycinanie rdzenia wlewa, w którym przeważnie lokalizowane są wady materiałowe i uzyskiwanie odkuwek o dobrej jakości;
- ❑ zmniejszenie zniekształceń odkuwki występujących podczas przebijania (rys. 6.33);



33%



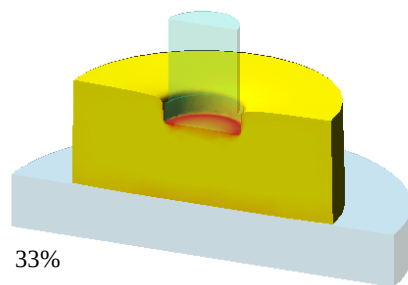
67%



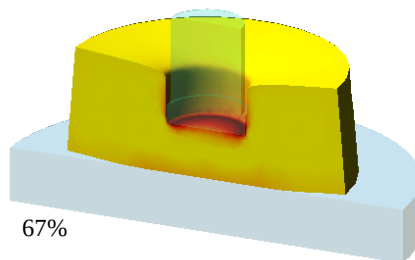
100%



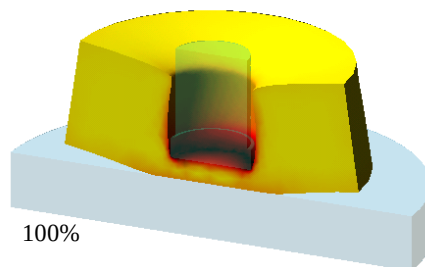
Rys. 6.29. Przebijanie przebijką pełnym o średnicy $\varnothing 600$ mm wsadu ze stali C45 o wymiarach $\varnothing 1000 \times 400$ mm, nagrzanego wstępnie do temperatury 1200°C przy temperaturze narzędzi 250°C (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia) oraz zaawansowaniu podanym na rysunku



33%



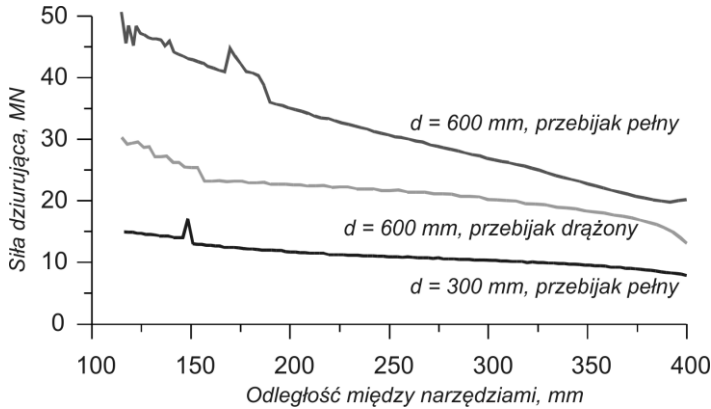
67%



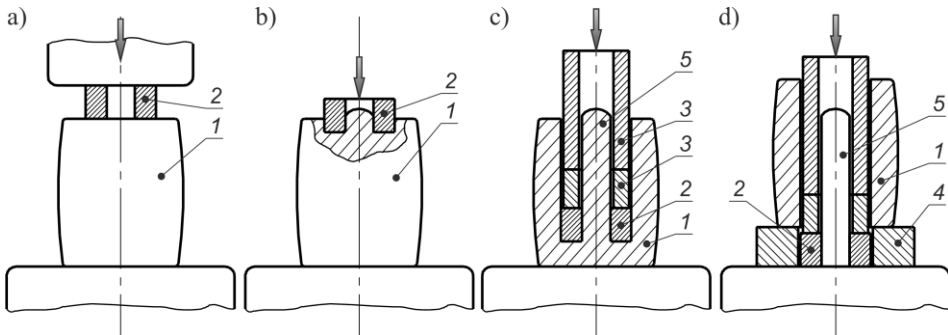
100%



Rys. 6.30. Przebijanie przebijką pełnym o średnicy $\varnothing 300$ mm wsadu ze stali C45 o wymiarach $\varnothing 1000 \times 400$ mm, nagrzanego wstępnie do temperatury 1200°C przy temperaturze narzędzi 250°C (z zaznaczonym rozkładem temperatury w $^\circ\text{C}$) oraz zaawansowaniu podanym na rysunku



Rys. 6.31. Porównanie sił (obliczonych MES) w procesach dziurowania otworu o średnicy d we wsadzie ze stali w gatunku C45 o wymiarach $\varnothing 1000 \times 400$ mm, nagrzanego wstępnie do temperatury 1200°C przy temperaturze narzędzi 250°C



Rys. 6.32. Dziurowanie odkuwki przebijakiem drążonym: 1 – odkuwka, 2 – przebijak drążony, 3 – nadstawka, 4 – pierścień, 5 – odpad wewnętrzny [95, 98]

- zmniejszenie sił kształtowania w stosunku do metody przebijania przebija-kiem pełnym (rys. 6.31);
- skrócenie czasu wykonania odkuwki.

Natomiast wadami tej metody są trudności występujące przy zdejmowaniu przebijaka z wyciętego rdzenia oraz duże odpady materiału.

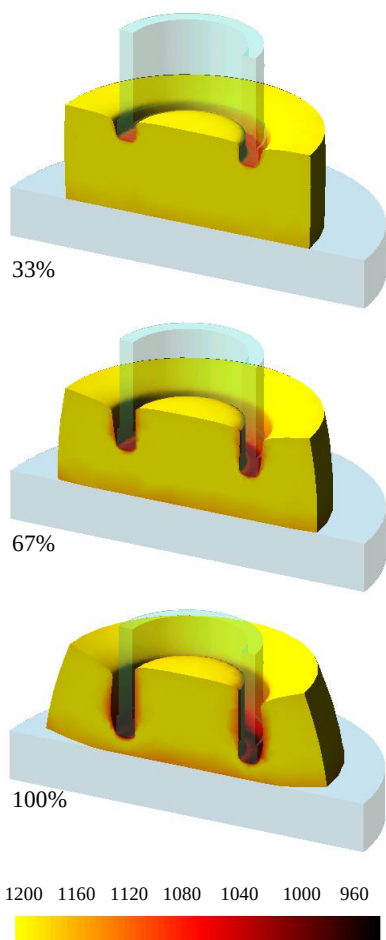
Siłę potrzebną do zrealizowania procesu dziurowania przebijakiem drążo-nym można oszacować z zależności [95]:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \left(2 + 1,1 \ln \frac{d_0}{d} \right) \sigma_p, \quad (6.10)$$

gdzie: d_0 – średnica odkuwki przed dziurowaniem, a pozostałe oznaczenia jak we wzorze (6.9).

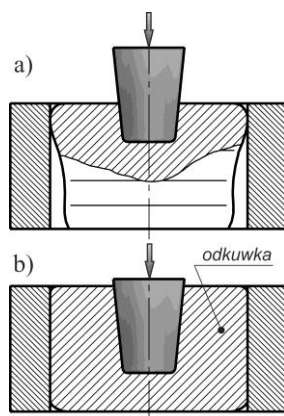
Odkuwki po operacji przebijania należy kuć na trzpieniu lub wykończyć ich kształt zewnętrzny. Dla uzyskania dokładnych wymiarów i regularnych kształ-

tów odkuwek z wgłębieniami, dziurowanie można przeprowadzić w dodatkowym pierścieniu, w sposób pokazany na rys. 6.34. Należy podkreślić, iż satysfakcjonujący przebieg dziurowania w pierścieniu zależy od właściwego doboru wielkości luzu pomiędzy wsadem a pierścieniem (można go dobrać np. na podstawie wyników symulacji numerycznych).

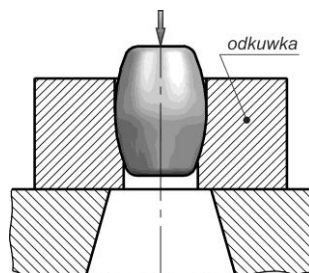


Rys. 6.33. Przebijanie przebijakiem drążonym o średnicy zewnętrznej $\varnothing 600$ mm wsadu ze stali C45 o wymiarach $\varnothing 1000 \times 400$ mm, nagrzanego wstępnie do temperatury 1200°C przy temperaturze narzędzi 250°C (z zaznaczonym rozkładem temperatury w $^{\circ}\text{C}$) oraz zaawansowaniu podanym na rysunku

Odpady występujące w procesie przebijania przebijakiem drążonym można zmniejszyć stosując przebijanie narzędziem o mniejszej średnicy zewnętrznej oraz dodatkowe rozepchnięcie przebitego otworu sworzniem beczkowym (rys. 6.35). Stosując tę metodę można przy produkcji seryjnej pierścieni otrzymać duże oszczędności materiałowe.



Rys. 6.34. Przebieg wgłębienia przy zastosowaniu pierścienia ograniczającego: a) początek; b) koniec wgłębienia [34]



Rys. 6.35. Powiększanie i wygładzanie otworu sworzniem beczkowym [34]

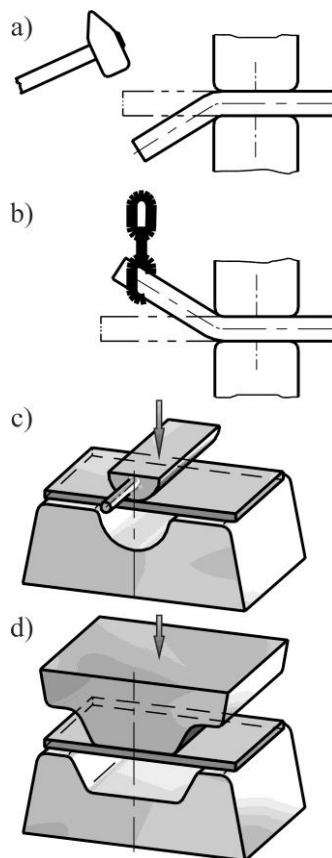
6.2.4. Gięcie

Gięciem nazywa się operację kuźniczą w wyniku której odkuwkom nadawany jest odpowiedni kształt bez zmiany zasadniczych przekroi poprzecznych. Ta operacja jest wykorzystywana podczas kucia haków, dźwigni różnego rodzaju, kątowników, wałów korbowych itd.

W miejscu gięcia warstwy zewnętrzne materiału są rozciągane, a wewnętrzne ściskane, co prowadzi do zniekształcenia przekroju poprzecznego. W efekcie część rozciągana ulega zwężeniu a ściskana poszerzeniu (patrz rozdział 4). W efekcie przekrój zginany jest najśłabszym przekrojem odkuwki. Dla uniknięcia tej wady należy w miejscu gięcia wykonać wstępne zgrubienie przekroju, które powinno być tak duże, aby w miejscu zagięcia występował jeszcze naddatek na końcowe wyrównanie i wygładzanie tej części odkuwki. Zgrubienia nie wykonuje się wówczas, gdy promień gięcia jest duży, a kąt zagięcia mały.

Gięcie prowadzi się na odcinkach krótkich. Przy czym pręty należy naginać bardzo blisko miejsc gięcia, a w przypadku cienkich płaskowników i prętów ze stali miękkiej proces gięcia można prowadzić na zimno.

Na rys. 6.36 pokazano niektóre ze stosowanych sposobów gięcia. W przypadku gięcia przedmiotów o małym przekroju poprzecznym można zacisnąć je między kowadłami i giąć uderzeniami młota (rys. 6.36a). Wyroby o większych przekrojach można zginać za pomocą suwnicy (rys. 6.36b). Natomiast podczas gięcia przedmiotów o mniejszych gabarytach można stosować komplety odpowiednio wykonanych podstawek i nadstawek (rys. 6.36c) lub matrycy (rys. 6.36d).



Rys. 6.36. Przebieg procesu gięcia: a) za pomocą młotka, b) za pomocą suwnicy, c) za pomocą podstawki i nadstawki, d) w matrycy [95, 98]

6.2.5. Cięcie

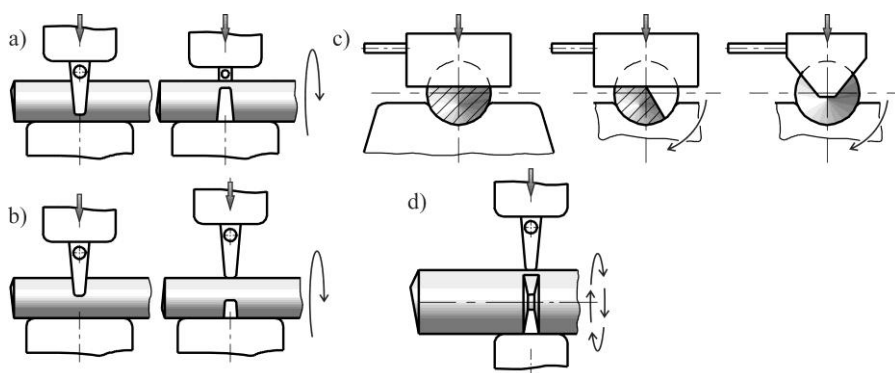
Cięciem nazywa się operację kuźniczą, w czasie której wykonuje się:

- ☐ podział materiału na części;
- ☐ odcięcie części odkutej od wsadu;

- ❑ odkuwki o kształtach złożonych, gdzie wymagane jest np. wycięcie środka, odcięcie końców, rozcięcie itd.;
- ❑ usunięcie nadmiaru materiału lub odpadów technologicznych (np. przy kuciu z wlewką odcięcie odpadu od strony stopy i głowy).

Cięcie realizuje się wykorzystując narzędzie zwane przecinakem. Rozróżnia się przy tym cztery główne sposoby cięcia:

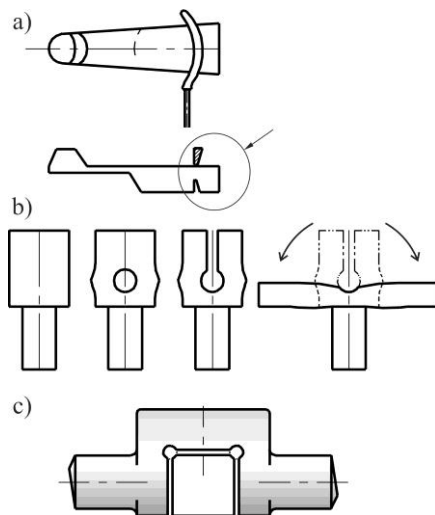
- ❑ Cięcie jednostronne (rys. 6.37a). Na odkuwkę nakłada się przecinak i lekko wciska w materiał. Następnie we wgłębienie wsypuje się sproszkowany węgiel, ponownie wkłada się przecinak i wbija się go w materiał na wymaganą głębokość. Z kolei wyjmuje się przecinak, obraca odkuwkę o 180° , umieszcza nad nadciętym miejscem podkładkę, która w wyniku naciśku kowadła górnego ostatecznie rozdziela odkuwkę na dwie części. Przy tym sposobie cięcia pozostaje odpad w postaci wąskiego mostka o szerokości przecinaka, ale powierzchnie cięcia są czyste i nie występują zadziory.
- ❑ Cięcie dwustronne (rys. 6.37b), w którym odkuwkę przecina się z dwóch przeciwległych stron do połowy jej grubości stosując przecinak o wysokości nie przekraczającej $\frac{3}{4}$ grubości ciętego materiału. Ta metoda cięcia powoduje powstawanie dużych zadziorów i jest stosowana wtedy, gdy oddzielana część materiału stanowi odpad.
- ❑ Cięcie trójstronne (rys. 6.37c), które przeprowadza się w kowadłach kształtowych. W tym sposobie dwa pierwsze cięcia wykonuje się przecinakami normalnymi a trzecie przecinakem o ostrzu nieco krótszym od średnicy ciętego pręta. To cięcie jest stosowane w przypadku przecinania materiału o przekroju okrągłym.
- ❑ Cięcie czterostronne (rys. 6.37d), w którym odkuwkę nacina się z czterech stron na głębokość zbliżoną do połowy grubości materiału. Następnie przecinak odwraca się i większą szerokością rozdziela odkuwkę na dwie



Rys. 6.37. Przebieg procesu przecinania: a) jednostronnego, b) dwustronnego, c) trójstronnego, d) czterostronnego [95]

części. W tej metodzie cięcia stosowanej na ogół do przecinania ciężkich odkuwek (wykonywanych bezpośrednio z wlewków) unika się powstawania dużych zadziorów.

Na kolejnym rys. 6.38 pokazano kilka sposobów cięcia takich jak: obcinanie kształtowe końców dźwigni (rys. 6.38a), rozcinanie i rozchyłanie z poprzedzającym je przebicciem otworu (rys. 6.38b) oraz wycinanie naddatków (rys. 6.38c) przy kuciu wału wykorbionego. Operację cięcia również stosuje się do wycinania wad miejscowych, szczególnie przy przekuwaniu odkuwek ze stali narzędziowych i szybkołnących.



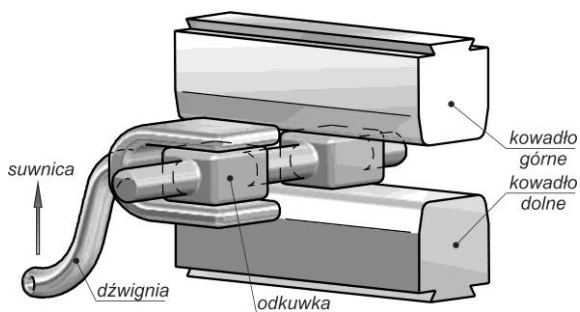
Rys. 6.38. Różne sposoby cięcia:
a) obcinanie kształtowe; b) rozcinanie;
c) wycinanie; [34]

6.2.6. Skręcanie

Skręcaniem nazywa się operację kuźniczą za pomocą której skręca się jedną część odkuwki względem drugiej o określony kąt. Wykorzystuje się ją podczas wykonywania odkuwek o kształtach złożonych, jak np. wały korbowe (z wykorbieniami leżącymi w różnych płaszczyznach), wiertła kręte, itd.

Skręcanie realizowane jest w ten sposób, iż jeden ze stopni odkuwki mocuje się na sztywno między kowadłami drugi zaś skręca za pomocą pokrętła lub dźwigni (rys. 6.39). Podczas skręcania w odkuwce powstaje niekorzystny stan naprężeń zbliżonych do czystego ścinania. W przypadku stali o małej ciągliwości lub jej nieodpowiedniego nagrzania może doprowadzić on nawet do pęknięcia odkuwki.

Proces skręcania można prowadzić tylko do określonego maksymalnego kąta skręcenia, który np. dla odkuwek ze stali węglowych (o zawartości węgla 0,3÷0,4%) wynosi 36°. W przypadku, gdy istnieje konieczność skręcania o kąt większy należy wykonywać je stopniowo, stosując za każdym razem dogrzewanie odkuwki. Powierzchnie skręcane powinny być gładkie i wolne od pęknięć



Rys. 6.39. Schemat procesu skręcania odkuwki

i zakuć. Przekrój odkuwki na całej długości podlegającej skręcaniu winien być stały.

Siłę skręcania F można oszacować na podstawie zależności:

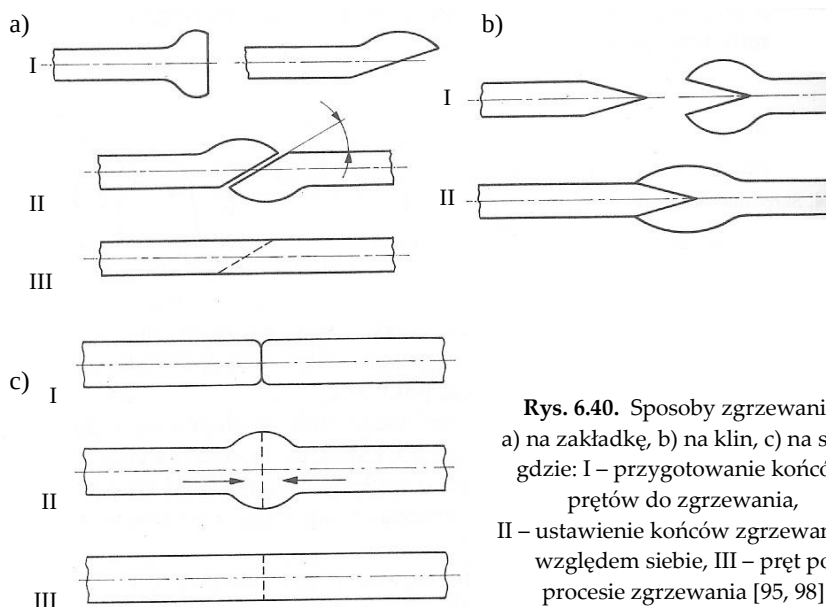
$$F = \frac{W \sigma_p}{l}, \quad (6.11)$$

gdzie: l – długość dźwigni, W – wskaźnik wytrzymałości przekroju (np. dla walca $W \approx 0,2 d^3$), σ_p – granica plastyczności materiału w temperaturze kucia (rys. 6.9).

6.2.7. Zgrzewanie

Zgrzewanie polega na połączeniu ze sobą przez obciśnięcie dwóch kawałków metalu nagrzewanych do odpowiedniej temperatury. Obecnie metoda ta jest rzadko stosowana ze względu na rozpowszechnienie zgrzewania elektrycznego lub spawania. Najczęściej stosowane sposoby zgrzewania kowalskiego pokazano na rys. 6.40. Są to:

- ❑ Zgrzewanie na zakładkę (rys. 6.40a). Końce części zgrzewanych spęca się i ukosuje. Następnie nagrzewa się je do odpowiedniej temperatury, oczyszcza ze zgorzeliny, układa jedną część na drugiej i szybkimi uderzeniami zgrzewa. W ten sposób można zgrzewać pręty o średnicy do 100 mm.
- ❑ Zgrzewanie na klin (rys. 6.40b). Jeden z końców pręta po nagrzaniu i spęczeniu nadcina się wzdłuż osi i odgina końce. Natomiast koniec drugiego pręta zaostcza się. Po oczyszczeniu ze zgorzeliny obu łączonych



Rys. 6.40. Sposoby zgrzewania:
a) na zakładkę, b) na klin, c) na styk,
gdzie: I – przygotowanie końców
prętów do zgrzewania,
II – ustawienie końców zgrzewanych
względem siebie, III – pręt po
procesie zgrzewania [95, 98]

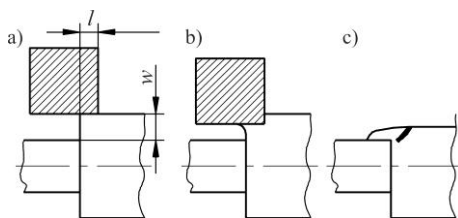
końców składa się je razem i przekuwa się miejsce łączenia za pomocą matryc półotwartych. Ta metoda zgrzewania daje lepsze rezultaty niż zgrzewanie na zakładkę i jest używana do zgrzewania dużych przekrojów lub części z różnych gatunków stali.

- ❑ Zgrzewanie na styk (rys. 6.40c). Jest to metoda gorsza od dwóch opisanych uprzednio, stosowana wówczas, gdy z powodu blisko położonego występu nie można wyciąć lub zukosować końców pręta. W tym sposobie końce prętów nagrzewa się, oczyszcza ze zgorzeliny, składa na styk i zgrzewa uderzeniami w kierunku osiowym. Następnie miejsce zgrzane (zgrubione) przekuwa się i wyrównuje na wymiar pręta.

6.3. Wady odkuwek kutyh swobodnie

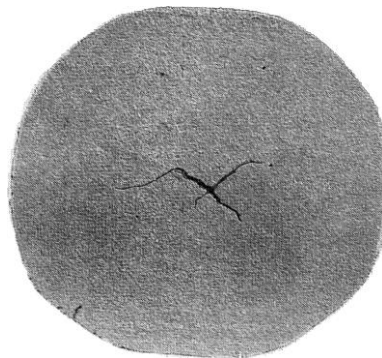
Wady wyrobów kutyh swobodnie mogą pochodzić z usterek materiałowych (powstających w procesie metalurgicznym lub podczas nagrzewania) lub wynikać z procesu kuźniczego. Te ostatnie mogą być tworzone w trakcie: kucia, obróbki cieplnej lub obróbki wykończającej. Poniżej podaje się ważniejsze z tych wad. Są to:

- ❑ Wgniecenia, czyli pojedyncze wgłębienia występujące na powierzchni odkuwki, charakteryzujące się różnymi kształtami i wymiarami. Najczęstszą przyczyną powstawania wady tego typu jest wprasowanie w materiał zgorzeliny.
- ❑ Zakucia, które powstają wskutek stosowania podczas wydłużenia zbyt dużych nacisków. Jeden z możliwych schematów powstawania wady tego typu pokazano na rys. 6.41.
- ❑ Zniekształcenia będące mechanicznymi uszkodzeniami odkuwek, następującymi w efekcie uderzenia młota lub nacisku prasy w momencie, gdy odkuwki te znajdują się w położeniu niewłaściwym.
- ❑ Niezgodność wymiarów, która powstaje w wyniku przekroczenia dopuszczalnych odchyłek (np. w efekcie zbyt dużego zużycia kowadeł).
- ❑ Niewłaściwy przebieg włókien, który jest wadą wtedy, gdy warunki techniczne przewidują ciągłość włókien i ich równoległość do powierzchni odkuwki, zaś wskutek źle przeprowadzonego procesu włókna są poprzeczane lub odchylane w sposób znaczący od powierzchni odkuwki.



Rys. 6.41. Powstawanie zakuc w procesie wydłużania, gdy $l < w$: gdzie: a, b, c – kolejne etapy [34]

- ❑ Rysy i pęknięcia, które powstają w odkuwce podczas kucia i zwykle powodowane są: rysami występującymi w materiale wyjściowym, niską temperaturą kucia odkuwek ze stali stopowych oraz zbyt szybkim chłodzeniem odkuwek.
- ❑ Krzyż kucia będący pęknięciami wewnątrz odkuwki układającymi się w kształcie krzyża (rys. 6.42). Powodem tej wady jest niewłaściwa temperatura kucia, niewłaściwe przekuwanie pręta kwadratowego na okrągły oraz zastosowanie niewłaściwych kowadeł. Wada ta powstaje w wyniku występowania naprzemiennych naprężeń rozciągających i ściskających (będących następstwem obracania odkuwki podczas wydłużenia) doprowadzających do niskocyklowego zmęczenia plastycznego materiału.



Rys. 6.42. Pęknięcia, zwane krzyżami kucia, w odkuwce ze stali szybkochnącej [34]

7. Kucie matrycowe

Kucie matrycowe jest metodą obróbki plastycznej wyrobów objętościowych na gorąco, półgorąco lub na zimno (rzadziej spotykaną), w której materiał jest kształtowany w matrycy poprzez zginięcie uderzeniem lub naciskiem. Matrycowany materiał wypełnia wykrój znajdujący się w matrycy (narzędziu) i przyjmuje jego kształt. Wykrój lub wykroje są projektowane w ten sposób, aby ograniczały swobodne płynięcie materiału. Wyrobem końcowym jest odkuwka matrycowa.

Kucie matrycowe jest jedną z podstawowych i najbardziej rozpowszechnionych technologii obróbki plastycznej stosowaną w przemyśle. Produkcja kuźni w krajach należących do Unii Europejskiej na przełomie XX i XXI wieku wynosiła średnio 1,5÷2,0 mln ton rocznie odkuwek matrycowych, w przedziale wagowym od 0,05 kg do ok. 60 kg. Tylko w samej Polsce, produkcja odkuwek matrycowych skupia się w kilkunastu dużych zakładach kuźniczych, zasilających rynek wykraczający poza granice państwa, oraz w kilkudziesięciu zakładach mniejszych, w których produkcja odkuwek matrycowych nie jest jedyną działalnością. Dzieje się tak dlatego, że produkcja masowa wyrobów metalowych, gdzie odkuwka matrycowa jest uwzględniana w systemie produkcyjnym, jest najbardziej opłacalna (pomijając aspekty poprawy własności mechanicznych wyrobów finalnych). Dotyczy to przede wszystkim przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, rolniczego oraz przemysłu ciężkiego, maszynowego i zbrojeniowego. Największe zakłady kuźnicze działające na terenie Polski są zrzeszone w Związku Kuźnictwa Polskiego (ZKP) z siedzibą w Krakowie.

Podstawową klasyfikacją kucia matrycowego jest podział ze względu na maszynę, na której jest realizowany proces. Wyróżnia się procesy kucia matrycowego przeprowadzane na [8, 22, 39, 75, 92, 95, 98]:

- ❑ młotach matrycowych – gdzie metal jest zginięty pod wpływem uderzenia (jedno- lub wielokrotnego), odkształcanie jest realizowane w sposób dynamiczny, a praca odkształcania wynika z przekazanej energii uderzenia;
- ❑ prasach kuźniczych (korbowych, śrubowych i hydraulicznych) – metal jest zginięty w wyniku nacisku wywieranego przez narzędzie i odkształca się w sposób statyczny (dlatego podstawowym parametrem pras jest siła nacisku suwaka);

- ❑ walcach kuźniczych;
- ❑ maszynach specjalnych, np. na kuźniarkach, trójsuwakowych prasach kuźniczych (TPK), prasach z wahającą matrycą oraz z użyciem przyrządów specjalnych (np. przyrząd TR).

W dalszej części rozdziału zostanie omówiona technologia kucia matrycowego realizowana głównie na młotach oraz prasach kuźniczych.

7.1. Charakterystyka procesu

7.1.1. Definicje, klasyfikacja

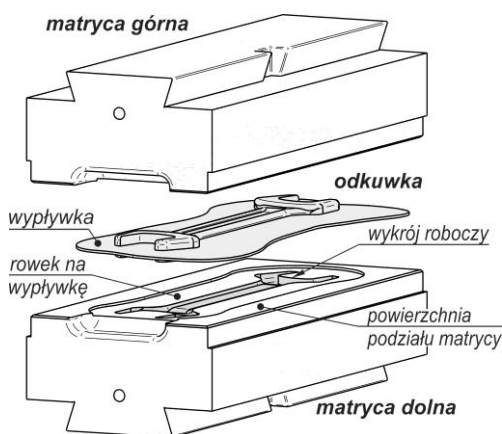
Proces wykonania odkuwki matrycowej jest złożoną technologią, składającą się z wielu operacji i zabiegów. Najważniejsze operacje to: cięcie materiału, nagrzew materiału (jeśli jest wymagany; względnie wstępna obróbka cieplna w przypadku kucia na zimno), operacje kucia (np. kucie przedkuwki i odkuwki na różnych maszynach lub jedna operacja kucia wielozabiegowego na jednej maszynie), operacje wykańczające (np. okrawanie wypływki, wycinanie denka, dziurowanie otworów itd.), operacja obróbki cieplnej odkuwki (np. normalizacja), operacja czyszczenia odkuwki (np. śrutowania lub piaskowania, w celu usunięcia zgorzeliny) oraz operacje końcowe (np. kalibrowanie, dogniatanie, prostowanie itd.). W skład procesu technologicznego wchodzi również operacje kontroli jakości, zarówno materiału wejściowego, odkuwki tuż po obróbce cieplnej, jak również finalnego produktu.

Operacja kucia matrycowego jest realizowana na maszynie kuźniczej (młocie lub prasie) przy użyciu narzędzi, które nazywane są matrycami. Matryce zawierają wykrój roboczy, w którym jest kształtowany materiał, oraz posiadają powierzchnię (płaszczyznę) podziału (rys. 7.1).

W zależności od konstrukcji

matryc wyróżnia się proces kucia w matrycach o konstrukcji (rys. 7.2):

- ❑ zamkniętej – proces charakteryzuje się tym, że objętość odkuwki jest równa objętości wykroju roboczego;



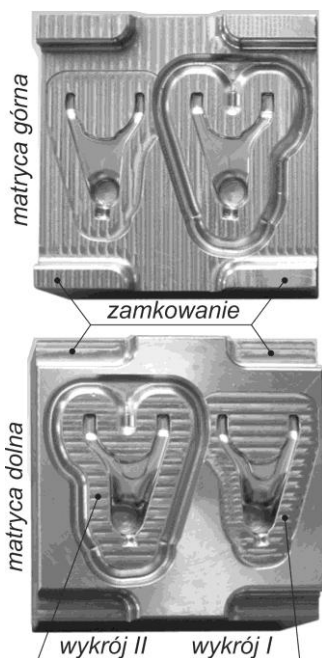
Rys. 7.1. Poglądowa konstrukcja matrycy (jednowykrojowa, do kucia na młotach) wraz odkuwką i wypływką

- ❑ otwartej – w płaszczyźnie podziału matrycy wykonuje się rowek na wypływkę, czyli na nadmiar materiału wypływający na zewnątrz wykroju roboczego w końcowej fazie procesu kucia.

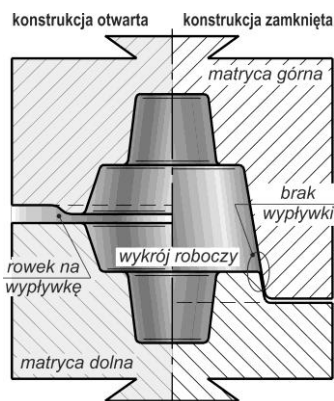
Natomiast, w zależności od ilości wykrojów roboczych, wyróżnia się matryce:

- ❑ jednowykrojowe (np. przedstawione na rys. 7.1);
- ❑ wielowykrojowe (rys. 7.3) – gdzie kucie materiału realizowane w każdym osobnym wykroju nazywa się zabiegiem (szczegóły na ten temat znajdują się w dalszej części rozdziału).

Można również sklasyfikować matryce ze względu na sposób wykonania w nich wykrojów roboczych. Zgodnie z tym podziałem, wyróżnia się matryce:



Rys. 7.3. Fotografia przedstawiająca zestaw matryc wielowykrojowych do kucia na gorąco [29]



Rys. 7.2. Różnice pomiędzy otwartą a zamkniętą konstrukcją matrycy stosowanej do kucia matrycowego (opis w tekście)

- ❑ jednolite – cała matryca, wraz z wykrojami oraz elementami mocującymi i prowadzącymi (zamki), jest wykonywana z jednego bloku (kostki) materiału; taki sposób najczęściej preferowany jest w przypadku kucia na młotach;
- ❑ składane – wykroje są wykonywane jako wkładki, które są osadzane w korpusie matrycy lub w specjalnych oprawkach; ten sposób wykonania narzędzi stosowany jest najczęściej podczas kucia na prasach;
- ❑ dzielone – wkładki matrycowe są wykonywane jako dwie przystające części, które w trakcie kucia (na prasach) przylegają do siebie, natomiast po zakończeniu kucia oddalają się w celu łatwiejszego wyjęcia odkuwki; takie rozwiązanie stosuje się w przypadku złożonego kształtu odkuwki, który wymusza zastosowanie więcej niż jednej powierzchni podziału.

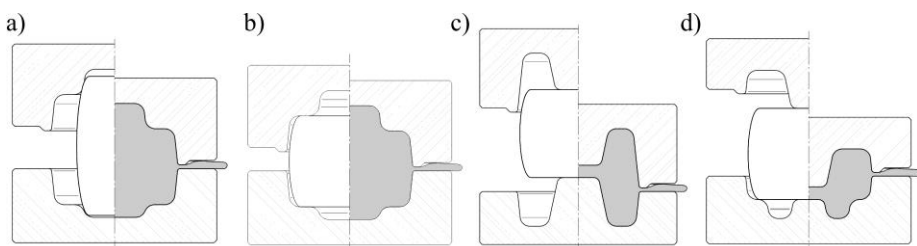
Więcej informacji na temat matryc znajduje się w rozdziale 7.5.

7.1.2. Kinematyka płynięcia materiału

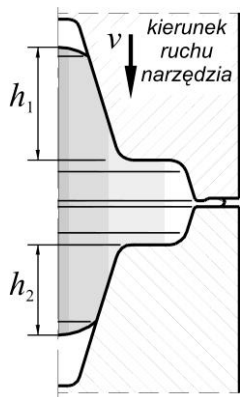
Sposób płynięcia materiału podczas jego odkształcania poprzez kucie matrycowe zależy zarówno od kształtu i wymiarów wykroju roboczego, jak również od kształtu i wymiarów wsadu. Przyjmując, że wsadem jest pręt o określonej średnicy i wysokości, to w zależności od stosunku tych wymiarów do wymiarów charakterystycznych opisujących wykroj roboczy, sposób płynięcia materiału będzie różny. Wyróżnia się zatem cztery sposoby kucia matrycowego, mianowicie poprzez:

- ❑ spęczanie (rys. 7.4a) – jest to najprostszy schemat płynięcia metalu i występuje, gdy średnica wsadu jest mniejsza od średnicy czopa; taki sposób płynięcia materiału jest najbardziej pożądaný, szczególnie przy kuciu na prasie; podczas doboru materiału wsadowego należy zawsze dążyć, aby proces kucia był realizowany według tego schematu;
- ❑ wyciskanie (rys. 7.4b), gdy średnica wsadu jest większa od średnicy czopa; kucie w matrycach otwartych według tego schematu, szczególnie na prasach, zawsze powoduje nadmierne wypływanie metalu do rowka na wypływkę;
- ❑ spęczanie i dziurowanie (rys. 7.4c);
- ❑ spęczanie, dziurowanie i wyciskanie (rys. 7.4d) – najbardziej złożony schemat płynięcia materiału, który najczęściej występuje w warunkach rzeźwistych (tj. gdy odkuwka posiada bardzo złożony kształt).

Na sposób płynięcia metalu ma również wpływ prędkość ruchu narzędzi. W przypadku kucia matrycowego na młotach, dynamiczny charakter uderzenia matrycy wywołuje tzw. zjawisko bezwładnościowego wypełniania wykroju roboczego matrycy (rys. 7.5). Powstająca dodatkowa siła inercyjna, której zwrot jest zorientowany przeciwnie do prędkości narzędzia, powoduje zróżnicowanie wysokości czopów h_1 oraz h_2 (rys. 7.5). Podczas kucia na młotach, zawsze jest spełniony warunek, że $h_1 > h_2$, przy czym czop o wysokości h_1 znajduje się w matrycy ruchomej. Natomiast przy kuciu na prasach, z uwagi na statyczny charakter ruchu narzędzi, wysokości te są sobie równe. Reasumując, podczas



Rys. 7.4. Podstawowe sposoby wypełniania wykroju roboczego, gdzie lewa strona schematu przedstawia przedkuwkę (wsad), natomiast prawa – odkuwkę (opis w tekście)



Rys. 7.5. Efekt zjawiska wypełniania bezwładnościowego wykroju roboczego podczas kucia na młotach (opis w tekście)

projektowania procesu kucia na młotach, wysokie występy w odkuwce są umieszczane zawsze w wykroju górnej matrycy (ruchomej). Aby taki charakter kształtowania wystąpił podczas kucia, musi być spełniony empiryczny warunek Guanga (7.1), który w przypadku kucia matrycowego realizowanego na młotach jest zawsze spełniony [73].

$$v \geq 0,082 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho}} \quad (7.1)$$

gdzie: v – prędkość odkształcania, σ_p – granica plastyczności, ρ – gęstość materiału.

Wypełnianie wkroju roboczego przez kształtowany materiał podczas kucia matrycowego przebiega etapowo. W przypadku kucia w **matrycach otwartych** (rys. 7.6), proces ten można podzielić na cztery zasadnicze etapy. Pierwszy etap (rys. 7.6a) rozpoczyna się z chwilą zetknięcia się matrycy górnej z metalem – rozpoczyna się proces (przeważnie) swobodnego spęczania materiału wsadowego. Metal pod wpływem uderzeń (lub nacisku) matrycy górnej zmniejsza swoją wysokość, a zwiększa średnicę zewnętrzną, przybierając jednocześnie kształt wypukły. Pojawienie się takiego kształtu świadczy o tym, że metal odkształca się nierównomiernie, a przyczyną jest tarcie pomiędzy materiałem a ściankami wykroju roboczego – typowy rozkład intensywności odkształcenia w przekroju poprzecznym materiału kształtowanego przedstawiono na rys. 7.6. Wynika z niego jednoznacznie, że w metalu występuje kilka charakterystycznych stref o różnym stopniu zgniotu oraz schemacie odkształcenia. Metal przylegający do powierzchni czołowych matryc prawie w ogóle nie ulega odkształceniu trwałemu i przemieszcza się razem z narzędziami (są to tzw. strefy martwe). Natomiast, obszar centralny materiału jest wszechstronnie ściskany, a jego odkształcenie plastyczne jest największe.

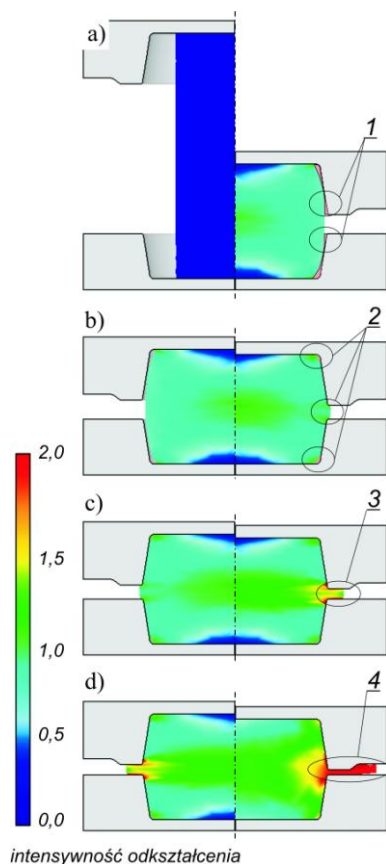
Drugi etap wypełniania wykroju roboczego rozpoczyna się z momentem zetknięcia się materiału z bocznymi ściankami matryc (szczegół 1 na rys. 7.6a). W tej fazie metal w dalszym ciągu jest spęczany, a pod wpływem nacisku narzędzi płynie na boki powodując wypełnianie wykroju roboczego. Etap ten kończy się z chwilą, kiedy nadmiar metalu zacznie wypływać między matryce. Pod koniec tego etapu, wykrój jest już praktycznie wypełniony przez metal, z wyjątkiem naroży i krawędzi (szczegół 2 na rys. 7.6b). W fazie tej, następuje nieznaczny wzrost siły kształtowania, który jest spowodowany zwiększaniem się sił tarcia występujących na ściankach bocznych wykroju.

W kolejnym etapie, nadmiar materiału wypływa na zewnątrz wykroju tworząc okalający pierścień w postaci wypływki (szczegół 3 na rys. 7.6c). Naddatek ten powoduje zwiększenie oporów płynięcia metalu na zewnątrz wykroju roboczego (poprzez zmniejszenie plastyczności wypływki oraz powstanie sił tarcia na powierzchni kontaktu materiału z rowkiem), a w efekcie – zmusza materiał do wypełnienia wolnej przestrzeni w narożach matrycy. Jest to istotne zadanie rowka wypływki w kuciu matrycowym.

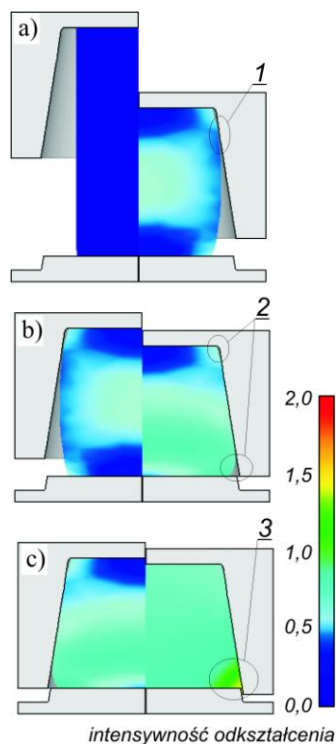
Ostatni, czwarty etap kucia matrycowego w matrycach otwartych (rys. 7.6d) jest szczególnie ważny w trakcie realizacji procesu na młotach. Aby uzyskać wyrób o żądanych wymiarach (i dokładności), należy wykonać kilka dodatkowych uderzeń matrycą górną. Powoduje to, że nadmiar materiału zostaje wypchnięty do magazynka rowka, ale niestety kosztem gwałtownego wzrostu siły kształtowania. Cechą tego etapu jest uzyskanie dużego stopnia niejednorodności odkształcenia odkuwki, gdzie największe przekucie jest w obszarze wypływki.

Podczas kucia w **matrycach zamkniętych** (rys. 7.7), proces składa się z trzech etapów. Dwa pierwsze są bardzo podobne do etapów obserwowanych przy kuciu w matrycach otwartych. Etap drugi rozpoczyna się w momencie zetknięcia się materiału z bocznymi ściankami (szczegół 1 na rys. 7.7a), a kończy się z chwilą prawie całkowitego wypełnienia wykroju roboczego – pozostają jedynie niewypełnione naroża oznaczone jako szczegół 2 na rys. 7.7b.

W ostatnim, trzecim etapie materiał wypełnia wszystkie wolne naroża (w szczególności strefę zaznaczoną na rys. 7.7c jako szczegół 3), a odkuwka osiąga ostateczną wysokość. Przy czym, uzyskany stopień przerobu plastycznego metalu, podczas kucia w matrycach zamkniętych, jest praktycznie jednakowy w całej objętości odkuwki. Bardzo ważną kwestią jest dokładne dobranie



Rys. 7.6. Etapy wypełniania wykroju roboczego przez materiał wraz z rozkładem intensywności odkształcenia w przekroju poprzecznym odkuwki (opis w tekście)



Rys. 7.7. Etapy wypełniania wykroju roboczego przez materiał podczas kucia w matrycy zamkniętej; rozkład intensywności należy porównać z rys. 7.6

objętości materiału wsadowego, ponieważ jego niedobór powoduje niewypełnienie wykroju, natomiast jego nadmiar może przyczynić się do zakleszczenia się narzędzi (metal próbuje wpływać w szczelinę pomiędzy matrycami – szczegół 3 na rys. 7.7c).

Porównując etapy procesu kucia w matrycach otwartych i zamkniętych, które przedstawiono na rys. 7.6 i rys. 7.7, można wskazać podstawową różnicę pomiędzy tymi dwoma sposobami kucia. Mianowicie, przy kuciu w matrycach otwartych występuje naddatek zarówno na wypływkę, jak i na zgorzelinę (gdy proces jest realizowany na gorąco). Natomiast w matrycach zamkniętych nie ma nadatku na wypływkę, co powoduje zwiększenie uzysku materiału o około 10÷30% oraz obniżenie masy odkuwki o 2÷5%. Eliminacja konieczności okrawania wypływkę powoduje, że przy kuciu w matrycach zamkniętych następuje korzystne skrócenie cyklu produkcyjnego.

Podsumowując, zaletami procesu kucia w matrycach zamkniętych, w stosunku do kucia w matrycach otwartych, są:

- ❑ brak strat materiałowych na wypływkę;
- ❑ korzystniejszy przebieg włókien w od-

kuwce, a tym samym lepsze własności wytrzymałościowe;

- ❑ użyteczna energia maszyny jest zamieniana tylko na pracę odkształcenia plastycznego odkuwki, a przy kuciu w matrycach otwartych również na ukształtowanie wypływkę.

Niestety, kucie w matrycach zamkniętych posiada również wady (oczywiście w stosunku do procesu realizowanego w matrycach otwartych), tj.:

- ❑ niską trwałość matrycy;
- ❑ mniejszą uniwersalność metody – można kształtować tylko odkuwki o prostych kształtach, nie posiadające uźebrowań i wysokich występów;
- ❑ konieczność dokładnego cięcia materiału wsadowego;
- ❑ konieczność centrowania wsadu (tj. właściwego ustawienia) w wykroju matrycującym;
- ❑ na ogół większe siły kształtowania, wynikające z trójosiowego ściskania materiału.

7.1.3. Porównanie kucia na młotach z kuciem na prasach

Porównanie ogólne

Podczas kucia matrycowego na młotach kształtowanie materiału odbywa się w sposób dynamiczny, co powoduje m.in. wcześniej opisane zjawisko bezwładnościowego wypełniania wykroju roboczego. Materiał płynie bardziej powierzchniowo, a energia kinematyczna ruchomych części młota jest tylko częściowo przekształcana w pracę odkształcenia – sprawność młotów nie przekracza 5%. Jednak zaletą tych maszyn kuźniczych jest ich uniwersalność. Biorąc dodatkowo pod uwagę cechy kucia realizowanego w matrycach otwartych, możliwości technologiczne młotów kuźniczych są bardzo wszechstronne. Niestety dynamiczny charakter pracy tych maszyn wywiera negatywny wpływ na zdrowie człowieka i środowisko naturalne. Przykładem może być tutaj jedna z polskich kuźni na Śląsku Cieszyńskim, która z uwagi na powstające drgania i hałas podczas pracy młotów, musiała wymienić park maszynowy na prasy kuźnicze.

Natomiast w przypadku kucia matrycowego na prasach korbowych, proces kształtowania odkuwki realizowany jest poprzez wywołanie ciągłego i (względnie) powolnego nacisku części roboczych prasy. Powstały nacisk powoduje odkształcanie materiału w całej objętości wyrobu oraz jednocześnie intensywniejsze płynięcie metalu na boki. Zaletami kuźniczych pras korbowych są:

- ☐ spokojna, pozbawiona wstrząsów praca maszyny;
- ☐ duża dokładność prowadzenia suwaka;
- ☐ sztywność korpusu oraz części prowadzących;
- ☐ wyposażenie maszyny w wyrzutnik dolny oraz górny.

Zalety te umożliwiają wykonanie odkuwek o dużej dokładności wymiarowej z małymi pochyleńkami kuźniczymi i małymi nadadkami na obróbkę mechaniczną. Jednak w porównaniu z młotami matrycowymi, prasy korbowe mają następujące wady:

- ☐ mniejszą uniwersalność;
- ☐ podwyższony koszt technologii kucia, szczególnie dla małych serii;
- ☐ duży stopień trudności ustawienia matrycy oraz pracochłonne przygotowanie maszyny do pracy;
- ☐ niedokładne ustawienie narzędzi może spowodować przeciążenie, zakleszczenie lub uszkodzenie narzędzi;
- ☐ kucie odkuwek wymagających użycia dużych nacisków zmniejsza trwałość prasy, wymuszając przeprowadzenie jej regeneracji;
- ☐ przed kuciem w wykrojach matrycujących materiał musi być pozbawiony zgorzeliny.

Przy kuciu matrycowym na prasach śrubowych energia układu napędowego jest przekształcana na pracę użyteczną za pomocą niesamohamownego mechanizmu śrubowego. Takie rozwiązanie konstrukcyjne prasy sprawia, że maszyna ma zdolność akumulowania znacznej ilości energii kinetycznej ruchu obrotowego koła zamachowego, a w trakcie realizacji procesu kucia energia ta jest zamieniana na pracę odkształcenia oraz nacisk. Pozwala to na kształtowanie odkuwek które wymagają:

- ❑ zastosowania energochłonnych operacji kucia, w których odkształcenie plastyczne jest duże, a nacisk mały;
- ❑ lub użycia bardzo dużego nacisku przy małej energochłonności, gdyż odkształcenie plastyczne jest niewielkie (np. kucie łopatek turbin).

Dla pras śrubowych wyróżnia się trzy wartości nacisku, jaki może być wywierany podczas ruchu suwaka. Jest to nacisk:

- ❑ nominalny – wartość charakterystyczna dla pras śrubowych (określa ich typoszeręg), która jest brana pod uwagę podczas projektowania procesu kucia; przy tym nacisku aż 80÷85% energii efektywnej jest przekształcane na odkształcenie plastyczne materiału;
- ❑ dopuszczalny – wynosi 1,6 nacisku nominalnego, ale przy którym tylko 45÷50% energii efektywnej jest wykorzystywana na odkształcenie plastyczne odkuwki;
- ❑ maksymalny – jest to największa wartość nacisku jaką może uzyskać prasa przy tzw. twardym uderzeniu, podczas którego odkształcenie plastyczne jest równe zero; dla pras śrubowych wyposażonych w bezpiecznik cierny wartość maksymalna nacisku jest dwa razy większa od nominalnego, a bez bezpiecznika – 2,8 razy większa.

Istotną cechą pras śrubowych jest brak ograniczeń kinematycznych dla przesunięcia suwaka. Oznacza to, że proces kucia można realizować aż do zetknięcia się matryc. W efekcie dokładność wymiarowa odkuwek na wysokości jest największa spośród wszystkich metod kucia. W sytuacji, gdy energia uderzenia matrycy jest zbyt mała, aby matryce mogły się całkowicie zetknąć, powtarza się uderzenie. Możliwość ta eliminuje wadę niedokucia.

Prasy śrubowe nadają się do realizacji kucia zarówno w matrycach otwartych, jak i w zamkniętych. Ustawienie matrycy jest operacją łatwą i mało pracochłonną, ponieważ nie wymaga się regulacji wysokości zamkniętej matrycy. Związane jest to z brakiem dokładnego ustawienia dolnego położenia suwaka.

Największą zaletą pras śrubowych jest prędkość liniowa suwaka, gdzie największa wartość wynosząca 0,6÷1,5 m/s jest osiągnięta w momencie zetknięcia matryc (tj. w końcowym etapie kucia). Jest to wartość optymalna przy kuciu różnych gatunków stali i stopów żelaznych na gorąco. Uderzenie z taką

prędkością wywołuje naprężenia w matrycach 5÷10 razy mniejsze niż podczas kucia na młotach. Najważniejszymi wadami pras śrubowych są:

- ❑ brak możliwości wykonywania operacji wstępnych, które należy wykonywać na innych maszynach (prasach hydraulicznych, kuźniarkach);
- ❑ uderowe działanie (pionowe i skrętne) na fundament;
- ❑ konieczność przesterowań w układzie sterowania podczas pracy ciągłej;
- ❑ znaczne odkształcenia kątowe (skrętne) korpusu w czasie skoku roboczego.

Porównanie najpopularniejszych maszyn kuźniczych, pod kątem ich zastosowania do realizacji kucia matrycowego, zestawiono w tabeli 7.1. Niektóre parametry podano w wartościach procentowych, biorąc za bazę wartość jednej z porównywanych maszyn.

Tabela 7.1.

Porównanie maszyn kuźniczych pod kątem ich wykorzystania do kucia matrycowego

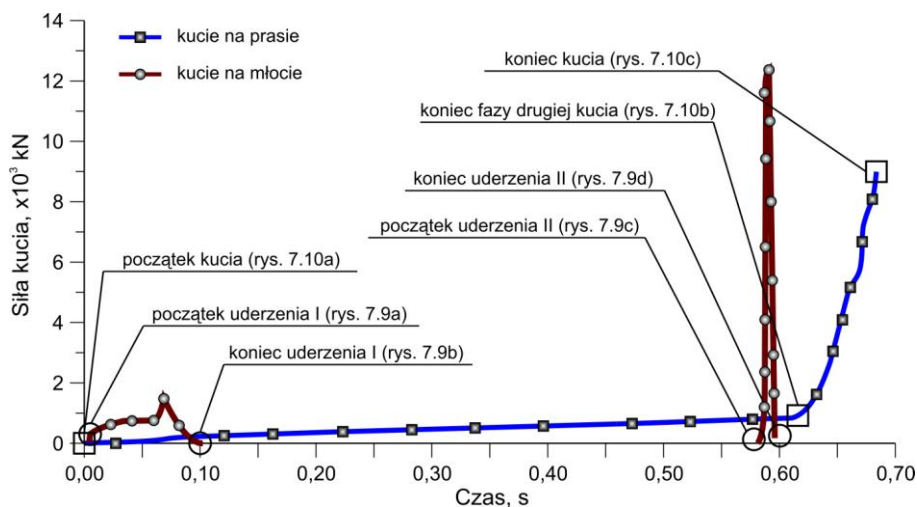
Parametr	Wartość parametru dla maszyny kuźniczej		
	 Młot parowo-powietrzny	 Prasa korbowa	 Prasa śrubowa
Nacisk nominalny, MN	6÷250	6,3÷110	0,25÷125
Energia efektywna, kJ	6,3÷1000	30÷3000	1÷5000
Prędkość suwaka, m/s	4÷7	0,1÷0,5	0,6÷1,5
Względny skok suwaka (bijaka)	100%	20÷25%	40÷60%
Względna ilość skoków suwaka w jednostce czasu	100%	20÷35%	20÷35%
Względny czas styku odkuwki z matrycą: ogólny (pod obciążeniem)	300% (8÷15%)	100%	130÷175% (10÷40%)
Wyrzutnik	brak	górny i dolny	dolny
Kompensacja odkształceń sprężystych korpusu i matrycy	tak	nie	tak
Koszt wykonania odkuwki	90÷100%	100%	50÷75%
Koszt wykonania matrycy	100%	80÷90%	60÷70%

Porównanie na przykładzie

Na rys. 7.8 przedstawiono porównanie obliczonych sił kucia dla przykładowego procesu kucia na gorąco odkuwki, wykonanej ze stali węglowej, który został zrealizowany na młocie oraz prasie kuźniczej. Proces kucia na młocie składa się z dwóch uderzeń, w trakcie których dostarczana energia jest przekształcana na pracę odkształcenia. Matryca górna w momencie styku z materiałem osiąga maksymalną prędkość równą ok. 1,2 m/s. Wraz ze zginiataniem materiału prędkość ta jest wytracana i maleje do zera w czasie ok. 0,10 s (przy uderzeniu I) oraz 0,02 s (przy uderzeniu II). Przerwa pomiędzy uderzeniami jest związana z koniecznością podniesienia bijaka młota i przygotowania go do kolejnego uderzenia. W tym czasie materiał w ogóle nie ma kontaktu z narzędziem górnym, w odróżnieniu od procesu kucia na prasie, w który narzędzia pozostają w ciągłym kontakcie z materiałem.

Przy kuciu na prasie przyjęto w obliczeniach, że matryca górna przemieszcza się ze stałą prędkością (0,1 m/s) wywierając nacisk, którego wartość zmienia się bardzo powoli. Obserwowany niewielki wzrost siły wynika głównie z powiększania się powierzchni styku narzędzi ze spęczanym materiałem. Dopiero w momencie rozpoczęcia tworzenia się wypływkę następuje gwałtowny wzrost siły kucia.

Na kolejnych rysunkach 7.9 i 7.10 przedstawiono wyniki obliczeń MES dla charakterystycznych faz kucia matrycowego. Fazy te zostały zaznaczone na wykresach sił pokazanych na poprzednim rys. 7.8. Szczególną uwagę zwrócono na rozkład temperatury w materiale. Jak wiadomo, podczas kucia na młotach

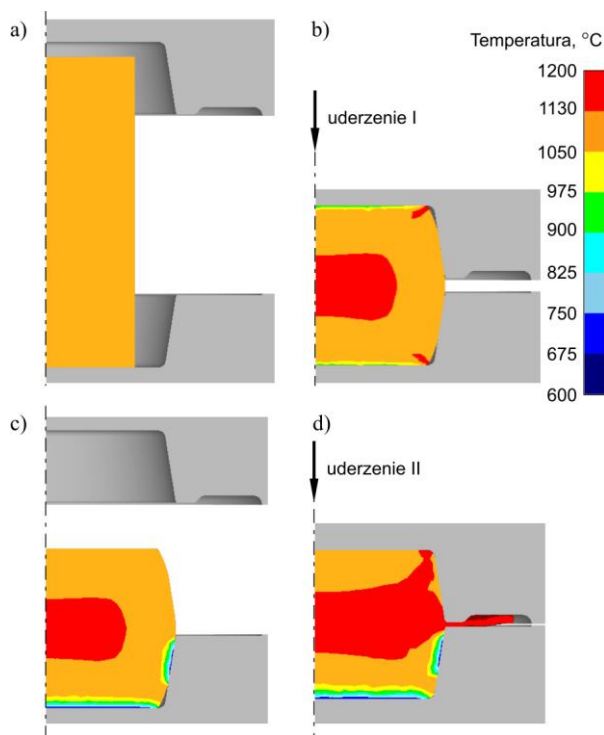


Rys. 7.8. Przebieg siły kucia obliczony za pomocą MES dla procesu kucia matrycowego na młocie i na prasie (opis w tekście)

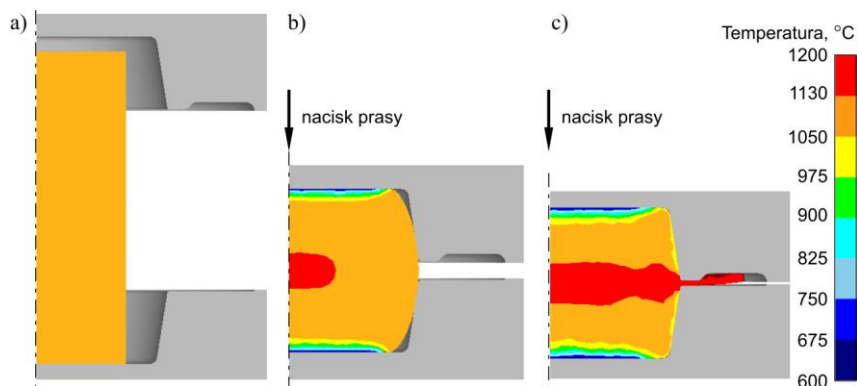
prędkość odkształcenia materiału osiąga duże wartości – w otoczeniu wypływkę jest dwukrotnie większa niż dla kucia na prasie. Przekłada się to na większy strumień ciepła generowanego w wyniku odkształcenia plastycznego. Ponieważ strumień ten jest mniejszy niż strumień ciepła przekazywanego do otoczenia

(głównie do narzędzi), to podczas kucia na młotach obserwuje się wzrost temperatury w znacznej objętości materiału. Natomiast w przypadku kucia na prasach, wydłużony czas kontaktu matrycy z metalem powoduje, że w strefie przy powierzchni tego kontaktu odprowadzone ciepło przyczynia się do znaczącego obniżenia temperatury materiału.

Ciekawym zjawiskiem jest wzrost temperatury zaobserwowany w wypływie. Powodem tego zjawiska jest bardzo intensywne odkształcanie się materiału w tej strefie. Ilość powstałego ciepła (tj. efekt przekształcenia pracy odkształcenia plastycznego i pracy



Rys. 7.9. Kucie matrycowe na młocie – charakterystyczne fazy procesu oznaczone na rys. 7.8



Rys. 7.10. Kucie matrycowe na prasie – charakterystyczne fazy procesu oznaczone na rys. 7.8

tarcia na energię cieplną) jest tak duża, że wielokrotnie przekracza ciepło oddawane do powierzchni rowka na wypływkę. Paradoksalnie, do tej pory powszechne uważano, że wypływka intensywnie stygnie już podczas kucia.

7.2. Odkuwki matrycowe

7.2.1. Ogólny podział odkuwek

Idea podziału odkuwek matrycowych na grupy jest związana z potrzebą zarówno określenia procedury postępowania podczas opracowania procesu technologicznego, jak i również wykonania odkuwki taką metodą kucia, która gwarantuje najbardziej optymalne warunki (np. ekonomiczne). Odkuwki, które np. pokazano na rys. 7.11, można pogrupować w trzy podstawowe grupy ze względu na ich kształt oraz orientację kierunku kucia. Zatem, wyróżnia się odkuwki:

- ❑ czołowe, które posiadają kształt bryły obrotowej o rzucie kołowym, wielobocznym lub krzyżowym – do tej grupy odkuwek zalicza się odkuwki pełne posiadające czopy lub kołnierz, odkuwki pełne typu tarczy, odkuwki z otworem przelotowym, odkuwki typu pierścieni, odkuwki drażone typu tulei oraz odkuwki z trzonem; odkuwki tego typu są wykonywane poprzez spęczanie w kierunku pionowej (głównej) osi materiału wsadowego, który jest najczęściej w postaci odcinka pręta;
- ❑ wydłużone, które charakteryzują się długością większą od wymiarów poprzecznych – do tej grupy wyrobów zalicza się odkuwki proste, wygięte oraz posiadające rozwidlenia lub odgałęzienia; odkuwki z tej grupy są kute w kierunku prostopadłym do osi wydłużonej materiału wsadowego, na ogół pokrywającej się z osią główną wyrobu; wsadem jest albo pręt (rzadziej) lub przedkuwka (część), którą wykonuje się w matrycach wielowykrojowych w jednej operacji (kucie na młotach) lub na osobnej maszynie kuźniczej w odrębnej operacji (np. przy kuciu na prasach);



Rys. 7.11. Typowe odkuwki matrycowe, kute w polskich kuźniach

- ❑ kombinowane, najczęściej o złożonym kształcie wymagającym kucia co najmniej w dwóch orientacjach, najczęściej w kierunku osi głównej oraz w kierunku poprzecznym do osi; proces kucia takich odkuwek jest zazwyczaj wielooperacyjny, gdzie każda operacja jest realizowana na osobnej maszynie – np. kucie na młotach korpusu jako odkuwki wydłużonej, a następnie spęczanie na kuźniarce tarczy (rys. 7.12).

W zasadzie każdą odkuwkę matrycową można wykonać za pomocą przynajmniej dwóch alternatywnych metod, przy czym zawsze istnieje metoda uprzywilejowana, związana z cechami maszyny kuźniczej. Wybór danego sposobu matrycowania zazwyczaj wynika z zaplecza kuźni (tj. posiadanego parku maszynowego). Przykładowo, odkuwki czołowe pełne z czopem, kołnierzem lub piastą (rys. 7.13) można wykonać za pomocą:

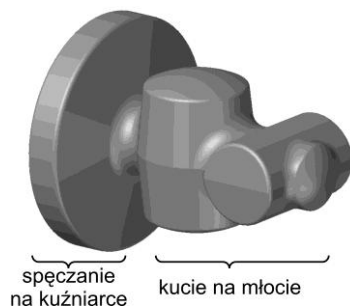
- ❑ kucia w matrycach otwartych na młotach lub prasach korbowych;
- ❑ kucia z pręta na kuźniarkach;
- ❑ prasowania na prasach z wahającą matrycą (przy małej wysokości odkuwki, posiadającej cienkie tarcze).

Odkuwki czołowe z trzonem można matrycować metodą:

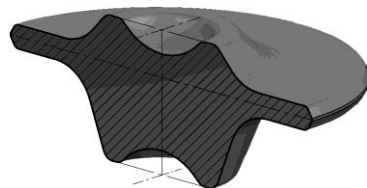
- ❑ spęczania i kucia na kuźniarkach, prasach korbowych lub śrubowych;
- ❑ wyciskania trzona na prasach korbowych lub hydraulicznych;
- ❑ kształtowania trzona na kowarkach;
- ❑ spęczania na elektrospeczarkach.

Natomiast odkuwki czołowe drażnione, np. typu tulei (rys. 7.14) lub typu kół zębatych wykonać można sposobem:

- ❑ kucia na prasach korbowych lub hydraulicznych z otworem nieprzelotowym (denkiem), który jest wykonywany na gotowo w kolejnej operacji (patrz rozdział 8);
- ❑ spęczania i kucia z pręta na kuźniarkach (przy małych wgłębieniach) z otworem przelotowym;



Rys. 7.12. Przykład odkuwki kombinowanej, w której tarczę i korpus wykonano różnymi metodami kucia



Rys. 7.13. Przykład odkuwki czołowej pełnej z kołnierzem

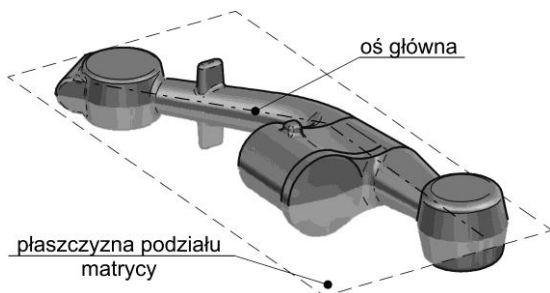


Rys. 7.14. Przykład odkuwki czołowej typu tuleja

- ❑ prasowania z przedkuwki lub wsadu drażonego na prasach z wahającą matrycą (przy małej wysokości odkuwki).

Z kolei odkuwki wydłużone, zarówno proste, wygięte oraz posiadające np. rozwidlenia lub odgałęzienia (rys. 7.15), są przeważnie matrycowane z użyciem przedkuwki metodą:

- ❑ jednooperacyjnego kucia na młotach w matrycach wielowykrojowych, gdzie zarówno przedkuwka jak i odkuwka są wykonywane za pomocą tej samej matrycy;
- ❑ kucia odkuwki na prasach z przedkuwki wstępnie wykonanej w odrębnej operacji, przy użyciu innej maszyny kuźniczej (np. zgodnie z rys. 7.16).



Rys. 7.15. Przykład odkuwki wydłużonej wygiętej, posiadającej odgałęzienia



Rys. 7.16. Przykład wykonania odkuwki korbowodu sposobem kucia wielokrotnego z wykorzystaniem przedkuwki wykonanej metodą walcowania poprzeczno-klinowego

7.2.2. Podział odkuwek na grupy z przeznaczeniem na maszynę kuźniczą

Klasyczny podział odkuwek matrycowych jest ściśle związany z ich przeznaczeniem do wykonania w określonej maszynie kuźniczej. Podział ten również oparty jest na kształcie odkuwki i orientacji kierunku kucia, ale często dodatkowo uwzględnia się inne cechy, istotne dla danej metody kucia. Powoduje to, że nadrzędne grupy odkuwek są dzielone na podgrupy, a nawet na typy (tak jest to robione np. w przypadku kucia na młotach). Celem rozbudowania klasyfikacji odkuwek było maksymalne uproszczenie opracowania procesu technologicznego oraz konstrukcji oprzyrządowania. Reasumując, do każdego rodzaju odkuwki jest przypisany ściśle określony sposób postępowania, który składa się w zasadzie z dobrze znanych, elementarnych schematów.

Odkuwki matrycowe **kute na młotach** dzieli się na trzy główne grupy, wśród których dodatkowo wyróżnia się trzy typy (odmiany), mianowicie:

- ❑ grupa I – są to odkuwki wydłużone, które dzieli się dodatkowo na cztery podgrupy, tj: odkuwki z osią wydłużoną prostą (np. odkuwki typu wałów,

korbowodów, uźebrowanych lub płaskich o złożonym przekroju poprzecznym), z osią wygiętą (z linią podziału matryc prostą lub wygiętą), odkuwki mające występy (o osi wygiętej lub wydłużonej) lub rozwidlenia (o różnym kształcie i wymiarach) – w sumie w tej grupie wyróżnia się 12 różnych odmian odkuwek;

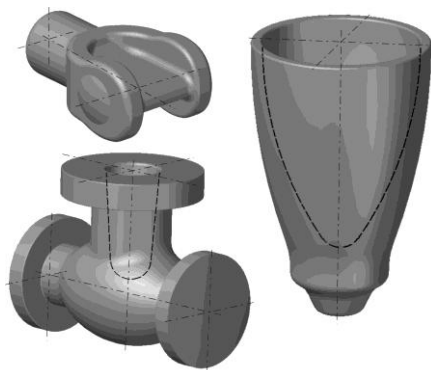
- ❑ grupa II – są to odkuwki czołowe pełne z czopem, kołnierzem lub piastą, które posiadają w płaszczyźnie podziału zarys okrągły (typ A), kwadratowy lub zbliżony do kwadratowego (typ B) lub są typu krzyżaków (typ C), przy czym ten ostatni typ odkuwek musi mieć skupioną największą objętość materiału w środkowej części, o kształcie okrągłym lub kwadratowym;
- ❑ grupa III – do tej grupy zalicza się odkuwki, których kształt i wymiary zajmują pośrednie położenie pomiędzy grupą I oraz grupą II (typ A), które składają się z elementów należących do jednej z dwóch poprzednich grup (typ B) lub są odkuwkami kombinowanymi (typ C).

Z kolei odkuwki matrycowe **kute na prasach korbowych** dzieli się na cztery grupy:

- ❑ grupa I – odkuwki czołowe posiadające w płaszczyźnie podziału matryc zarys okrągły lub zbliżony do okrągłego;
- ❑ grupa II – są to odkuwki wydłużone, posiadające oś główną prostą; w zależności od różnic przekrojów poprzecznych, odkuwki są wykonywane bezpośrednio z materiału wyjściowego lub z przedkuwki wykonanej wstępnie na innej maszynie kutej;
- ❑ grupa III – są to odkuwki wydłużone, posiadające oś główną wygiętą;
- ❑ grupa IV – odkuwki czołowe, najczęściej z trzonem, wykonywane za pomocą wyciskania współbieżnego lub przeciwbieżnego, które posiadają na końcu zgrubienie – są to np. zawory, odkuwki rozwidlone typu zwrotnic, odkuwki z otworami przelotowymi lub z jednostronnym wgłębieniem; odkuwki z tej grupy wykonuje się w matrycach zamkniętych z jedną lub dwiema płaszczyznami podziału.

Odkuwki matrycowe **kute na prasach śrubowych** dzieli się na trzy grupy (7.17):

- ❑ grupa I – są to drobne odkuwki wydłużone, z osią główną prostą lub wygiętą, mogące posiadać występy i rozwidlenia;
- ❑ grupa II – są to drobne, o średniej wielkości odkuwki czołowe typu zaworów, sworzni, śrub, szklanek i czasz;



Rys. 7.17. Typowe odkuwki matrycowe (reprezentujące trzy grupy), które są wykonywane na prasach śrubowych

- ❑ grupa III – są to drobne odkuwki o cechach wspólnych lub kształcie pośrednim pomiędzy poprzednimi grupami oraz odkuwki o kształcie złożonym, wymuszającym użycie dwóch lub więcej płaszczyzn podziału, np. odkuwki typu korpusów zaworów.

Odkuwki matrycowe **kute na prasach hydraulicznych** dzieli się na cztery grypy:

- ❑ grupa I – odkuwki typu tulei, butle i skorupy, które wymagają kształtowania przez dziurowanie i przeciąganie;
- ❑ grupa II – odkuwki o wydłużonym kształcie, stałym lub zmiennym przekroju poprzecznym, które są kształtowane poprzez wyciskanie – np. rury, pręty i profile; w obrębie tej grupy wyróżnić można dwie podgrupy, tj.: odkuwki wykonane z metali o niskiej temperaturze topnienia (np. miedź, aluminium, cynk i stopy tych metali) oraz wysokiej temperaturze topnienia (np. stal, tytan i jego stopy, nikiel i jego stopy);
- ❑ grupa III – odkuwki o złożonym kształcie, zwartej budowie i względnie dużej grubości ścianek, np. odkuwki typu piasty, koła pojazdów kolejowych, wały;
- ❑ grupa IV – odkuwki o dowolnym kształcie i wymiarach (głównie dla przemysłu lotniczego) wykonane ze stopów metali lekkich, dla których zaleca się względnie powolne kształtowanie, a ich temperatura kucia na gorąco nie przekracza 450°C – tj. stopy aluminium i stopy magnezu.

7.2.3. Wady odkuwek

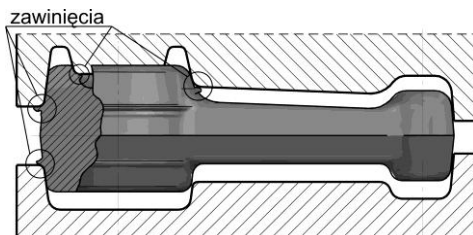
Wady odkuwek matrycowych powstają z powodu niewłaściwej jakości materiału wsadowego oraz są wynikiem błędów popełnionych podczas realizacji procesu produkcyjnego (błędy technologiczne). Najczęstszymi wadami materiału wsadowego są: rysy, łuski, zawalcowania, rozwarstwienia, wtrącenia niemetaliczne i skupiska drobnych pęknięć (tzw. płatki śnieżne). Natomiast wady odkuwki, których źródło jest związane z technologią jej wykonania (oprócz kucia), powstają podczas:

- ❑ operacji cięcia – są to wady wpływające bezpośrednio na przebieg procesu kucia (podobnie jak jakość materiału), powodujące jego ograniczenia lub są źródłem nowych wad, powstających podczas kucia – w trakcie cięcia mogą powstać niepłaskie powierzchnie cięcia, skośne ścięcie, zadziory, skrzywienie końca pręta oraz pęknięcie czoła pręta;
- ❑ nagrzewu wsadu – nadmierna zgorzelina, odwęglenie, przegrzanie i przepalenia na granicy ziaren; ta grupa wad również ma bezpośredni wpływ na przebieg procesu kucia;
- ❑ obróbki wykańczającej – zniekształcenie krawędzi, pozostałość wypływki (po okrawaniu);

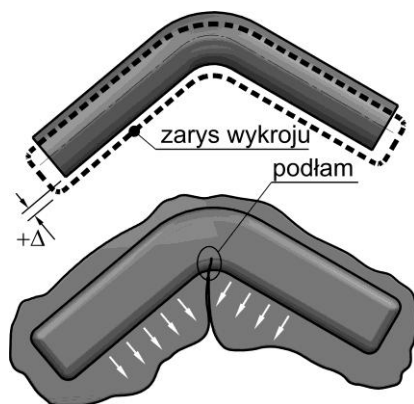
- ❑ obróbki cieplnej – znaczny rozrzut twardości w poszczególnych odkuwkach, różna twardość w różnych punktach tej samej odkuwki, pęknięcia hartownicze, kruchość trawienia.

Z kolei najczęściej spotykane wady odkuwek, które powstają w trakcie kucia matrycowego, to:

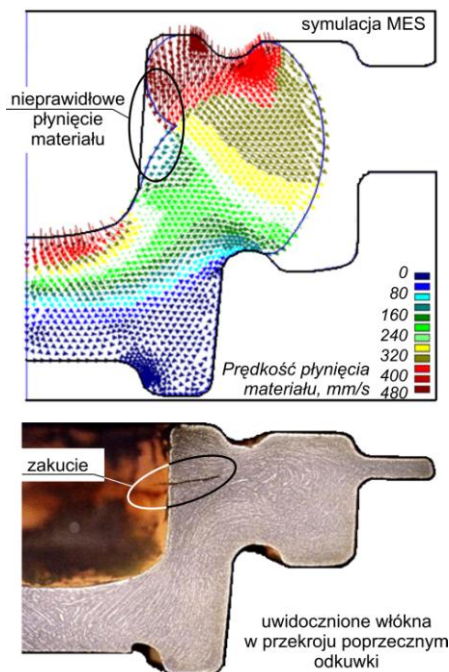
- ❑ wgniecenia, powstające wskutek wprasowania się w materiał nie usuniętej zgorzeliny lub innych obcych ciał;
- ❑ zawinięcia (rys. 7.18), które powstają w przypadku, gdy część materiału płynie podczas odkształcania materiału w niewłaści-



Rys. 7.18. Zawinięcia powstające w efekcie zastosowania wykroju wstępnego o niewłaściwym kształcie



Rys. 7.19. Złe ułożenie wsadu w wykroju (przesunięcie o $+\Delta$ względem wewnętrznej krawędzi) prowadzi do powstania podłamu w odkuwce

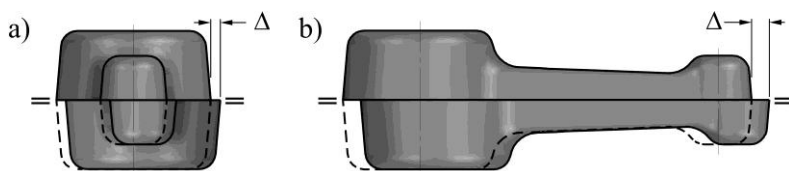


Rys. 7.20. Zakucie oraz schemat jego powstawania, jako efekt źle zaprojektowanego procesu kucia (niewłaściwe płynięcie metalu)

wym kierunku, tworząc wybrzuszenie, które z kolei zostaje wgniezione w odkuwkę; przyczyną tej wady najczęściej są błędy konstrukcyjne wykroju;

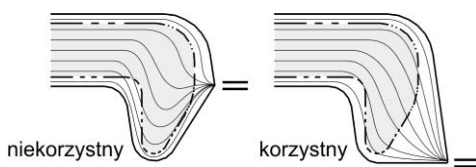
- ❑ podłamy (rys. 7.19), stanowiące zafałdowania materiału występującego na granicy zetknięcia się dwóch wypływek przesuwających się w różnych kierunkach; na linii zetknięcia się wypływek powstaje podłam, idący zawsze w kierunku odkuwki;
- ❑ zakucia (rys. 7.20), powstające w wyniku niewłaściwego płynięcia materiału;

- ❑ zniekształcenia, które są mechanicznymi uszkodzeniami odkuwki i powstają jeśli w czasie kucia wsad znalazł się poza wykrojem roboczym;
- ❑ niewypełnienie wykroju – wada ta powstaje na skutek niskiej temperatury materiału, małej ilości materiału wyjściowego, błędów konstrukcyjnych wykroju lub małej energii uderzenia młota;
- ❑ niedokucie – wszystkie wymiary wysokościowe odkuwki są większe niż powinny; przyczynami wystąpienia tej wady są: niska temperatura kucia, zbyt mała liczba uderzeń młota lub zbyt niska energia maszyny; w takiej sytuacji odkuwkę należy powtórnie przekuć;
- ❑ przesadzenie odkuwki (rys. 7.21), powstające przy przesunięciu względem siebie połówek matrycy w płaszczyźnie podziału;



Rys. 7.21. Przykład przesadzenia poprzecznego (a) i podłużnego (b) odkuwki, gdzie: Δ jest parametrem określającym ilościowo tę wadę

- ❑ niewłaściwy przebieg włókien, który najczęściej jest wynikiem zastosowania niewłaściwego kształtu przedkuwki i niewłaściwego ułożenia materiału wsadowego w wykroju roboczym; niekorzystny przebieg włókien w odkuwce (np. z punktu widzenia eksploatacji części finalnej)



Rys. 7.22. Przebieg włókien w odkuwce w zależności od przyjętego podziału matrycy

- może również być efektem wadliwej konstrukcji odkuwki (rys. 7.22);
- ❑ krzyż kucia, czyli pęknięcia wewnątrz materiału; powodem występowania tej wady jest niewłaściwa temperatura kucia, niewłaściwy sposób przekuwania pręta kwadratowego na okrągły i stosowanie narzędzi o nieodpowiednim kształcie powierzchni roboczych;
- ❑ nadmierna wypływka – przyczyną powstania tej wady jest niedokładne wykonanie płyty okrojnikowej; dopuszczalna wielkość wypływki pozostawionej na odkuwce jest określona normami;
- ❑ skrzywienie, spowodowane nierównomiernym stygnięciem odkuwki;
- ❑ niezgodność wymiarów – przekroczenie dopuszczalnych odchyłek wymiarowych w wyniku zużycia się wykroju roboczego lub nieprawidłowej temperatury końca kucia.

7.2.4. Rysunek odkuwki

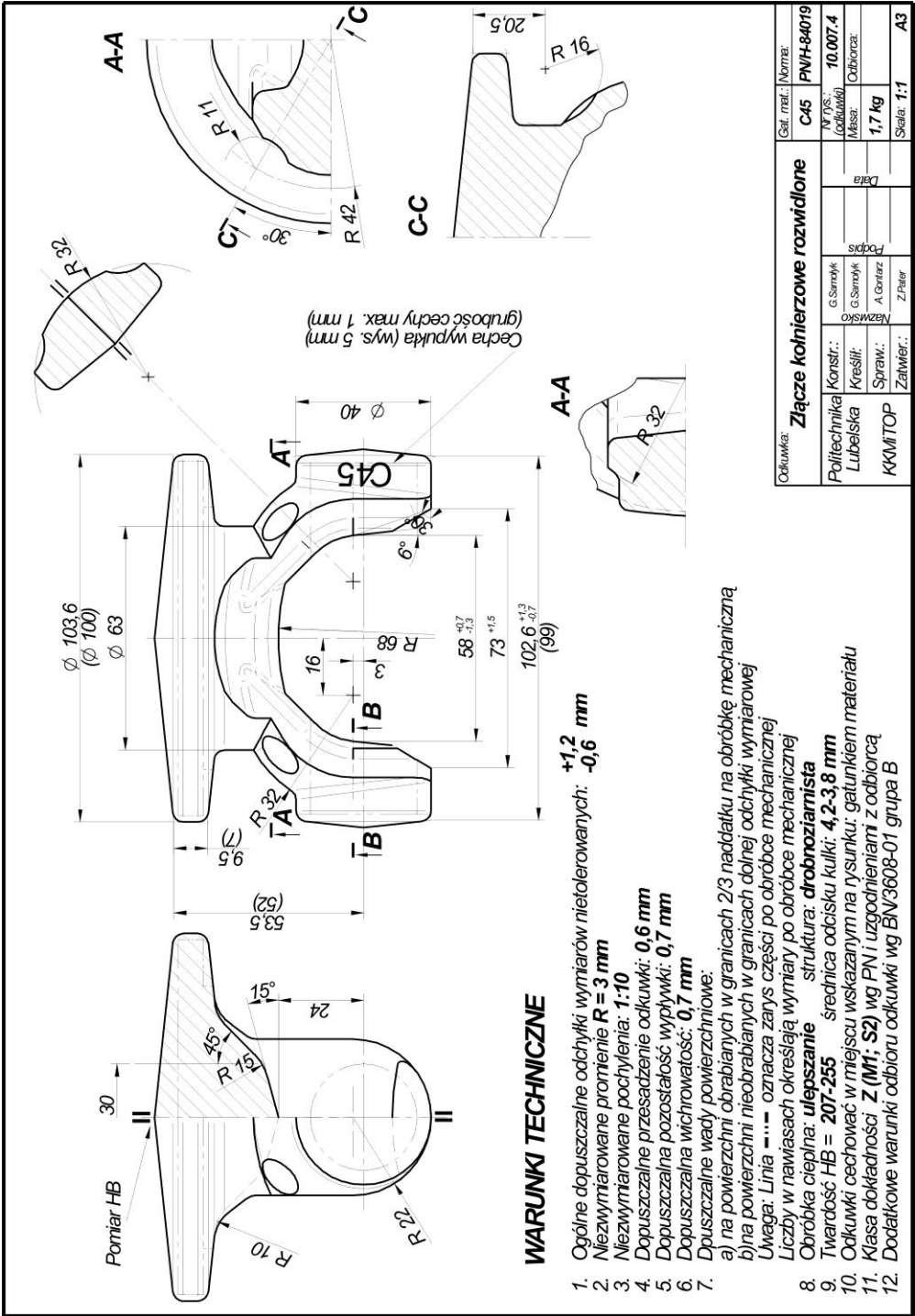
Rysunek odkuwki jest podstawą do opracowania procesu technologicznego kucia. Wykonuje się go na podstawie rysunku gotowej, ostatecznie obrobionej części, której kształty i wymiary w znacznym stopniu determinują sposób kucia. Ponadto, rysunek odkuwki jest wykorzystywany do konstrukcji wykroju wykańczającego matrycy i należy go tak opracować, aby można było prawidłowo zaprojektować i wykonać matrycę. Dlatego, przed przystąpieniem do opracowania rysunku należy wnikliwie przeanalizować i ustalić podział odkuwki (tj. płaszczyznę podziału matrycy), naddatki na obróbkę mechaniczną, naddatki technologiczne, dopuszczalne odchyłki wymiarowe oraz specjalne warunki wykonania. Ponadto, należy rozważyć ewentualne zmiany konstrukcyjne gotowej części (w celu uproszczenia rysunku odkuwki, ale bez pogorszenia jakości tej części), unifikację odkuwki, zastosowanie innych technologii uzupełniających wykonanie odkuwki (mającej złożone kształty), kucie kilku przedmiotów w jednej odkuwce oraz przeanalizować różne warianty technologii kucia. Warto również rozważyć zamianę operacji obróbki mechanicznej na np. dogniatanie. Przykładowy rysunek odkuwki (produkowanej w jednej z polskich kuźni) przedstawiono na rys. 7.23.

Wymiary arkusza rysunkowego oraz podziałka powinny być zgodne z obowiązującymi normami, przy czym zaleca się, aby w miarę możliwości rysunek odkuwki zawsze był wykonany w skali 1:1. Rozmieszczenie rzutów powinno odpowiadać ułożeniu odkuwki w matrycy, a ich ilość (łącznie z przekrojami) powinna być minimalna – tj. zapewniać jednoznaczne i łatwe odczytanie rysunku. Na jednym z rzutów należy wykreślić linią przerywaną dwukropkową zarys gotowego przedmiotu (ściślej: powierzchni obrabianych mechanicznie).

Na rysunku odkuwki nie należy wymiarować grubości wypłytki (lokalizację tego naddatku zaznacza się na rysunku schematycznie za pomocą dwóch równoległych odcinków w linii podziału matrycy), naddatków na obróbkę mechaniczną, dopuszczalnych odchyłek wymiarowych oraz zarysu przedmiotu obrobionego. Dopuszcza się podawanie ważniejszych wymiarów nominalnych dla części obrobionej w formie wymiarów dodatkowych, ujętych w nawiasach.

Na rysunku odkuwki należy podać również odchyłki dopuszczalne dla niektórych wymiarów, odchyłki na mimośrodowość przebijanych otworów oraz dopuszczalne skrzywienie, przesadzenie i wichrowatość. Wszystkie informacje dodatkowe są podawane zazwyczaj w formie warunków technicznych. Ponadto, w warunkach tych również podaje się wartości niezwymiarowanych pochyłeń kuźniczych, promieni zaokrąglenia oraz pozostałość wypłytki.

Zalecane czynności, które bezwzględnie powinno się wykonać podczas opracowywania rysunku odkuwki matrycowej, są następujące:



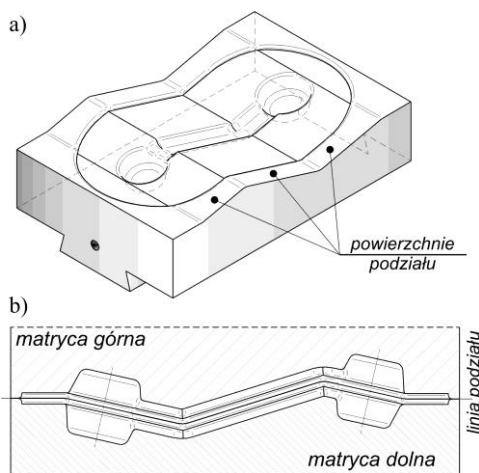
Rys. 7.23. Przykładowy rysunek odkuwki matrycowej

- ❑ analiza technologiczności wykonania odkuwki;
- ❑ wybór powierzchni podziału matrycy;
- ❑ dobór naddatków na obróbkę mechaniczną;
- ❑ ustalenie dopuszczalnych odchyłek wymiarowych;
- ❑ dobór naddatków technologicznych, tj. pochylenia kuźnicze, promienie zaokrągleń oraz kształt i wymiary denek.

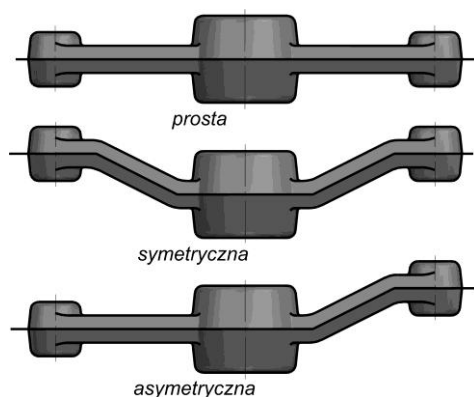
Powierzchnia podziału

Podział matrycy jest niezbędny dla ułożenia materiału wsadowego w wykroju oraz wyjęcia z niego gotowej odkuwki. Zależnie od kształtu odkuwki, podział matrycy może być powierzchnią płaską (rys. 7.1) lub złożoną (rys. 7.24). Na rysunku odkuwki i rysunku matrycy podział narzędzi jest oznaczony za pomocą linii podziału. Zgodnie z normą PN-EN 10243-1:2002, linię podziału matrycy dzieli się na prostą, symetryczną i asymetryczną (rys. 7.25) – klasyfikacja ta jest uwzględniana również podczas doboru tolerancji wykonania odkuwki.

Podstawowym warunkiem właściwego zaprojektowania linii podziału matrycy jest zapewnienie łatwego wyjęcia odkuwki. Nieprawidłowy wybór tej linii może spowodować konieczność zastosowania dodatkowego naddatku materiału, np. poprzez dodanie pochyłości kuźniczych lub zamiany powierzchni wklęsłych na powierzchnie wypukłe. Jednocześnie przy wyborze tej linii należy mieć na uwadze fakt, że wypełnianie wykroju roboczego w matrycy poprzez spęczanie materiału (rys. 7.4a) daje lepsze wyniki niż dla przypadku kucia poprzez wyciskanie (rys. 7.4b). Zatem, przy projektowaniu płaszczyzny podziału należy również uwzględniać stosunek wysokości odkuwki do jej szerokości w poszcze-



Rys. 7.24. Przykładowa matryca o złożonej powierzchni podziału: a) widok ogólny, b) przekrój poprzeczny



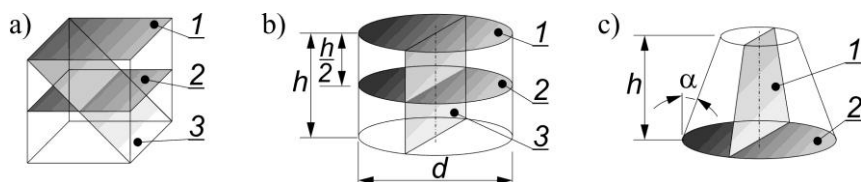
Rys. 7.25. Kształt linii podziału matrycy według normy PN-EN 10243-1:2002

gólnych przekrojach poprzecznych. Ponadto, przebieg linii podziału powinien zapewniać uzyskanie możliwie największej powierzchni przekroju odkuwki, zawartej w płaszczyźnie podziału matrycy. Oczywiście, przy wyborze przebiegu omawianej linii należy również brać pod uwagę względy ekonomiczne (np. konieczność stosowania dodatkowych naddatków technologicznych) oraz dobrą jakość wyrobu (np. korzystny układ przebiegu włókien w odkuwce – rys. 7.22).

Na kolejnym rys. 7.26 przedstawiono typowe lokalizacje płaszczyzn podziału matrycy, w odniesieniu do odkuwki o kształcie elementarnym. Jeżeli materiał kuty ma kształt zbliżony do sześcianu (rys. 7.26a), możliwe są trzy warianty przebiegu linii podziału odkuwki. Wariant 1 jest stosowany w przypadkach szczególnych, ponieważ takie położenie linii podziału jest niekorzystne ze względu na trudności okrawania wypływką (np. może nastąpić oderwanie materiału w trakcie odcinania wypływką) – stąd z zasady unika się takiego rozwiązania. Ponadto, konieczność zastosowania pochyłeń kuźniczych, aż na czterech ściankach odkuwki, powoduje powstanie dużych ilości naddatku materiału. Bardziej korzystny jest wariant 2 (rys. 7.26a) pomimo, że ilość naddatku materiału nadal jest znaczna. Natomiast wariant 3 jest najkorzystniejszy, gdyż pochylenia kuźnicze występują tylko na dwóch ściankach.

Kolejnym popularnym kształtem odkuwki matrycowanej jest walec (rys. 7.26b). Wybór lokalizacji linii podziału zależy od wymiarów charakterystycznych odkuwki. Jeśli jej wysokość h jest bardzo mała, można wybrać wariant 1. Jednak, ze względu na trudność okrawania wypływką, zaleca się mimo wszystko stosować wariant 2 lub rozwiązanie pośrednie pomiędzy tymi dwoma wariantami. Przy czym, wspomniane przypadki położenia linii podziału są wybierane, jeżeli jest spełniony warunek, że stosunek wymiarów odkuwki $h/d < 1$. W pozostałych przypadkach (tj. przy kuciu wałków i wyrobów osiowo-symetrycznych, gdzie wymiar h jest długością odkuwki), powinno się stosować wariant 3, ponieważ naddatki na pochylenia kuźnicze są wtedy najmniejsze.

Dla odkuwek o kształcie stożka ściętego (rys. 7.26c), w zależności od wymiarów charakterystycznych, możliwe do wyboru są tylko dwa warianty przebiegu linii podziału. Jeżeli wysokość odkuwki h jest bardzo mała (tzw. stożek niski) lub

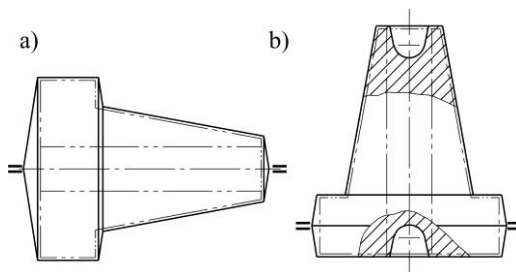


Rys. 7.26. Przykłady lokalizacji płaszczyzny podziału matrycy, gdy odkuwka ma kształt sześcianu (a), walca (b) lub stożka ściętego (c); gdzie: h – wysokość, d – średnica, α – pochylenie naturalne odkuwki (opis w tekście)

kąt pobocznic α jest duży, zazwyczaj jest wybierany wariant 1. Natomiast, we wszystkich pozostałych przypadkach zalecany jest wariant 2.

Odkuwki matrycowe mogą mieć również kształt zbliżony do prostopa-
dłościanu. W takiej sytuacji, możliwych do zastosowania jest aż osiem przebie-
gów linii podziału, a ich wybór jest określany na zasadach obowiązujących we
wszystkich wcześniej omówionych przypadkach.

Ułożenie odkuwki w wykroju roboczym matrycy (a tym samym przebieg linii
podziału) często wynika bezpośrednio z jej kształtu i konstrukcji. Przykładowo,
dla odkuwki typu pierścieni, korbowodów i wałków stopniowanych, wybór linii
podziału jest na pozór kwestią oczywistą (zgodnie z rys. 7.26). Jednak, często
spotyka się odstępstwa od tych zasad. Przykład takiego wyjątku przedstawiono
na rys. 7.27. Według poznanych reguł, przebieg linii podziału dla rozpatrywanej
odkuwki powinien być taki, jaki to pokazano na rys. 7.27a. Niestety, taki wybór
powoduje, że odkuwkę można wykonać jedynie z przedkuwki. Powoduje to, że
konstrukcja matrycy jest złożona, a jej wykonanie trudne. Wykroje matrycujące
należy wykonać poprzez frezowanie. Ponadto, matryce te muszą posiadać
dodatkowo wykroje pomocnicze służące do wykonania przedkuwki. Wnikliwa
analiza ekonomiczności kucia takiej odkuwki wykazuje, że rozwiązanie przed-
stawione na rys. 7.27b jest lepsze. Odkuwkę można wykonać bezpośrednio z ma-
teriału wsadowego, a konstrukcja narzędzi jest zdecydowanie prostsza – tj. nie
ma potrzeby umieszczać dodatkowych wykrojów pomocniczych w matrycy,
a wykrój matrycujący można wy-
konać poprzez toczenie. Ponadto,
taki sposób wykonania odkuwki
powoduje, że oszczędności ma-
teriałowe są znaczne. Naddatki
technologiczne są mniejsze, moż-
na wykonać wgłębienia na otwo-
ry, a mniejszy obwód odkuwki
(w płaszczyźnie podziału matrycy)
powoduje zmniejszenie ilości
wypłytki.



Rys. 7.27. Dwa możliwe położenia linii podziału matrycy – opis w tekście

Naddatki na obróbkę mechaniczną

Naddatek na obróbkę mechaniczną (rys. 7.28) dodaje się do wymiaru nomi-
nalnego części gotowej w przypadku, gdy za pomocą kucia nie można uzyskać
wymaganej gładkości oraz czystości powierzchni wyrobu. Naddatek ten należy
uwzględnić również w sytuacji, kiedy odchyłki wymiarowe części gotowej są
mniejsze niż tolerancja wykonania odkuwki w kuciu matrycowym. Naddatek
ten powinien uwzględniać wszystkie niedokładności wykonania, które mogą
powstać w trakcie realizacji procesu kucia. Najczęściej, są to różnego rodzaju

wady powierzchniowe (np. niedokucie, zakucie itd.), odwęglenia oraz wady kształtu odkuwki (np. przesadzenie, skrzywienie itd.).

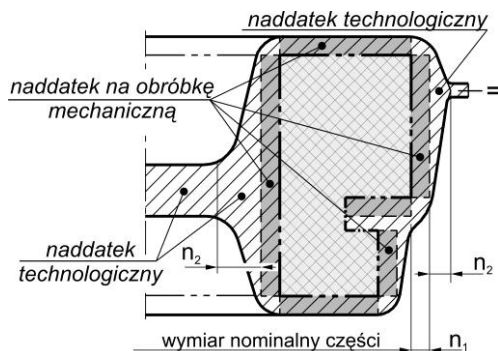
Podstawowymi czynnikami, determinującymi wielkość omawianego nadatku, podczas kucia na dowolnej maszynie kuźniczej, są:

- ❑ kształt oraz wymiary odkuwki;
- ❑ gatunek materiału, z którego jest kuta odkuwka;
- ❑ jakość powierzchni materiału wsadowego;
- ❑ sposób nagrzewu materiału wsadowego (tj. ilość powstającej zgorzeli);
- ❑ dokładność wykonania matryc kuźniczych, ich ustawienie oraz przyjęte odchyłki wymiarowe odkuwki;
- ❑ typ maszyny kuźniczej oraz jej stan techniczny.

Oprócz wymienionych czynników, należy uwzględnić położenie odkuwki w wykroju roboczym. Nadatki na obróbkę mechaniczną, w płaszczyźnie podziału matryc, powinny być zawsze większe od nadatków dodanych na wysokość wyrobu. Powodem jest większe zużycie matryc dla wymiarów w płaszczyźnie podziału oraz możliwość powstania przesadzenia.

W praktyce, zalecaną minimalną wielkość omawianych nadatków dobiera się na podstawie wytycznych zawartych we właściwej normie, osobnej dla odkuwek stalowych (np. PN/H-94301:1986) oraz odkuwek wykonanych z metali nieżelaznych (np. PN/H-94801:1989). Przy ich doborze bierze się pod uwagę:

- ❑ klasę dokładności wykonania odkuwki – w przypadku kucia matrycowego na młotach lub na prasach odkuwek stalowych, wyróżnia się cztery klasy ¹⁾: zwykła (Z), podwyższona (P), dokładna (D) i bardzo dokładna (BD), natomiast dla kucia odkuwek z metali nieżelaznych – dwie klasy: zwykła (Z) i dokładna (D);



Rys. 7.28. Kształt i wymiary odkuwki w stosunku do części gotowej, gdzie: n_1 – nadatek na obróbkę mechaniczną, n_2 – nadatek technologiczny wynikający z pochyłości kuźniczych

¹⁾ Obecnie, klasę podwyższoną (P), dokładną (D) i bardzo dokładną (BD) traktuje się jak jedną. Podział ten miał uzasadnienie, gdy w warunkach przemysłowych stosowano młoty o bardzo niedokładnym prowadzeniu bijaka. Konstrukcja i wykonanie dzisiejszych maszyn kuźniczych zapewnia znacznie lepszą jakość.

- ❑ trudność materiałową – w przypadku odkuwek stalowych wyróżnia się trudność M1 (stale niskowęglowe i niskostopowe) oraz M2 (pozostałe stale, o zawartości węgla powyżej 0,65% i sumarycznej ilości dodatków stopowych ponad 5%);
- ❑ wielkość odkuwki, wyrażoną zazwyczaj masą lub za pomocą wymiarów gabarytowych;
- ❑ klasę dokładności wymiarowej i chropowatości powierzchni, jaką chce się uzyskać po obróbce mechanicznej – w przypadku odkuwek z metali nieżelaznych wyróżnia się dwie klasy: poniżej IT12 ($Ra < 16 \mu m$) oraz powyżej IT12 ($Ra > 16 \mu m$).

Przykładowe wartości jednostronnych naddatków n_1 (zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 7.28), dla odkuwek matrycowych kutech na młotach lub prasach (korbowych, śrubowych lub hydraulicznych), zestawiono w tabeli 7.2, tabeli 7.3 oraz tabeli 7.4. Są to minimalne, zalecane wartości, które dodaje się do wymiaru nominalnego części gotowej. W przypadku obróbki mechanicznej dwustronnej, wymiar nominalny zwiększa się o podwojoną wartość.

Tabela 7.2.

Jednostronne naddatki na obróbkę mechaniczną odkuwki wykonanej z metali nieżelaznych, która jest kuta na młocie lub prasie wg nieobowiązującej normy PN-H 94801:1989

Wymiar nominalny (średnica, grubość, wysokość, długość), mm		Naddatki na obróbkę (<i>m</i> wg 7.26), mm							
		Materiał odkuwki							
		Cu, stopy Cu				Al, stopy Al, stopy Mg			
		Klasa dokładności IT oraz chropowatość powierzchni Ra uzyskane po obróbce mechanicznej							
		≥ IT12 Ra ≥ 16 μm		< IT12 Ra < 16 μm		≥ IT12 Ra ≥ 16 μm		< IT12 Ra < 16 μm	
		klasa dokładności odkuwki							
>	≤	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D
	25	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	0,6	1,0	0,9
25	40	0,7	0,6	1,1	1,0	0,9	0,8	1,3	1,2
40	63	0,9	0,8	1,3	1,2	1,1	1,0	1,5	1,4
63	100	1,1	1,0	1,5	1,4	1,4	1,2	1,7	1,6
100	160	1,3	1,2	1,8	1,6	1,7	1,5	2,1	1,9
160	250	1,6	1,4	2,0	1,8	2,0	1,8	2,5	2,3
250	400	1,9	1,6	2,3	2,0	2,3	2,1	2,7	2,5
400	630	2,2	1,8	2,5	2,2	3,1	2,8	3,3	3,1

Tabela 7.3.

Jednostronne naddatki na obróbkę mechaniczną odkuwki stalowej, która jest kuta na młocie lub prasie z dokładnością zwykłą (Z) wg nieobowiązującej normy PN-H 94301:1986

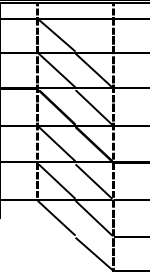
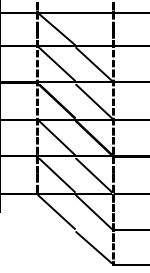
Masa kg		Trudność materiałowa		Wymiar nominalny (średnica, grubość, wysokość, długość)					
				naddatek (n_1 wg 7.26), mm					
>	≤	M1	M2	< 32	≥ 32 < 100	≥ 100 < 160	≥ 160 < 250	≥ 250 < 400	≥ 400 < 630
	0,4			1,2	1,4	1,5	1,5	1,8	2,0
0,4	1,0			1,4	1,5	1,5	1,8	2,0	2,4
1,0	1,8			1,5	1,5	1,8	2,0	2,4	2,6
1,8	3,2			1,5	1,8	2,0	2,4	2,6	2,8
3,2	5,6			1,8	2,0	2,4	2,6	2,8	3,0
5,6	10			2,0	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
				2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
				2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6
Przykład: Odkuwka o masie 1,5 kg, materiał M1 i o średnicy 60 mm – naddatek: 2,0 mm									

Tabela 7.4.

Jednostronne naddatki na obróbkę mechaniczną odkuwki stalowej, która jest kuta na młocie lub prasie z dokładnością podwyższoną (P), dokładną (D) lub bardzo dokładną (BD) wg nieobowiązującej normy PN-H 94301:1986

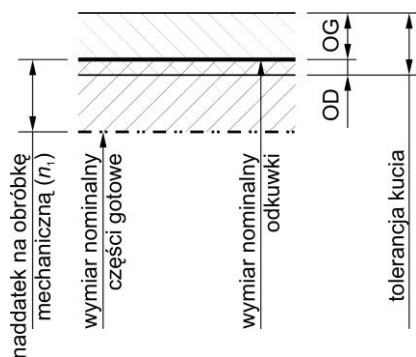
Masa kg		Trudność materiałowa		Wymiar nominalny (średnica, grubość, wysokość, długość)					
				naddatek (n_1 wg 7.26), mm					
>	≤	M1	M2	< 32	≥ 32 < 100	≥ 100 < 160	≥ 160 < 250	≥ 250 < 400	≥ 400 < 630
	0,4			0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	
0,4	1,0			1,0	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8
1,0	1,8			1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2
1,8	3,2			1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1
3,2	5,6			1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,2
5,6	10			1,6	1,8	2,0	2,1	2,2	2,3
				1,8	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
				2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,6
Przykład: Odkuwka o masie 1,5 kg, materiał M1 i o średnicy 60 mm – naddatek: 1,6 mm									

Odchyłki wymiarowe, tolerancja kucia

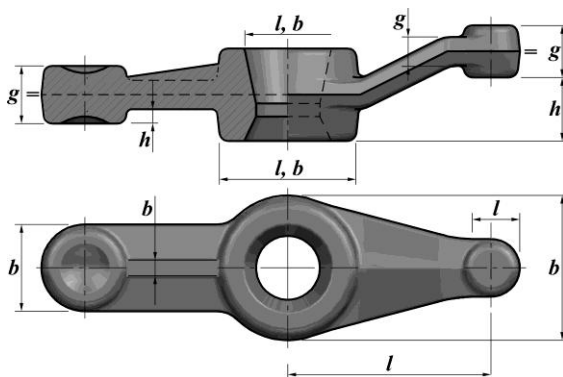
Tolerancja kucia (wykonania odkuwki) jest sumą dopuszczalnych odchyłek górnej (OG) oraz dolnej (OD), liczonych od wymiaru nominalnego odkuwki. Z reguły przyjmuje się, że odchyłka dolna (w głąb materiału) stanowi tylko 25÷33% tolerancji, natomiast odchyłka górna (tj. odchylenie wymiaru nominalnego odkuwki w kierunku zwiększenia jej objętości) stanowi resztę pola tolerancji. Odchyłki te (w odniesieniu do wymiaru nominalnego odkuwki) przedstawiono schematycznie na rys. 7.29, przy czym stosuje się je zawsze, bez względu na to, czy powierzchnia odkuwki podlega obróbce mechanicznej, czy zostaje wykonana na gotowo. Ponadto zaleca się, aby tolerancja danej grupy wymiarów kucia była jednakowa dla całej odkuwki, a jej pole ustala się na podstawie największego wymiaru charakterystycznego.

W przypadku kucia matrycowego można wyróżnić kilka podstawowych grup (rodzajów) odchyłek wymiarowych i tolerancji wykonania odkuwki:

- ❑ tolerancje i odchyłki długości (l), szerokości (b), wysokości (h) i grubości (g) – przykład odkuwki wraz z tymi rodzajami wymiarów umieszczono na rys. 7.30;
- ❑ tolerancje i odchyłki wymiarów międzyosiowych;
- ❑ przesadzenie podłużne i poprzeczne – dopuszczalna wartość Δ (rys. 7.21) zależy od wymiaru bazowego odkuwki (szerokości lub długości), dokładności kucia oraz kształtu linii podziału (rys. 7.25); dla odkuwek stalowych Δ wynosi $0,4 \pm 2,0$ mm, natomiast dla odkuwek wykonanych z metali nieżelaznych $\Delta = 0,3 \pm 1,3$ mm;
- ❑ dopuszczalna strzałka skrzywienia odkuwki;
- ❑ odkształcenie końcówek obciążonych (np. powstałych przy kuciu z pręta);



Rys. 7.29. Schemat tolerancji kucia i odchyłek wymiarowych odkuwki, gdzie: OG - odchyłka górna, OD - odchyłka dolna



Rys. 7.30. Rodzaje wymiarów odkuwki; opis w tekście

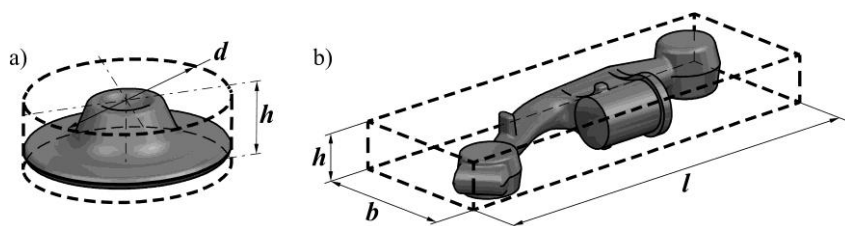
- pozostałość wypłytki lub dopuszczalne wcięcie w materiał odkuwki, które może powstać podczas niedostatecznie dokładnego okrawania wypłytki.

Wartości dopuszczalnych odchyłek wymiarowych dla odkuwek matrycowych dobiera się zgodnie z właściwą normą, zależnie od odpowiednich największych wymiarów nominalnych odkuwki (w rozpatrywanej grupie). Na wartość omawianych tolerancji i odchyłek wymiarowych mają wpływ przede wszystkim:

- wielkość wymiarów, masa odkuwki;
- wskaźnik zwartości kształtu odkuwki S , który jest określony na podstawie stosunku objętości (lub masy) odkuwki do objętości bryły opisanej na odkuwce (rys. 7.31):

$$S = \frac{V_{\text{odkuwki}}}{V_{\text{bryły opisanej na odkuwce}}}, \quad (7.2)$$

gdzie bryła opisana na odkuwce może być walcem (rys. 7.31a – gdy odkuwka jest osiowosymetryczna) lub prostopadłościanem (rys. 7.31b – w przypadku odkuwki o kształcie nieregularnym). W zależności od obliczonej wartości wskaźnika S , odkuwkę klasyfikuje się do grupy **S4** (gdy $S \leq 0,16$), **S3** ($0,16 < S \leq 0,32$), **S2** ($0,32 < S \leq 0,63$) lub **S1** (gdy $S > 0,63$);



Rys. 7.31. Sposób określenia kształtu i wymiarów bryły opisanej na odkuwce osiowosymetrycznej (a) i nieosiowosymetrycznej (b)

- kształt linii podziału matrycy (rys. 7.25) oraz powierzchnia rzutu odkuwki na płaszczyznę podziału;
- rodzaj materiału, a w przypadku odkuwek stalowych – stopień trudności materiałowej (M1 lub M2);
- klasa dokładności odkuwki, przy czym zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 10243-1:2002 dla odkuwek stalowych wyróżnia się tylko dwie klasy: **F** (zwykła) – tolerancja i odchyłki są możliwe do uzyskania przy zastosowaniu powszechnie stosowanych (standardowych) maszyn, urządzeń i narzędzi kuźniczych; **E** (dokładna) – gdzie pole tolerancji jest zawężone, a jego uzyskanie wymaga zastosowania niestandardowych urządzeń i narzędzi.

Klasę kucia E zaleca się stosować tylko w przypadku ekonomicznie uzasadnionym, np. powodującym zmniejszenie liczby dalszych operacji obróbki mechanicznej (wykańczającej).

Przykładowe wartości odchyłek (górnej i dolnej) podstawowych wymiarów (rys. 7.30) dla odkuwek kutech na młotach lub prasach kutech pokazano w tabeli 7.5 (metale nieżelazne) oraz w tabelach 7.6 i 7.7 (dla stali).

Tabela 7.5.

Tolerancja wymiarów (rys. 7.30) dla odkuwki wykonanej z metali nieżelaznych, która jest kuta na młocie lub prasie (na podstawie nieobowiązującej normy PN-H 94801:1989)

Wymiar nominalny		Klasa dokładności	Cu, stopy Cu	Al, Mg, stopy Al, stopy Mg	Cu, stopy Cu			Al, stopy Al, stopy Mg			
					Powierzchnia rzutu odkuwki na płaszczyznę podziału matrycy, x10 ⁴ mm ²						
			Odchyłki wymiarów: <i>l, b, h</i>		< 0,5	≥ 0,5 < 2,0	≥ 2,0 < 8,0	< 0,5	≥ 0,5 < 2,0	≥ 2,0 < 8,0	
						Odchyłki wymiaru <i>g</i> (grubości)					
>	≤	mm									
0	10	Z	+0,25/-0,15	+0,30/-0,20	+0,50/-0,20	+0,50/-0,40		+0,60/-0,30	+0,70/-0,50		
		D	+0,14/-0,10	+0,18/-0,12	+0,30/-0,20	+0,35/-0,25		+0,35/-0,25	+0,40/-0,30		
10	16	Z	+0,30/-0,20	+0,35/-0,20	+0,50/-0,30	+0,65/-0,40		+0,65/-0,30	+0,85/-0,50		
		D	+0,18/-0,12	+0,24/-0,16	+0,35/-0,25	+0,45/-0,30		+0,40/-0,25	+0,55/-0,35		
16	25	Z	+0,35/-0,25	+0,5/-0,3	+0,6/-0,4	+0,7/-0,5	+1,0/-0,6	+0,7/-0,4	+1,0/-0,6	+1,2/-0,8	
		D	+0,24/-0,16	+0,3/-0,2	+0,35/-0,25	+0,50/-0,35	+0,65/-0,40	+0,45/-0,30	+0,60/-0,35	+0,70/-0,50	
25	40	Z	+0,5/-0,3	+0,6/-0,4	+0,7/-0,4	+0,9/-0,6	+1,1/-0,7	+0,9/-0,5	+1,1/-0,6	+1,3/-0,9	
		D	+0,30/-0,20	+0,4/-0,2	+0,45/-0,30	+0,60/-0,35	+0,70/-0,50	+0,55/-0,35	+0,65/-0,40	+0,85/-0,55	
40	63	Z	+0,6/-0,4	+0,7/-0,5	+0,8/-0,5	+1,0/-0,6	+1,2/-0,8	+1,0/-0,5	+1,2/-0,7	+1,5/-1,0	
		D	+0,36/-0,24	+0,5/-0,3	+0,55/-0,35	+0,65/-0,40	+0,85/-0,55	+0,60/-0,35	+0,75/-0,50	+0,90/-0,60	
63	100	Z	+0,8/-0,5	+0,8/-0,6	+0,9/-0,5	+1,1/-0,6	+1,3/-0,9	+1,2/-0,6	+1,4/-0,7	+1,6/-1,0	
		D	+0,48/-0,32	+0,6/-0,4	+0,60/-0,35	+0,75/-0,50	+0,90/-0,60	+0,70/-0,50	+0,85/-0,55	+1,00/-0,60	
100	160	Z	+1,0/-0,6	+1,0/-0,8	+1,0/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-1,0	+1,3/-0,7	+1,6/-0,8	+1,8/-1,2	
		D	+0,6/-0,4	+0,7/-0,4	+0,7/-0,5	+0,9/-0,6	+1,0/-0,6	+0,85/-0,55	+0,95/-0,60	+1,10/-0,70	
160	250	Z	+1,2/-0,8	+1,2/-0,8		+1,5/-0,7	+1,7/-1,0		+1,8/-0,9	+2,0/-1,3	
		D	+0,7/-0,4	+0,7/-0,5		+1,0/-0,6	+1,1/-0,7		+1,1/-0,7	+1,20/-0,8	
250	400	Z	+1,4/-1,0	+1,4/-1,0		+1,6/-1,0	+1,8/-1,2		+2,0/-1,2	+2,1/-1,4	
		D	+0,8/-0,6	+0,8/-0,6		+1,1/-0,6	+1,2/-0,8		+1,2/-0,8	+1,3/-0,9	

Tabela 7.6.

Tolerancja wymiarów (rys. 7.30) dla odkuwki wykonanej ze stali, która jest kuta na młocie lub prasie z dokładnością zwykłą (F) – wg normy PN-EN 10243-1:2002

Masa kg		Trudność materiałowa		Zwartość kształtu odkuwki				Wymiar nominalny szerokość lub średnica (b), grubość (g), wysokość (h), długość (l)					
								mm					
								< 32	≥ 32 < 100	≥ 100 < 160	≥ 160 < 250	≥ 250 < 400	≥ 400 < 630
>	≤	M1	M2	S1	S2	S3	S4						
	0,4							+0,7/-0,4	+0,8/-0,4	+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7
0,4	1,0							+0,8/-0,4	+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7
1,0	1,8							+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8
1,8	3,2							+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9
3,2	5,6							+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1
5,6	10							+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1	+2,4/-1,2
								+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1	+2,4/-1,2	+2,7/-1,3
								+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1	+2,4/-1,2	+2,7/-1,3	+2,7/-1,3
								+1,9/-0,9	+2,1/-1,1	+2,4/-1,2	+2,7/-1,3	+2,7/-1,3	+3,0/-1,5
								+2,1/-1,1	+2,4/-1,2	+2,7/-1,3	+2,7/-1,3	+3,0/-1,5	+3,3/-1,7
								+2,4/-1,2	+2,7/-1,3	+2,7/-1,3	+3,0/-1,5	+3,3/-1,7	+3,7/-1,9

Tabela 7.7.

Tolerancja wymiarów (rys. 7.30) dla odkuwki wykonanej ze stali, która jest kuta na młocie lub prasie z dokładnością podwyższoną (E) – wg normy PN-EN 10243-1:2002

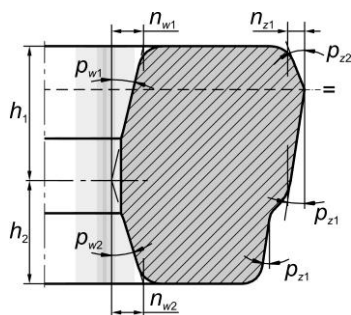
Masa kg		Trudność materiałowa		Zwartość kształtu odkuwki				Wymiar nominalny szerokość lub średnica (b), grubość (g), wysokość (h), długość (l)					
								mm					
								< 32	≥ 32 < 100	≥ 100 < 160	≥ 160 < 250	≥ 250 < 400	≥ 400 < 630
>	≤	M1	M2	S1	S2	S3	S4						
	0,4							+0,5/-0,2	+0,5/-0,3	+0,6/-0,3	+0,7/-0,3	+0,7/-0,4	+0,8/-0,4
0,4	1,0							+0,5/-0,3	+0,6/-0,3	+0,7/-0,3	+0,7/-0,4	+0,8/-0,4	+0,9/-0,5
1,0	1,8							+0,6/-0,3	+0,7/-0,3	+0,7/-0,4	+0,8/-0,4	+0,9/-0,5	+1,1/-0,5
1,8	3,2							+0,7/-0,3	+0,7/-0,4	+0,8/-0,4	+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6
3,2	5,6							+0,7/-0,4	+0,8/-0,4	+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7
5,6	10							+0,8/-0,4	+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7
								+0,9/-0,5	+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8
								+1,1/-0,5	+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9
								+1,2/-0,6	+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1
								+1,3/-0,7	+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1	+2,4/-1,1
								+1,5/-0,7	+1,7/-0,8	+1,9/-0,9	+2,1/-1,1	+2,4/-1,2	+2,7/-1,3

Pochylenia kuźnicze

Pochylenia kuźnicze odkuwki są naddatkami technologicznymi (na rys. 7.32 oznaczonymi jako n_1 oraz n_2). Ich obecność jest podyktowana koniecznością ograniczenia sił tarcia, jakie powstają na bocznych ściankach i które mogą uniemożliwić wyjęcie odkuwki z wykroju roboczego po zakończeniu kucia. W odniesieniu do matrycy mówi się o pochyleniu ścianek bocznych wykroju lub o skosach matrycowych.

Pochylenia kuźnicze na rysunku odkuwki (rys. 7.32) są przedstawiane za pomocą kąta lub stosunku odpowiednich ramion (zgodnie z regułami wymiarowania rysunków kuźniczych). Z uwagi, że wartości pochyłeń są zunifikowane, dla lepszej czytelności rysunku odkuwki można pominąć wymiarowanie niektórych (lub wszystkich) pochyłeń, umieszczając jednocześnie stosowną uwagę w warunkach technicznych (np. uwaga 3 na rys. 7.23). Wartości pochyłeń kuźniczych zależą od:

- ❑ rodzaju materiału – dla odkuwek wykonanych z metali lekkich stosuje się mniejsze pochylenia niż dla odkuwek stalowych;
- ❑ gładkości i wysokości ścianek bocznych wykroju – im wyższa ścianka wykroju i mniejsza jej gładkość, tym kąt skosu powinien być większy;
- ❑ orientacji ścianki bocznej względem bryły odkuwki – wyróżnia się pochylenia wewnętrzne (p_w – rys. 7.32) oraz zewnętrzne (p_z); kąty pochyłeń ścianek wewnętrznych są większe niż dla ścianek zewnętrznych – podczas stygnięcia materiału odkuwki, ścianki wewnętrzne zaciskają się na wystających fragmentach wykroju (np. czopach dziurujących), natomiast ścianki zewnętrzne odrywają się od ścianek matrycy;
- ❑ symetryczności wykroju roboczego względem podziału matrycy – przy symetrycznym podziale odkuwki, wysokości jej górnej i dolnej części są równe (np. $h_1 = h_2$ – rys. 7.32), zatem również odpowiednie pochylenia są takie same. W przypadku niesymetrycznego podziału odkuwki (tj. $h_1 > h_2$ – zgodnie z rys. 7.32) odpowiednie pochylenia, np. p_{w1} i p_{w2} (lub p_{z1} i p_{z2}) nie są sobie równe – wtedy pochylenia z indeksem 1 są dobierane na podstawie zaleceń, natomiast pochylenia z indeksem 2 (tj. ścianek niższych) są wynikowe i zawsze większe, zgodnie z warunkiem (7.3), który musi być spełniony:



Rys. 7.32. Pochylenia kuźnicze
(opis w tekście)

$$p_2 \geq p_1 \Rightarrow n_1 = n_2, \quad (7.3)$$

gdzie p reprezentuje wartość pochylenie kuźniczego p_w lub p_z , natomiast n_1 i n_2 są naddatkami, odpowiednio z indeksem w lub z – wszystkie oznaczenia są zgodne z rys. 7.32;

- metody kucia – w przypadku użycia wyrzutnika do usuwania odkuwki z wykroju, pochylenia kuźnicze są mniejsze.

Typowe wartości pochyłeń kuźniczych, które są zalecane do stosowania podczas kucia matrycowego przedstawiono w tabeli 7.8. W tabeli tej podano zarówno wartości kątów, jak i pochyłeń (jako stosunek ramion). Wartości zalecane uzależnia się od rodzaju maszyny kuźniczej oraz cech ścianki bocznej odkuwki. Jak wynika z tej tabeli, użycie wyrzutnika pozwala na zastosowanie znacznie mniejszych pochyłeń kuźniczych – a w efekcie zmniejszenie naddatków technologicznych.

Tabela 7.8.

Typowe wartości (kąty i pochylenie wyrażone stosunkiem ramion) pochyłeń kuźniczych (rys. 7.32) zalecane do stosowania podczas kucia matrycowego.

Maszyna kuźnicza	Uwagi	Stal ⁰⁾				Cu, stopy Cu				Al, stopy Al, stopy Mg			
		p_w		p_z		p_w		p_z		p_w		p_z	
		kąt	poch.	kąt	poch.	kąt	poch.	kąt	poch.	kąt	poch.	kąt	poch.
młot	1)	9°	1:6	6°	1:10	5°	1:12	3°	1:20	8°	1:7	5°	1:12
	2)	6°	1:10	3°	1:20								
	3)			9°	1:6								
prasa bez wyrzutnika	1)	6°	1:6	3°	1:20	5°	1:12	3°	1:20	8°	1:7	5°	1:12
	4)	9°	1:6	6°	1:10								
prasa z wyrzutnikiem	1)	3°	1:10	1°	1:50	3°	1:20	1,5°	1:40	3°	1:20	1,5°	1:40
Uwagi: ⁰⁾ dla grubości g poniżej 10 mm (odkuwki stalowe) zaleca się pochylenie 6° (1:10), 1) ścianki normalne, 2) ścianki przy płytkim wgnieceniu (p_w) lub ścianki przy niskich odkuwkach (p_z), 3) ścianki przy wysokich żebrach, 4) ścianki przy głębokim wgnieceniu (p_w) lub ścianki przy niskich żebrach (p_z).													

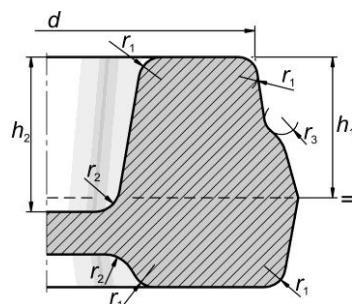
Zaokrąglenia krawędzi odkuwki

Bardzo ważnym zagadnieniem technologicznym są zaokrąglenia krawędzi odkuwki, a tym samym odpowiednich krawędzi wykroju roboczego. Wszystkie krawędzie muszą być zaokrąglone. Zgodnie z rys. 7.33 wyróżnia się promienie zaokrągleń dla krawędzi zewnętrznych (r_1) oraz wewnętrznych (r_2). Odmianą zaokrąglenia krawędzi zewnętrznej jest promień zaokrąglenia r_3 , który odnosi się do miejsc zmiany przekroju odkuwki. Wielkość promieni zaokrągleń ustala się

na podstawie zaleceń (ujętych w normach), w których są określone ich minimalne wartości. Wartości te ustala się w oparciu o charakterystyczny wymiar odkuwki (rys. 7.33):

- ❑ promień r_1 – na podstawie wysokości odkuwki h_1 , liczonej od linii podziału matrycy;
- ❑ promień r_2 – w oparciu o wysokość odpowiedniego wgłębienia h_2 ;
- ❑ promień r_3 – na podstawie najmniejszej szerokości lub średnicy odkuwki d .

Zalecane wielkości promieni zaokrągleń zestawiono w tabeli 7.9.



Rys. 7.33. Promienie zaokrągleń krawędzi wraz z zależnymi wymiarami odkuwki (opis w tekście)

Tabela 7.9.

Najmniejsze wartości promieni zaokrągleń krawędzi odkuwki (wg rys. 7.33) oraz tolerancja wykonania zaokrągleń zgodnie z normą PN-EN 10243-1:2002.

Wymiar odkuwki: <i>h</i> ₁ , <i>h</i> ₂ lub <i>d</i> mm		stal			Cu, stopy Cu		Al, stopy Al, stopy Mg	
		<i>r</i> ₁	<i>r</i> ₂	<i>r</i> ₃	<i>r</i> ₁	<i>r</i> ₂	<i>r</i> ₁	<i>r</i> ₂
>	≤	mm						
	25	2,5	4,0	2,5	1,2	2,0	1,6	2,5
25	40		6,0	4,0		3,0		4,0
40	63	4,0	10,0	6,0	2,0	5,0	2,5	7,0
63	100	6,0	16,0	10,0	3,0	8,0	4,0	10,0
100	160	10,0	25,0	16,0	5,0	12,0	7,0	15,0
160	250		40,0	25,0	8,0	20,0	10,0	25,0
250	400	16,0	63,0		12,0	30,0	15,0	40,0
Tolerancja zaokrągłeń: gdy <i>r</i> ≤ 10 mm – ^{+50%} / _{-25%} ; gdy 10 mm < <i>r</i> ≤ 32 mm – ^{+40%} / _{-20%} ; gdy 32 mm < <i>r</i> ≤ 100 mm – ^{+32%} / _{-15%} ; gdy <i>r</i> > 100 mm – ^{+25%} / _{-10%} .								

Zbyt małe promienie zaokrągleń krawędzi wewnętrznych odkuwki (tj. zewnętrznych dla wykroju matrycy) powodują najczęściej:

- ❑ niekorzystne warunki płynięcia metalu doprowadzające do powstawania wad technologicznych, np. głębokich zakuć jako rezultatu zawijania się materiału w otoczeniu ostrej krawędzi występu wykroju roboczego;
- ❑ przerwanie ciągłości włókien materiału przez ostre krawędzie występow;
- ❑ zgniecenie i zniekształcenie krawędzi występow wykroju, które należy niezwłocznie usunąć poprzez regenerację narzędzi.

Natomiast zbyt małe zaokrąglenia zewnętrznych krawędzi odkuwki (wewnętrznych dla wykroju roboczego) są przyczyną:

- ❑ utworzenia karbów w otoczeniu krawędzi zagłębienia wykroju, które są przyczyną koncentracji naprężeń, a w ostateczności pęknięć;

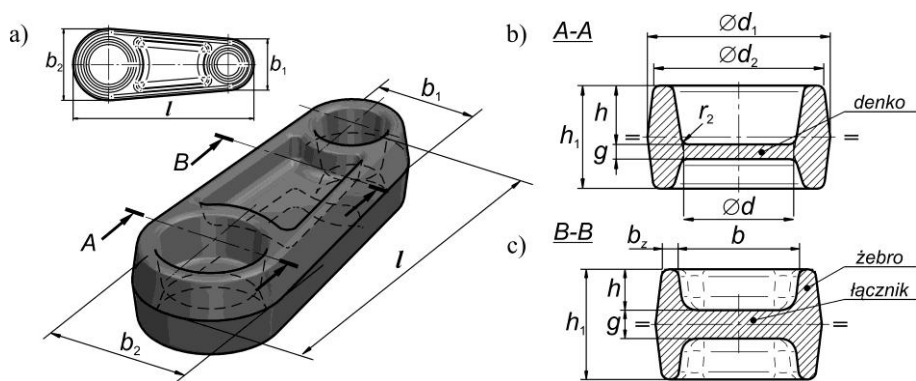
- ❑ nie wypełnienia przez materiał w całości wykroju roboczego;
- ❑ powstania pęknięć hartowniczych podczas obróbki cieplnej matrycy.

Ponadto, zaokrąglenia zewnętrznych krawędzi odkuwki pozostają w ścisłej korelacji z nadatkami na obróbkę mechaniczną. Wielkość przyjętego nadatku determinuje maksymalną wartość promienia zaokrąglenia danej krawędzi. Częstym zabiegiem, który zapewnia spełnienie zaleceń co do minimalnej wartości zaokrąglenia, jest odpowiednie powiększenie nadatku na obróbkę mechaniczną w otoczeniu danej krawędzi. Przyjmuje się, że zarys zaokrąglenia nie powinien przecinać zarysu nadatku na obróbkę.

Denka oraz wgłębienia na otwory

Podczas kucia matrycowego, które jest realizowane na młotach lub prasach (korbowych, śrubowych i hydraulicznych), nie wykonuje się otworów przelotowych w odkuwce. Jeżeli średnica tego otworu jest dostatecznie duża (w stosunku do innych, istotnych wymiarów odkuwki) oraz jego oś jest równoległa do kierunku ruchu matrycy, to podczas kucia wykonuje się odpowiednie wgłębienia dwustronne (lub jednostronne), pomiędzy którymi powstaje warstwa materiału. Jeżeli ten materiał tworzy powierzchnie (zazwyczaj płaskie, położone prostopadle do kierunku ruchu narzędzia) o małej grubości, to tak powstały nadatek technologiczny nazywa się denkiem (rys. 7.34b). Denkiem również są cienkie przekroje poprzeczne łączące żebra oraz łączniki w odkuwkach o przekrojach dwuteowych (rys. 7.34c) lub ceowych.

Podstawowym parametrem denka jest jego grubość g , która nie może być za mała – im mniejsza grubość, tym większa siła (lub energia) kucia. Grubość ta nie może być również za duża, ponieważ denko jest wycinane na prasach do okrawania. Minimalną wartość grubości denka płaskiego wyznacza się na podstawie zaleceń, które są ujęte w odpowiednich normach (np. w nieobowiązujących już normach PN-H-94301:1986 oraz PN-H-94801:1989). Bazując na tych normach,



Rys. 7.34. Przykład odkuwki użebrowanej (a), posiadającej dwa nieprzelotowe otwory oraz przekroje pokazujące kształt i wymiary denka płaskiego (b) i łącznika (c)

w tabeli 7.10 zestawiono sugerowane wartości grubości g denka płaskiego (lub łącznika), w przypadku gdy stosunek wymiarów denka $d/h < 2,5$ (rys. 7.34b). Maksymalna wartość grubości g denka zależy od parametrów operacji jego wycinania (np. nacisk prasy, temperatura materiału, konstrukcja okrojnika). Nerozłącznym elementem projektowania łączników jest określenie minimalnej grubości b_z żeber (rys. 7.34c). Wartości b_z pokazano w kolejnej tabeli 7.11, zgodnie z normami PN-H-94301:1986 oraz PN-H-94801:1989.

Tabela 7.10.

Minimalne grubości g denek i łączników (oznaczenia wg rys. 7.34).

średnia średnica d_s lub średnia szerokość b_s , mm ¹⁾		stal		stopy Ti		Cu, Al, stopy Cu, stopy Al, stopy Mg	
		stosunek wymiarów odkuwki (h_1/d_s) – dla denka lub (l/b_s) – dla łącznika					
		≤ 3	> 3	≤ 3	> 3	≤ 3	> 3
		g					
>	≤	mm					
	25	2,0	3,0	1,5	2,0	1,0	2,0
25	40	3,0	4,0	2,5	3,0	2,0	3,0
40	63	5,0	6,0	4,5	5,5	3,0	4,0
63	100	6,0	8,0	6,0	8,0	4,0	5,0
100	160	8,0	10,0	9,0	14,0	5,0	7,0
160	250	12,0	16,0	17,0	20,0	8,0	11,0
250	400	20,0	25,0	25,0	30,0	13,0	17,0

¹⁾ $d_s = 0,5(d_1 + d_2)$ – wg rys. 7.34b – liczone dla denka,
 $b_s = 0,5(b_1 + b_2)$ – wg rys. 7.34a – liczone dla łącznika.

Denek, w odróżnieniu od łączników, nie powinno się umieszczać w płaszczyźnie podziału matrycy, ponieważ takie ustawienie sprzyja nadmiernemu płynięciu materiału na zewnątrz wykroju roboczego. Natomiast w szczególnych przypadkach, gdy wykonanie denka płaskiego sprawia problemy technologiczne, zaleca się stosować denka o innym kształcie. Denka takie pokazano na kolejnym rys. 7.35 – są to:

- denko wklęsłe (rys. 7.35a) – zaleca się stosować, gdy średnica d (tzw. obcinania) jest 2,5 razy większa od głębokości wgłębienia h ; wymiary tego denka określa się na podstawie wzorów:

Tabela 7.11.

Najmniejsza grubości b_z żeber (wg rys. 7.34c).

Wysokość odkuwki h_1 , mm		stal	Cu, Al, stopy Cu, stopy Al, stopy Mg
			b_z
$>$	$\leq$	mm	
	10	3,0	2,0
10	16	4,0	3,0
16	25	5,0	4,0
25	40	8,0	5,0
40	63	12,0	8,0
63	100	20,0	13,0
100	160	32,0	21,0

$$\begin{aligned}
 g_{\min} &= 0,65g & g_{\max} &= 1,35g \\
 d_w &= 0,12d + 3 & r &= r_2 + 0,1h + 2
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

gdzie oznaczenia są zgodne z rys. 7.32a; grubość nominalna g jest wyznaczana z tabeli 7.10, natomiast promień r_2 – wg tabeli 7.9;

- denko z magazynkiem, rys. 7.35b – jest wykonywane w odkuwce, najczęściej w przypadku kucia wielozabiegowego, gdzie wstępnie wykonano denko w materiale (tj. podczas kształtowania w wykroju wstępnym); zaleca się, aby wstępnie wykonać denko wklęsłe, a dopiero w zabiegu końcowym – denko z magazynkiem, którego wymiary dobiera się na takich samych zasadach jak dla rowka na wypływkę zewnętrzną;
- denko wypukłe (rys. 7.35c) – jest stosowane podczas kucia odkuwek niskich, dla których głębokość wgłębienia $h < 0,07d$; zalecane wymiary wyznacza się w oparciu o wzory:

$$\begin{aligned}
 g_{\min} &= 0,4\sqrt{d}, \\
 g_{\max} &= 5 \cdot g_{\min},
 \end{aligned}
 \tag{7.5}$$

$$r = 5 \cdot h,$$

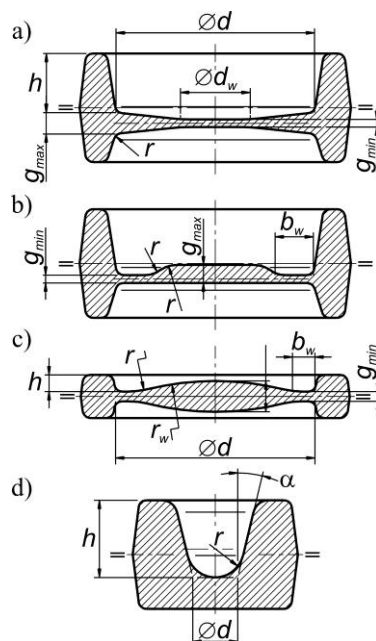
$$b_w = 0 \div 0,1d,$$

natomiast promień r_w jest wynikowy;

- wgłębienie jednostronne (rys. 7.35d) – jest stosowane, gdy otwory w odkuwce nie będą dziurowane podczas operacji okrawania; wykonanie wgłębień w miejscu przewidzianym na otwór (który będzie np. wiercony) jest ekonomicznie uzasadnione – otrzymuje się zwiększenie uzysku materiałowego; średnica d oraz głębokość h wgłębienia powinny spełnić warunek:

$$h \leq \frac{3,5d}{\cos 4\alpha \cdot 0,87\sqrt{R_{mt}} - 7\operatorname{tg}\alpha},
 \tag{7.6}$$

gdzie: R_{mt} – wytrzymałość materiału odkuwki w temperaturze kucia (wartość podana w MPa). Promień zaokrąglenia r powinien być możliwie największy.



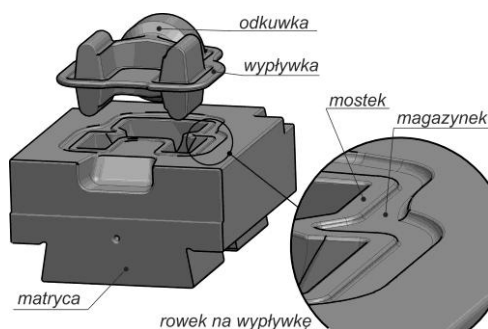
Rys. 7.35. Kształt i wymiary denka wklęsłego (a), z magazynkiem (b), wypukłego (c) oraz jednostronnego wgłębienia (d)

7.3. Rowek na wypływkę

Charakterystyczną cechą procesów kucia w matrycach otwartych jest powstawanie odpadu technologicznego w postaci wypływki (rys. 7.1, rys. 7.36). Jest to nadmiar materiału, który jest gromadzony w specjalnie zaprojektowanej przestrzeni, znajdującej się w płaszczyźnie podziału matrycy poza wykresem matrycującym – tj. w rowku na wypływkę, który wykonuje się tylko dla wykroju ostatecznego. Zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 7.36, rowek składa się z:

- ❑ mostka – jest to szczelina między dwoma połówkami matrycy, której rolą jest stawianie oporu swobodnemu wypływowi metalu na zewnątrz wykroju matrycującego, a tym samym – uzyskanie oczekiwanego stopnia wypełnienia wykroju przez materiał (tj. uniknięcie wad niewypełnienia);
- ❑ magazynka – jest to zbiornik (komora) gromadząca nadmiar materiału, przy czym objętość tej komory musi być większa od ilości gromadzonego metalu, aby wypływka nie ulegała dodatkowemu zgniataniu.

Trzecią rolą rowka na wypływkę jest utworzenie pierścienia metalu okalającego odkuwkę, która oddziela od siebie obie matryce. Jest to szczególnie istotne podczas kucia na młotach, gdzie ewentualne twarde uderzenie jednej matrycy o drugą mogłoby doprowadzić do ich uszkodzenia. Wszystkie trzy cele rowka są realizowane w różnym stopniu, w zależności od typu maszyny kuźniczej oraz cech procesu kucia.



Rys. 7.36. Przykładowa matryca do kucia na młotach wraz z rowkiem na wypływkę

Typowe kształty i wymiary rowka na wypływkę pokazano na rys. 7.37. Głównymi wymiarami są: wysokość h i szerokość l_1 mostka oraz wysokość b i szerokość l_2 magazynka. Wszystkie wymiary są dobierane podczas projektowania procesu kucia i zależą od wielu czynników – np. gatunku kuteego materiału, kształtu i wymiarów odkuwki, typu użytej maszyny, schematu kształtowania, itp.

Kształt magazynka zależy głównie od metody realizacji procesu kucia matrycowego. Podczas kucia na młotach lub prasach śrubowych stosowany jest magazynek zamknięty, zgodnie z rys. 7.37a. Dobranie odpowiedniej objętości komory magazynka jest łatwe, ponieważ przy kuciu na tych maszynach określenie ilości wypływki nie sprawia większych problemów. Wyróżnia się trzy

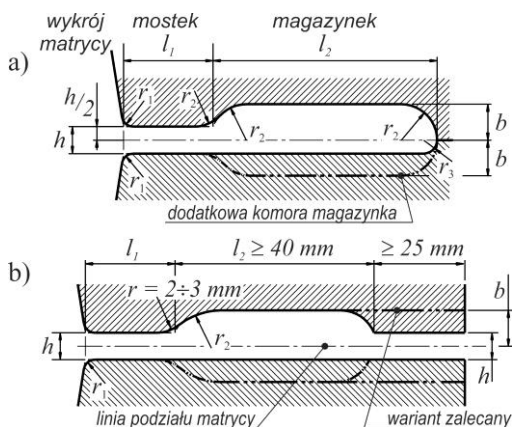
warianty umiejscowienia magazynka względem linii podziału, tj.: gdy komora znajduje się w:

- górnej matrycy (rys. 7.37a) – jest to wariant podstawowy, najczęściej zalecany i stosowany;
- dolnej matrycy (wg zarysu pokazanego na rys. 7.37a za pomocą linii przerywanej) – wariant ten jest stosowany gdy cała odkuwka (lub w przeważającej objętości) znajduje się w wykroju dolnym oraz gdy w trakcie okrawania wypływki odkuwka jest przekręcana o 180° w stosunku do ułożenia, w jakim znajdowała się w wykroju matrycującym;

- górnej i dolnej matrycy – jest to tzw. magazynek powiększony (tj. o dodatkowej komorze, która zwiększa wysokość magazynka do wartości $2b$ – linia ciągła i przerywana pokazana na rys. 7.37a), który jest zalecany do stosowania tylko w tych miejscach obwodu odkuwki, w których intensywność wypływu materiału na zewnątrz wykroju jest bardzo duża.

Podczas kucia na prasach korbowych stosuje się rowek o magazynku otwartym lub półotwartym, zgodnie z rys. 7.37b, który ma nieco inny kształt niż magazynek wykonywany w matrycach przeznaczonych dla młotów. Powodem tej różnicy jest trudność jednoznacznego określenia ilości wypływki, co jest ściśle powiązane z charakterem procesu kucia realizowanego na prasach. Uzyskanie zalecanego schematu kształtowania materiału poprzez spęczanie (rys. 7.4a) jest możliwe tylko przy zastosowaniu poprawnie zaprojektowanej i wykonanej przedkuwki. Charakterystyczny kształt otwarty lub półotwarty rowka wynika również z niebezpieczeństwa wystąpienia zakleszczenia matryc (wkładek matrycowych) w trakcie kucia w wykroju ostatecznym. Ponadto, jeżeli krawędź matrycy (wkładki) znajduje się stosunkowo blisko wykroju roboczego, to ze względów technologicznych zaleca się wykonać magazynek aż do krawędzi narzędzia (zgodnie z linią przerywaną pokazaną na rys. 7.37b). Umiejscowienie magazynka względem linii podziału matrycy jest określane na tych samych zasadach jak dla procesów realizowanych na młotach.

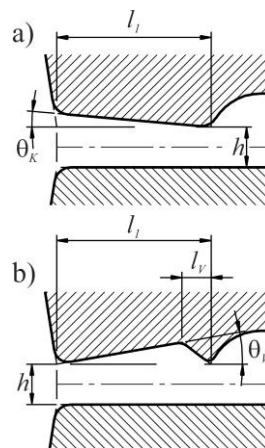
W praktyce przemysłowej stosowany jest najczęściej mostek tzw. tradycyjny, tj. o dwóch równoległych płaszczyznach (rys. 7.37), z uwagi na łatwość jego wykonania oraz dużą trwałość matryc. Oprócz kształtu tradycyjnego, mostek



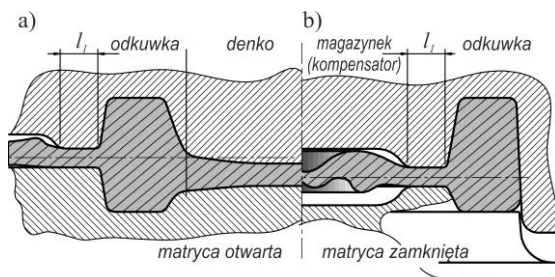
Rys. 7.37. Typowe kształty i wymiary rowka na wypływkę stosowanego w kuciu na młotach (a) lub na prasach (b)

może być wykonany o kształcie klinowym (rys. 7.38a) lub litery V (rys. 7.38b). Opracowanie nowych kształtów mostka wynika z poszukiwań takich rozwiązań technicznych, które przede wszystkim polepszą stopień wypełnienia wykroju matrycującego przy zachowaniu wymiarów głównych rowka oraz jednoczesnym obniżeniu siły lub energii kucia. Więcej informacji na temat wpływu kształtu i wymiarów mostka na przebieg procesu kucia znajduje się w monografii [73].

Zgodnie z rys. 7.39, rowek może zostać wykonany jako zewnętrzny (przeznaczony na wypływkę) lub wewnętrzny (przeznaczony na denko – rys. 7.35b). Zastosowanie rowka wewnętrznego jest bardzo korzystne w przypadku, gdy zostaje zachowana zasada, według której materiał znajdujący się w magazynku nie powinien być zgniatany. Takie rozwiązanie technologiczne powoduje istotne obniżenie siły kucia, np. w porównaniu do przypadku tradycyjnego, pokazanego na rys. 7.39a. Powodem obniżenia siły kucia jest znaczne zmniejszenie powierzchni kontaktu pomiędzy metalem a matrycą, oraz obniżenie wartości maksymalnego nacisku, który w przypadku pokazanym na rys. 7.39a występuje w centralnej części denka. Ponadto, przy rozwiązaniu zgodnym z rys. 7.39b, magazynek wewnętrzny może również pełnić rolę kompensatora, szczególnie podczas kucia w matrycach o konstrukcji zamkniętej.



Rys. 7.38. Alternatywne kształty mostka w roku na wypływkę



Rys. 7.39. Przykład zamiany procesu kucia w matrycach otwartych odkuwki z denkiem (a) na proces kucia w matrycach zamkniętych z rowkiem wewnętrznym (b)

7.3.1. Projektowanie rowka dla odkuwek stalowych

Reguły projektowe stosowane do określenia wymiarów rowka na wypływkę występują w postaci zależności matematycznych, tabel lub wykresów. Obecnie istnieje wiele zasad projektowych, które przede wszystkim dotyczą procesu kucia matrycowego odkuwek stalowych. Można je podzielić na reguły przeznaczone dla technologii kucia realizowanej na młotach lub na prasach (korbowych, śrubowych i hydraulicznych).

Kucie na młotach

Wymiary rowka na wypływkę (rys. 7.37a) dobiera się na podstawie zaleceń opracowanych przez Bruchanowa i Rebelskiego [8, 73, 92, 98]. W pierwszej kolejności wyznacza się minimalną wysokość mostka:

$$h = \beta \cdot \frac{F_{Od}}{O_{Od}}, \quad (7.7)$$

gdzie: O_{Od} – obwód przekroju odkuwki w płaszczyźnie podziału, F_{Od} – pole powierzchni przekroju odkuwki w płaszczyźnie podziału, β – współczynnik przeliczeniowy, którego wartość dobiera się np. w oparciu o wzór empiryczny:

$$\beta = 0,4325x^4 - 1,0862x^3 + 1,0305x^2 - 0,2337x + 0,0755, \quad (7.8)$$

w którym za x należy podstawić wyrażenie (F_{Od}/l^2) , gdzie l jest największym wymiarem przekroju odkuwki w płaszczyźnie podziału matryc – w przypadku odkuwek czołowych będzie to ich średnica, a dla odkuwek wydłużonych ich długość. Wartość współczynnika β również jest podawana w formie tabelarycznej lub wykresu, np. w podręczniku [92].

W oparciu o obliczoną wysokość h mostka dobiera się pozostałe wymiary rowka na wypływkę na podstawie tabeli 7.12.

Tabela 7.12.

Zalecane wymiary rowka na wypływkę przy kuciu na młotach (oznaczenia wg rys. 7.37a).

h	spęcznie, spęcznie z dziurowaniem			wyciskanie (odkuwki o kształcie prostym)			wciskanie (odkuwki o kształcie złożonym)			b	$r_1^{2)}$
	l_1	l_2	$F_r^{1)}$	l_1	l_2	$F_r^{1)}$	l_1	l_2	$F_r^{1)}$		
mm			cm ²	mm		cm ²	mm		cm ²	mm	
0,6	6	18	0,52	6	20	0,61	8	22	0,74	3,0	1,0
0,8	6	20	0,69	7	22	0,77	9	25	0,88	3,0	1,0
1,0	7	22	0,80	8	25	0,91	10	28	1,04	3,0	1,5
1,6	8	22	1,02	9	25	1,13	11	30	1,55	3,5	1,5
2,0	9	25	1,36	10	28	1,53	12	32	1,77	4,0	2,0
3,0	10	28	2,01	12	32	2,33	14	38	2,78	5,0	2,0
4,0	11	30	2,68	14	38	3,44	16	42	3,85	6,0	2,5
5,0	12	32	3,43	15	40	4,34	18	46	5,06	7,0	2,5
6,0	13	35	4,35	16	42	5,30	20	50	6,42	8,0	3,0
8,0	14	38	6,01	18	46	7,45	22	55	9,03	10,0	3,0
10,0	15	40	7,68	20	50	9,88	25	60	12,08	12,0	3,5

¹⁾ F_r – pole powierzchni przekroju rowka na wypływkę;

²⁾ gdy głębokość wykroju jest większa od 40 mm, to r_1 można zwiększyć o 0,5 mm;
na rys. 7.37a – $r_2 = b$, $r_3 = b/2$.

Objętość wypływkę, która powstaje podczas kucia na młotach, wynosi:

$$V_r = \varphi \cdot F_r \cdot [O_{Od} + \delta(l_1 + l_2)], \quad (7.9)$$

gdzie: F_r , l_1 , l_2 są wymiarami rowka odczytanymi z tabeli 7.12; O_{Od} – obwód przekroju odkuwki w płaszczyźnie podziału; φ – stopień wypełnienia rowka przez wypływkę, przy kuciu na młotach przyjmuje się $\varphi = 0,7$; δ – współczynnik uwzględniający kształt odkuwki. Dla odkuwek czołowych o zarysie kołowym lub zbliżonym do kwadratowego przyjmuje się $\delta = 2 \div 4$, dla odkuwek czołowych typu krzyżaków – $\delta = 6 \div 8$, dla odkuwek wydłużonych – $\delta = 4 \div 6$, dla odkuwek kombinowanych – $\delta = 6 \div 9$.

Kucie na prasach

Na ogół wypływka powstająca podczas kucia na prasach korbowych jest mniejsza niż podczas kucia na młotach, ale pod warunkiem poprawnego zaprojektowania odkuwki oraz procesu kucia. Powinno się zawsze dążyć do sytuacji, w której materiał w wykroju ostatecznym jest kształtowany poprzez spęczanie. Rowek na wypływkę (rys. 7.37b) dla procesu kucia odkuwek stalowych na prasach kuźniczych dobiera się na podstawie zaleceń Šapošnikowa [50, 73, 92, 95]. Wymiary rowka uzależnione są od nacisku prasy wywieranego na kształtowaną odkuwkę w wykroju wykańczającym. Zalecane wartości wymiarów umieszczono w tabeli 7.13.

Tabela 7.13.

Zalecane wymiary rowka na wypływkę przy kuciu na prasach (oznaczenia wg rys. 7.37b).

nacisk prasy MN		spęczanie, kucie z przedkuwki			mieszany sposób kształtowania, odkuwki o kształcie złożonym			b	r_1	r_2
		h	l_1	$F_r^{1)}$	h	l_1	$F_r^{1)}$			
>	≤	mm		cm ²	mm		cm ²	mm		
	6,3	1,5	4,0	2,08	1,0	5,0	1,98	5	0,5	15
6,3	10	2,0	4,0	2,52	1,5	6,0	2,43	6	1,0	15
10	16	2,5	5,	2,62	2,0	6,0	2,53	6	1,5	20
16	20	3,0	6,0	2,78	2,5	7,0	2,68	6	2,0	20
				3,32			3,22	8		
20	25	3,0	6,0	2,78	2,5	8,0	2,70	6	2,5	20
				3,32			3,26	8		
25	32	4,0	6,0	3,54	3,5	8,0	3,49	8	3,5	25
32	40	4,0	8,0	3,62	3,5	10,0	3,56	8	4,0	25

¹⁾ F_r – pole powierzchni przekroju rowka na wypływkę (wartość średnia, wyznaczona empirycznie dla rowka pokazanego na rys. 7.37b);

¹⁾ F_r – pole powierzchni przekroju rowka na wypływkę (wartość średnia, wyznaczona empirycznie dla rowka pokazanego na rys. 7.37b);

Objętość wypływkę, która powstaje podczas kucia na prasach kuźniczych, jest obliczana ze wzoru (7.10), przy czym wartości F_r oraz l_1 przyjmuje się z tabeli 7.13, a szerokość magazynka l_2 ustala się na podstawie rys. 7.37b, ale nie mniejszą

niż 40 mm. W przypadku kucia na prasach zaleca się, aby stopień wypełnienia rowka $\varphi = 0,80 \div 0,85$. Wartość współczynnika kształtu odkuwki ustala się w sposób: dla odkuwek czołowych o zarysie kołowym lub zbliżonym do kwadratowego przyjmuje się $\delta = 3,5 \div 4,5$, dla odkuwek wydłużonych lub kombinowanych – $\delta = 2,5 \div 3,5$.

7.3.2. Projektowanie rowka dla odkuwek z metali nieżelaznych

W tej części książki zostaną przedstawione zasady doboru wymiarów dla tradycyjnego rowka na wypływkę (rys. 7.37), które dotyczą odkuwek wykonanych z aluminium i jego stopów. Można je również stosować dla materiałów takich jak: stopy magnezu, miedzi i stopy miedzi. Objętość wypływki jest liczona w identyczny sposób jak dla wyrobów stalowych.

Stopy nieżelazne są materiałami trudniejszymi technologicznie niż stal, dlatego w porównaniu z technologią kucia odkuwek stalowych, promienie zaokrąglenia krawędzi mostka (np.: r_1 i r_2) powinny być większe. Zastosowanie zbyt ostrych krawędzi oraz mostu o zbyt małej wysokości jest główną przyczyną powstawania pęknięć w odkuwce na linii podziału matryc, co niestety jest widoczne dopiero po okrojeniu wypływki [22, 27].

Kucie na młotach

W przypadku kucia odkuwek z metali nieżelaznych na młotach stosuje się rowek na wypływkę o kształcie pokazanym na rys. 7.37a. Wariant kształtu mostka określa się na takich samych zasadach jak w przypadku kucia odkuwek stalowych. Wymiary rowka na wypływkę ustala się na podstawie masy części spadających młota, zgodnie z tabelą 7.14. Natomiast objętość wypływki wyznacza się na podstawie zależności (7.9), przyjmując takie same wartości współczynników φ oraz δ , jak przy kucia na młotach odkuwek stalowych.

Kucie na prasach śrubowych

Rowek na wypływkę podczas kucia na prasach śrubowych ma taki sam kształt jak w przypadku kucia na młotach – tj. zgodny z rys. 7.37a. Jego wymiary ustala się na podstawie nacisku wywieranego przez prasę, korzystając z tabeli 7.15. Objętość wypływki również oblicza się na tych samych zasadach jak przy kuciu na młotach.

Kucie na prasach korbowych

Rowek na wypływkę podczas kucia na prasach korbowych ma kształt zgodny z rys. 7.37b. Jego wymiary ustala się na podstawie nacisku wywieranego przez prasę, korzystając z tabeli 7.16. Objętość wypływki oblicza się identycznie jak przy kuciu na prasach odkuwek stalowych.

Tabela 7.14.

Zalecane wymiary rowka na wypływkę przy kuciu na młotach odkuwek wykonanych z metali nieżelaznych (kształt rowka oraz jego wymiary są zgodne z rys. 7.37a).

masa części spadających x10 ³ kg		h	spęczanie		wyciskanie		l ₂	b	r ₁ ²⁾
			l ₁	F _r ¹⁾	l ₁	F _r ¹⁾			
>	≤	mm		cm ²	mm	cm ²	mm		
	1,0	2,0	8	1,85	10	1,89	30	5	2,0
1,0	2,0	3,0	10	2,76	12	2,82	35	6	2,5
2,0	4,0	4,5	12	4,87	15	5,01	45	8	3,0
4,0	6,3	6,0	15	6,96	18	7,14	50	10	3,5
6,3	10	8,0	18	9,62	22	9,94	55	12	4,5

¹⁾ F_r – pole powierzchni przekroju rowka na wypływkę;

²⁾ gdy głębokość wykroju jest większa od 40 mm, to r₁ należy zwiększyć o 1,0 mm, natomiast, gdy jest mniejsza od 20 mm – to r₁ można zmniejszyć o 0,5 mm;

Tabela 7.15.

Zalecane wymiary rowka na wypływkę przy kuciu na prasach śrubowych (ciernych) odkuwek wykonanych z metali nieżelaznych (kształt rowka oraz jego wymiary są zgodne z rys. 7.37a).

nacisk prasy MN		h	spęczanie		wyciskanie		l ₂	b	r ₁
			l ₁	F _r ¹⁾	l ₁	F _r ¹⁾			
>	≤	mm		cm ²	mm	cm ²	mm		
	1,6	1,2	5,0	1,14	6,0	1,15	25	4,0	1,5
1,6	2,5	1,5	6,0	1,52	8,0	1,55	30	4,5	2,0
2,5	4,0	2,0	8,0	2,15	10,0	2,19	35	5,0	2,5

¹⁾ F_r – pole powierzchni przekroju rowka na wypływkę;

Tabela 7.16.

Zalecane wymiary rowka na wypływkę przy kuciu na prasach korbowych odkuwek wykonanych z metali nieżelaznych (kształt rowka oraz jego wymiary są zgodne z rys. 7.37b).

nacisk prasy MN		spężanie			wyciskanie			b	$r_1^{2)}$	r_2
		h	l_1	$F_r^{1)}$	h	l_1	$F_r^{1)}$			
>	≤	mm		cm ²	mm		cm ²	mm		
	6,3	2,0	6,0	2,28	2,0	8,0	2,32	5	2,0	10
6,3	10	2,0	6,0	2,58	2,0	8,0	2,62	6	2,5	12
10	16	3,0	7,0	2,85	3,0	9,0	2,91	6	3,0	14
16	20	3,5	8,0	3,57	3,5	10,0	3,64	8	3,0	16
20	25	4,0	9,0	3,72	4,0	11,0	3,80	8	3,5	18
25	40	5,0	10,0	4,54	5,0	12,0	4,64	10	4,0	20
40	63	6,0	12,0	5,36	6,0	14,0	5,48	12	4,5	22

¹⁾ F_r – pole powierzchni przekroju rowka na wypływkę;

²⁾ gdy głębokość wykroju jest większa od 40 mm, to r_1 należy zwiększyć o 0,5 mm, natomiast, gdy jest mniejsza od 20 mm – to r_1 można zmniejszyć o 0,5 mm;

7.4. Wsad na odkuwki matrycowe

Odkuwki matrycowe są wykonywane z materiału wsadowego, który najczęściej jest klasyfikowany według gatunku oraz postaci geometrycznej. Najbardziej rozpowszechnionym materiałem jest konstrukcyjna stal węglowa lub stopowa – stąd zdecydowana większość wiedzy technologicznej o kuciu matrycowym odnosi się do tej grupy metali. Oddzielną grupę stanowią metale nieżelazne, w której największy udział w produkcji odkuwek matrycowych mają stopy aluminium (głównie dla przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego). Do tej grupy materiałów zalicza się również stopy miedzi (przemysł maszynowy, budowlany i spożywczy), stopy magnezu (przemysł lotniczy) oraz stopy tytanu, których technologia obróbki plastycznej różni się w sposób znaczący od pozostałych wymienionych metali nieżelaznych.

W zależności od cech geometrycznych odkuwki oraz metody kucia, materiał wsadowy może mieć postać bryły elementarnej (np. odcinka pręta, rury, kęsa lub innego wyrobu hutniczego) lub bryły złożonej – przedkuwki (półwyrobu). Wyroby hutnicze są stosowane na materiał wsadowy bardzo powszechnie, szczególnie w przypadku kucia odkuwek czołowych lub wydłużonych o prostym kształcie. Mogą one mieć następującą postać:

- ❑ kęsów, o przekroju zbliżonym do kwadratowego lub płaskiego – wytwarzane są one z dokładnością zwykłą (od $+1,0/-2,0$ mm do $+3,0/-4,0$ mm) lub podwyższoną (od $\pm 1,1$ do $\pm 2,8$ mm) oraz w zakresie wymiarowym (wymiar boku kwadratu) od 42 mm do 140 mm;
- ❑ prętów okrągłych i kwadratowych (gorącowałcowanych) – wykonuje się je z dokładnością od $+0,2/-0,5$ mm do $+0,9/-2,5$ mm, w przedziale wymiarowym: $\varnothing 8 \div 200$ mm (pręty okrągłe) oraz $12 \div 160$ mm (pręty kwadratowe);
- ❑ prętów kształtowych (wałcowanych), głównie o przekroju płaskim (w zakresie od 15×4 do 400×100 mm) lub sześciokątnym (w zakresie $19 \div 100$ mm);
- ❑ prętów okrągłych ciągnionych (w przedziale $3 \div 100$ mm i dokładności od $+0,00/-0,08$ mm do $+0,00/-0,25$ mm) lub łuszczonych (głównie stalowych) – materiał wsadowy o takiej postaci jest zalecany przy kuciu dokładnym, gdzie nagrzew materiału jest miejscowy lub podczas kucia na zimno;
- ❑ rur bezszwowych gorącowałcowanych lub ciągnionych na zimno.

W przypadku kucia odkuwek wydłużonych lub kombinowanych, które charakteryzują się złożonym kształtem, stosuje się materiał wsadowy w postaci przedkuwek rzeczywistych. Przedkuwka jest to bryła o kształcie możliwie zbliżonym do odkuwki, szczególnie w zakresie zarysu w płaszczyźnie podziału matrycy. Poszczególne przekroje poprzeczne przedkuwki są równe odpowiednim przekrojom poprzecznym odkuwki, z uwzględnieniem ewentualnej wypłytki. Wyróżnia się dwa rodzaje przedkuwek:

- ❑ idealną – jest to wyidealizowana bryła obrotowa, którą projektuje się w celu określenia optymalnego kształtu przedkuwki rzeczywistej oraz poprawnego procesu technologicznego kucia matrycowego;
- ❑ rzeczywistą – jest to ostateczna postać materiału wsadowego – w przypadku kucia na młotach jest ona wytwarzana w tej samej matrycy, ale przy użyciu wykrojów przygotowawczych, natomiast podczas kucia na prasach przedkuwka jest wykonywana w odrębnej operacji na innej maszynie kuźniczej. Przedkuwka jest wykonywana zawsze ze wsadu o postaci bryły elementarnej.

Niezależnie od postaci materiału wsadowego, jego objętość jest ustalana w oparciu o następującą zależność:

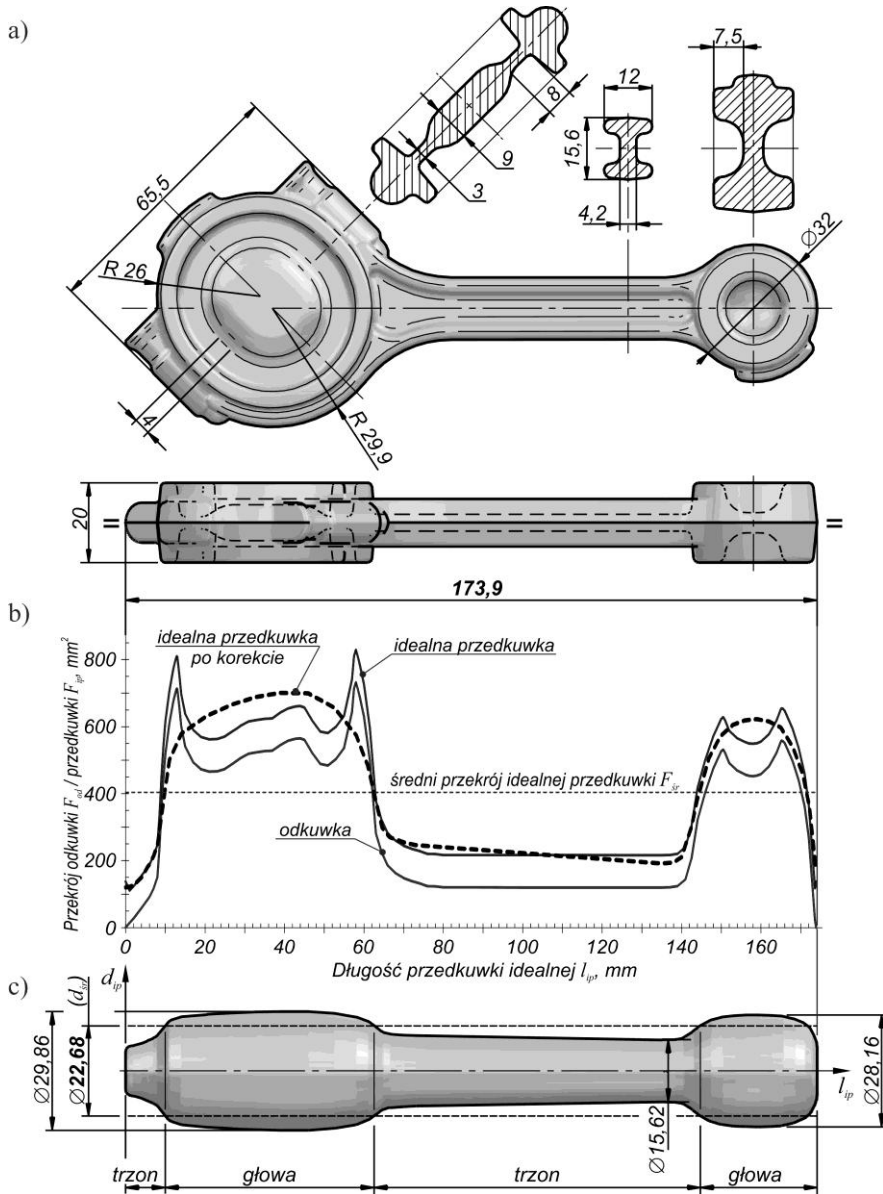
$$V_w = (V_{od} + V_r) \cdot \frac{100}{100 - z} \quad (7.10)$$

gdzie: V_{od} – objętość odkuwki; V_r – objętość wypływkę, przy czym sumę tych objętości ($V_{od} + V_r$) można zastąpić objętością idealnej przedkuwki V_{ip} , jeżeli została zaprojektowana. Występujący we wzorze (7.10) współczynnik z uwzględnia straty materiałowe wynikające z powstawania zgorzeliny podczas nagrzewu materiału wsadowego. Jeżeli nagrzew jest realizowany w piecach komorowych paliwowych, to $z = 2,5 \div 4,0$. Natomiast dla nagrzewu elektrycznego przyjmuje się $z = 0,5 \div 1,5$. Jeżeli przewiduje się wielokrotny nagrzew materiału wsadowego, to każdy kolejny nagrzew wymusza przyjęcie w obliczeniach wartości tego wskaźnika zwiększonego o 50%. Przy kuciu na młotach należy również uwzględnić naddatek na tzw. kleszczowinę.

7.4.1. Opracowanie przedkuwki idealnej

Punktem wyjścia do opracowania przedkuwki idealnej jest rysunek odkuwki, wraz z dobranym rowkiem na wypływkę. Procedura postępowania zostanie omówiona z użyciem przykładu, który zamieszczono na rys. 7.40 (odkuwka wydłużona o osi prostej). Przed przystąpieniem do procesu projektowania przedkuwki należy wyznaczyć charakterystyczne wielkości odkuwki (rys. 7.40a) – tj.: obwód O_{od} i pole powierzchni F_{od} rzutu odkuwki na płaszczyznę podziału matrycy oraz objętość odkuwki V_{od} . Należy również wyznaczyć pole powierzchni F_r przekroju poprzecznego wypływkę, jeżeli w technologii kucia jest przewidziany ten naddatek. Pole F_r jest zawarte w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni podziału matrycy, a jego wartość najczęściej dobiera się na podstawie tabel 7.12÷7.16. Następnym etapem projektowania jest wykonanie wykresów:

- ❑ przekrojów odkuwki w układzie współrzędnych $l_{ip} - F_{od}$ (rys. 7.40b), gdzie: l_{ip} – długość przedkuwki idealnej (na wykresie odkłada się odległości poszczególnych przekrojów odkuwki od początku układu współrzędnych);



Rys. 7.40. Uproszczony rysunek odkuwki (a), wykresy przekrojów odkuwki i idealnej przedkuwki (b) oraz wykres (rysunek) przedkuwki idealnej (c)

F_{Od} – pole charakterystycznych przekrojów poprzecznych odkuwki (w płaszczyźnie prostopadłej do osi głównej);

- przekrojów przedkuwki idealnej w układzie współrzędnych $l_{ip}-F_{ip}$ (rys. 7.40b); gdzie F_{ip} – przekrój poprzeczny przedkuwki idealnej wyznaczono-

ny jako suma odpowiedniego przekroju odkuwki oraz wypływki – dla przekrojów skrajnych, F_{ip} wyznacza się na podstawie wzoru:

$$F_{ip} = 2 \cdot F_r, \quad (7.11)$$

natomiast dla przekrojów środkowych:

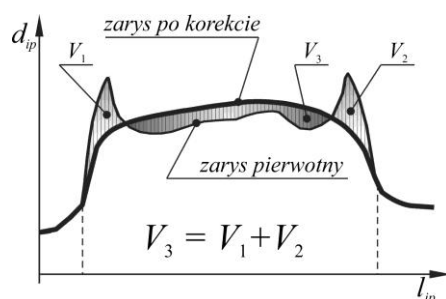
$$F_{ip} = F_{od} + 2 \cdot \varphi \cdot F_r, \quad (7.12)$$

gdzie: φ – stopień wypełnienia rowka przez wypływkę (wartość jest dobierana na identycznych zasadach jak w przypadku wzoru (7.9));

- przedkuwki idealnej w układzie współrzędnych $l_{ip}-d_{ip}$, gdzie d_{ip} jest średnicą przedkuwki, którą wyznacza się ze wzoru:

$$d_{ip} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot F_{ip}}. \quad (7.13)$$

Obliczoną ze wzoru (7.13) wartość średnicy przedkuwki odkłada się na wykresie symetrycznie względem osi l_{ip} . Po połączeniu punktów na wykresie powstaje zarys przedkuwki idealnej (rys. 7.40), który powinien być regularny. Linie wklęsłe, szczególnie o ostrych krawędziach zamienia się na linie wypukłe, zachowując przy tym równość objętości V w danej strefie przedkuwki, zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 7.41. Czynność tą można wykonać już na etapie sporządzania wykresu przekrojów przedkuwki (rys. 7.40b).



Rys. 7.41. Sposób zamiany nieregularnego zarysu przedkuwki na zarys wypukły, gdzie: d_{ip} , l_{ip} – średnica i długość przedkuwki idealnej

Przedkuwka elementarna

Charakterystycznym parametrem przedkuwki idealnej jest średnica średnia d_{sr} , której wartość wyznacza się ze wzoru:

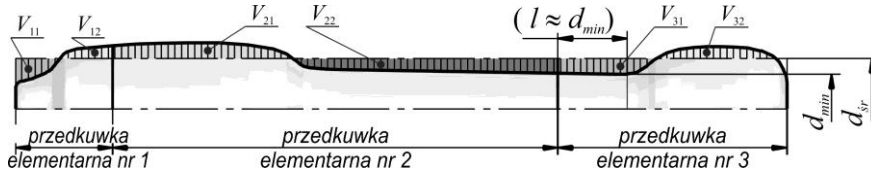
$$d_{sr} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot F_{sr}}, \quad (7.14)$$

w którym F_{sr} jest przekrojem średnim (rys. 7.40b) wynoszącym:

$$F_{sr} = \frac{V_{ip}}{l_{ip}}, \quad (7.15)$$

gdzie: V_{ip} – objętość idealnej przedkuwki, l_{ip} – długość idealnej przedkuwki.

Średnica średnia d_{sr} dzieli przedkuwkę idealną na co najmniej dwie części. Przekroje większe od d_{sr} nazywa się głową, natomiast mniejsze od d_{sr} – trzonem. Jeżeli przedkuwka idealna składa się tylko z głowy i trzona, to nazywa się ją przedkuwką elementarną. Jednak dla większości odkuwek uzyskuje się przedkuwkę złożoną, które może składać się z: dwóch głów i jednego trzona,



Rys. 7.42. Podział idealnej przedkuwki złożonej (z rys. 7.40c) na przedkuwki elementarne – opis w tekście

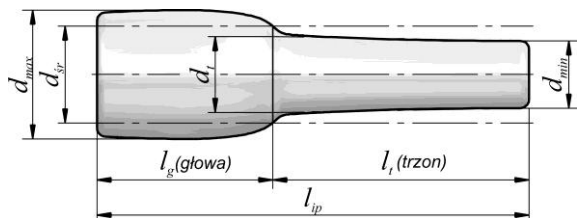
dwóch głów i dwóch trzonów (np. rys. 7.40c), trzech głów i dwóch trzonów lub więcej niż trzech głów i dwóch trzonów. Taka przedkuwka idealna musi zostać rozłożona na przedkuwki elementarne, ponieważ projektowanie procesu kucia (szczególnie wielowykrojowego na młocie) zawsze sprowadza się do analizy przedkuwki elementarnej, ale tylko tej, która jest najtrudniejsza pod względem technologicznym.

Sposób podziału przedkuwki złożonej pokazano na rys. 7.42, na przykładzie wcześniej omawianym z rys. 7.40. Linie podziału są prowadzone tak, aby została zachowana równość objętości nad i pod średnicą średnią d_{sr} – muszą zostać spełnione warunki: $V_{11} = V_{12}$, $V_{21} = V_{22}$ oraz $V_{31} = V_{32}$. Przy większym pochyleniu trzona, linię podziału można poprowadzić w odległości l (równej ok. d_{min}) od minimalnego przekroju przedkuwki (rys. 7.42), przy czym w ten sposób uzyskane przedkuwki elementarne będą miały zazwyczaj odmienne wartości średnicy d_{sr} . Dlatego ten parametr geometryczny zawsze należy ponownie wyznaczyć dla każdej przedkuwki elementarnej z osobna.

Przedkuwka elementarna jest opisana również innymi parametrami niż tylko średnicą średnią. Determinują one technologię wykonania przedkuwki metodą kucia wielowykrojowego – szczegóły na ten temat zostaną omówione w podrozdziale 7.5.1. Zgodnie z rys. 7.43, parametrami tymi są: długość głowy l_g , długość trzona l_t , średnica minimalna d_{min} (która jest jednocześnie minimalną średnicą trzona), średnica maksymalna przedkuwki d_{max} (jednocześnie głowy) oraz największa średnica trzona d_t , którą wyznacza się ze wzoru:

$$d_t = \frac{2 \cdot F_t}{l_t} - d_{min}, \quad (7.16)$$

gdzie F_t jest polem przekroju osiowego trzona przedkuwki elementarnej.

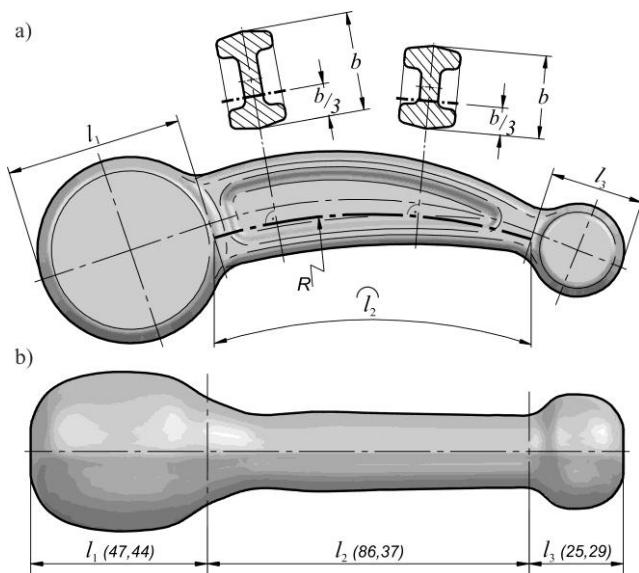


Rys. 7.43. Idealna przedkuwka elementarna (nr 2 z rys. 7.42), wraz z parametrami geometrycznymi; opis w tekście

Odkuwki z osią wygiętą

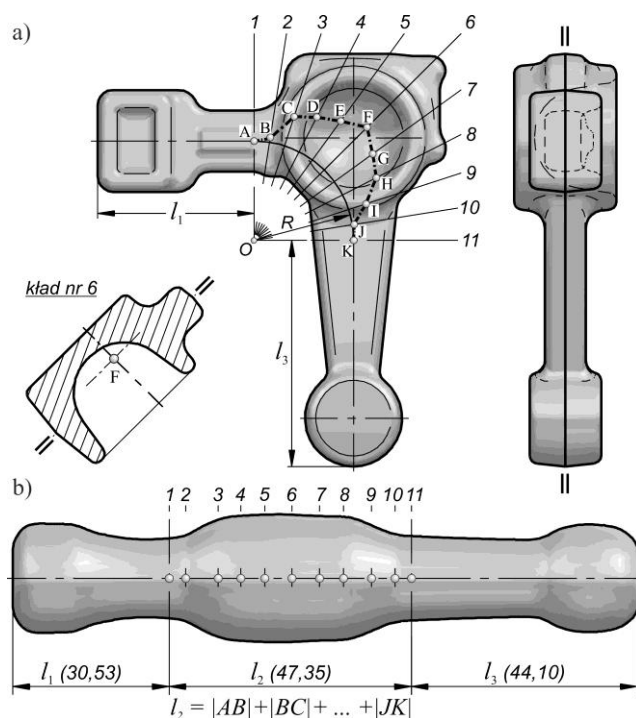
Dla odkuwek łagodnie wygiętych (rys. 7.44a), idealną przedkuwkę (rys. 7.44b) opracowuje się w sposób analogiczny jak w przypadku odkuwek z osią

prostą, ale na podstawie rysunku odkuwki będącej w stanie wyprostowanym. Przyjmuje się, że długość l_2 wygiętego fragmentu odkuwki jest równa długości łuku, przebiegającego przez punkty znajdujące się w odległości $\frac{1}{3}$ szerokości b odkuwki od strony środka krzywizny. Fragmenty odkuwki, w których oś główna jest prosta, nie podlegają transformacji – na rys. 7.44a są to końce odkuwki o długości l_1 i l_3 .



Rys. 7.44. Sposób opracowania przedkuwki idealnej (b) dla odkuwki o łagodnym wygięciu (a)

W sytuacji, kiedy fragment odkuwki jest mocno wygięty (rys. 7.45a), prostowanie odkuwki jest realizowane w nieco odmienny sposób. W tym celu należy wyznaczyć położenie punktu O na płaszczyźnie podziału matrycy. Z tego punktu prowadzi się przekroje oznaczone na rysunku numerami od 1 do 11, przy czym ilość przekrojów wpływa na dokładność transformacji. Dla poszczególnych przekrojów wyznacza się ich środki ciężkości, oznaczone odpowiednio literami od A do K. Skrajne przekroje (na rys. 7.45



Rys. 7.45. Sposób opracowania przedkuwki idealnej (b) dla odkuwki o mocnym wygięciu (a)

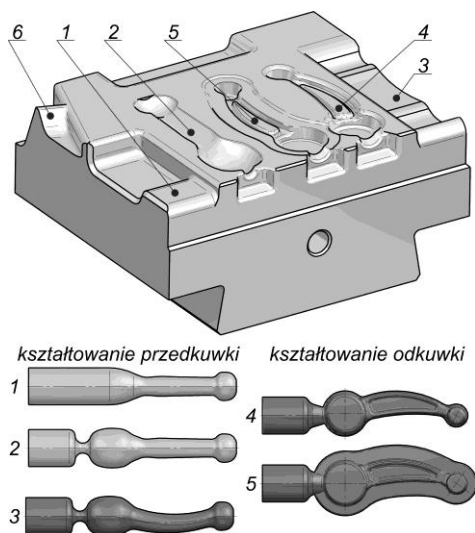
oznaczone jako 1 i 11) dzielą odkuwkę na trzy części o długości l_1 , l_2 oraz l_3 , gdzie l_1 i l_3 są długościami tych fragmentów odkuwki (wzdłuż osi głównej), które nie podlegają transformacji. Długość l_2 (tj. tej części odkuwki, którą należy wyprostować) jest sumą długości odcinków łączących punkty od A do K. Punkty te są rzutem środków ciężkości przekrojów na płaszczyznę podziału matrycy. Zatem, ostateczna długość idealnej przedkuwki (w obu przypadkach, pokazanych na rys. 7.44 i rys. 7.45) wynosi: $l_p = l_1 + l_2 + l_3$.

7.4.2. Wykonanie przedkuwki rzeczywistej

Przedkuwkę rzeczywistą można wykonać wieloma metodami obróbki plastycznej. W przypadku kucia na młotach, zarówno przedkuwkę jak i odkuwkę kuje się w jednej operacji, podzielonej na szereg zabiegów – tj. stosując jedną, wielowykrojową matrycę, w której znajdują się przede wszystkim wykroje przygotowawcze (dla ukształtowania przedkuwki) oraz matrycujące (nadające ostateczny kształt odkuwce). Przykład takiego sposobu uzyskania przedkuwki rzeczywistej, wraz z wykonaniem odkuwki, przedstawiono schematycznie na rys. 7.46, który nawiązuje do rys. 7.44. Pokazane zabiegi 1 i 2 dotyczą kształtowania przedkuwki, zabieg 3 umożliwia „wygięcie” osi głównej przedkuwki, natomiast zabiegi 4 i 5 dotyczą kształtowania odkuwki (matrycowania). Ostatnim zabiegiem jest odcięcie odkuwki od pręta – na rys. 7.46 pokazano tylko lokalizację noża odcinającego na matrycy.

Taki sposób kucia przedkuwki jest możliwy tylko na młotach matrycowych, ponieważ jej kształtowanie wymaga wielu uderzeń, których energia musi być odpowiednio dobrana. Dlatego na prasach niektóre zabiegi nie są możliwe do wykonania – w takiej sytuacji na prasie kuje się tylko odkuwkę, natomiast przedkuwka rzeczywista jest wykonywana w osobnej operacji, przy użyciu innej maszyny. W praktyce przemysłowej spotyka się następujące metody wykonania przedkuwek:

- kucie swobodne i półswobodne – stosuje się w produkcji małoseryjnej wszelkiego rodzaju przedkuwek wydłużonych oraz przedkuwek zwartych i płaskich,



Rys. 7.46. Kucie wielowykrojowe na młocie, gdzie: 1 – wydłużanie, 2 – rolowanie, 3 – gięcie, 4 – matrycowanie wstępne, 5 – matrycowanie wykańczające, 6 – odcinanie odkuwki od pręta (nóż odcinający)

które wymagają wstępnego spęczania; metoda ta jest pracochłonna, jakość i dokładność wykonanych przedkuwek jest niska oraz występują znaczne straty materiału, ale zaletą jest uniwersalność oraz proste i tanie narzędzia;

- ❑ kucie na kowarkach, głównie typu rotacyjnego lub mimośrodowo-korbowego – wydajna metoda kształtowania przedkuwek wydłużonych o zmiennym przekroju (np. rys. 7.40b) z dużą dokładnością;
- ❑ kształtowanie na elektroszczarkach – metoda jest stosowana w przypadku kształtowania przedkuwek mających duże zgrubienie na końcu, tj. gdy stosunek długości spęczania do średnicy jest bardzo duży; zwykle metodą tą spęca się pręty o średnicy do 100 mm;
- ❑ kucie na kuźniarkach – metoda ta jest powszechnie stosowana przy kuciu przedkuwek wydłużonych posiadających miejscowe zgrubienie, które jest wykonywane przez spęczanie w jednej lub w kilku operacjach; na maszynach tych można również wykonywać przedkuwki czołowe drażone, np. do prasowania obwiedniowego na gotowo wyrobów typu tarczy, stożkowych kół zębatych itp.; kucie przedkuwek na kuźniarkach jest stosowane w kuźniach mających takie maszyny przeznaczone do produkcji gotowych wyrobów;
- ❑ kucie na kuźniczych prasach trójsuwakowych KPT oraz za pomocą przyrządów specjalnych (np. metodą TR – Tadeusza Ruta), które są umieszczane na prasach uniwersalnych – kształtowane są przedkuwki mające zgrubienia w dowolnym miejscu na dowolnie długim pręcie; metoda ta jest opłacalna już przy serii wynoszącej kilkaset sztuk rocznie;
- ❑ walcowanie wzdłużne na walcarkach kuźniczych – metodą tą wykonuje się szeroki asortyment przedkuwek wydłużonych, np. przedkuwki korbowodów, korb rowerowych, kluczy maszynowych, różnego rodzaju dźwigni ogniów i osi; kształtowanie przeprowadza się na specjalnych walcarkach kuźniczych ramowych lub konsolowych; metoda ta jest bardzo popularna;
- ❑ walcowanie poprzeczne, w tym: na walcarce trójwalcowej kopiującej, za pomocą walców śrubowych (tą metodą wykonuje się mniejsze przedkuwki) oraz metodą WPK (tj. walcowania poprzeczno-klinowego; np. przypadek pokazany na rys. 7.16) – kształtowane są przedkuwki wydłużone, o zmiennym przekroju i w kształcie bryły obrotowej.

7.5. Konstrukcja matryc

Podstawowe informacje na temat matryc oraz ich klasyfikacji zostały podane w rozdziale 7.1.1. Również pewne charakterystyczne zagadnienia konstrukcyjne omówiono już wcześniej, szczególnie te, które dotyczą wyboru kształtu i położenia powierzchni podziału (rozdział 7.2.4) oraz budowy rowka na wypływkę

(rozdział 7.4). W tym rozdziale został rozwinięty temat budowy matryc, szczególnie w zakresie ich wykonania, konstrukcji wykrojów roboczych oraz trwałości. Tematyka konstrukcji matryc (wykrojów roboczych) jest omawiana osobno dla technologii kucia na młotach i kucia na prasach, co jest podyktowane istotnymi różnicami w charakterze pracy tych maszyn (rozdział 7.1.3).

7.5.1. Matryce dla kucia na młotach

Ze względu na dynamiczny charakter pracy młotów, matryce są wykonywane ze stosunkowo masywnych bloków ze stali narzędziowej. Z kolei, duża uniwersalność technologii kucia na tych maszynach sprawia, że najczęściej są wykonywane odkuwki wymagające wielu zabiegów – stąd w praktyce przemysłowej dominują matryce wielowykrojowe. W zależności od przeznaczenia wyróżnia się trzy typy wykrojów roboczych:

- ❑ matrycujące, które służą do wykonania odkuwki – wyróżnia się wykroj wykańczający i wstępny;
- ❑ przygotowawcze, które są stosowane do wykonania przedkuwki;
- ❑ pomocnicze – są przeznaczone do wykonywania czynności pomocniczych przy kuciu wielowykrojowym, np. odcinanie odkuwki od pręta (rys. 7.46 – nóż odcinający 6).

Wykroje matrycujące

Wykroj matrycujący wykańczający (ostateczny) jest odzwierciedleniem odkuwki w stanie gorącym i jest większy od odkuwki zimnej o skurcz materiału. Wielkość skurczu zależy od temperatury kucia oraz gatunku materiału. Dla stali węglowych i stopowych przyjmuje się skurcz $1,0 \div 1,5\%$. Dla stopów aluminium oraz stopów miedzi skurcz wynosi $0,8 \div 1,0\%$, dla stopów magnezu – $0,7 \div 0,8\%$, natomiast dla stopów tytanu – $0,6 \div 0,7\%$.

Wykroj wykańczający powinien znajdować się w centralnej części matrycy – tzn., że środek tego wykroju powinien pokrywać się ze środkiem matrycy. Pod pojęciem środka wykroju rozumie się punkt przyłożenia wypadkowego nacisku materiału na matrycę w kierunku uderzenia. Natomiast środek matrycy jest to punkt przecięcia się osi jaskółczego ogona (w części mocowania matrycy) z osią wpustu zabezpieczającego przed przesunięciem się narzędzia. Punkt ten przy zamocowaniu matrycy do bijaka i poduszki szaboty młota powinien leżeć na osi tłoczyska.

Jak już to wielokrotnie zaznaczano, wykroj wykańczający jest jedynym wykrojem roboczym, który jest wykonywany z rowkiem na wypływkę.

Wykroj matrycujący wstępny (wstępnie wykańczający) jest stosowany w celu ułatwienia procesu kucia w wykroju wykańczającym. Efektem jego użycia podczas kucia jest zmniejszenie strat materiałowych w postaci wypływk

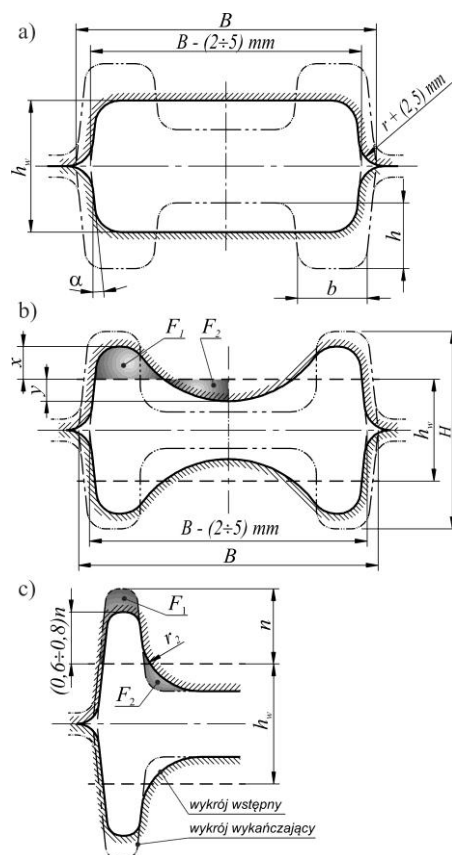
oraz zwiększenie trwałości wykroju wykańczającego. Wykroj wstępny znajduje się tuż obok wykroju wykańczającego, najczęściej po lewej stronie. Stosuje się go dla odkuwek geometrycznie złożonych, o dużym stopniu trudności wykonania. Są to odkuwki mające przekroje dwuteowe, występy i rozwidlenia oraz odkuwki, które są ułożone prostopadłe do osi przy kuciu w matrycy wielokrotnej. Wykroj wstępny wykonuje się na podstawie wykroju wykańczającego i różni się od niego:

- ❑ brakiem rowka na wypływkę;
- ❑ ma bardziej łagodny kształt, możliwie zbliżony do prostego, gdzie krawędzie wykroju w płaszczyźnie podziału matryc są znacznie bardziej zaokrąglone (nawet pięciokrotnie);
- ❑ promienie zaokrąglenia są powiększone, najczęściej o ok. 20% oraz dodatkowo zwiększone o 2÷5 mm;
- ❑ ma mniejszą szerokość (o ok. 1÷2 mm) dla łatwiejszego ułożenia odkuwki w wykroju wykańczającym;
- ❑ ma większą głębokość – wynika to z pojemności wykroju, który musi być równy objętości odkuwki z wypływką;
- ❑ ma znacznie większe pochylenia ścianek bocznych (o ok. 1÷3°), ale tylko w przypadku matryc posiadających głębokie i trudno wypełniane wykroje.

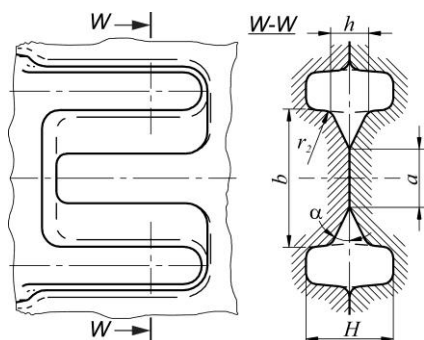
Dla odkuwek uźebrowanych lub o przekroju dwuteowym kształt wykroju wstępnego zależy od szerokości b i wysokości h żeber oraz odległości między żebrami. Stosuje się trzy rodzaje wykrojów wstępnych:

- ❑ trapezowy (rys. 7.47a), gdy $b/h < 2$;
- ❑ opływowy (rys. 7.47b), gdy $b/h > 2$;
- ❑ dla odkuwek o dużej odległości między żebrami (rys. 7.47c).

Podstawowym parametrem wykroju wstępnego trapezowego jest jego wysokość h_w , która wynika z warunku równości przekroju poprzecznego tego wykroju i wykroju wykańczającego. Wysokość tą wyznacza się ze wzoru:



Rys. 7.47. Konstrukcja wykroju matrycującego wstępnego dla odkuwek uźebrowanych lub o przekroju dwuteowym



Rys. 7.48. Konstrukcja wykroju matrycowego wstępnego z wyginakiem

$$h_w = \frac{B}{\operatorname{tg} \alpha} \pm \sqrt{\frac{B^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} - \frac{2F}{\operatorname{tg} \alpha}}, \quad (7.17)$$

gdzie F jest polem przekroju poprzecznego odkuwki wraz z wypływką. Pozostałe oznaczenia są zgodne z rys. 7.47a. Dla wykroju opływowego, zarys koryguje się bazując na wysokości średniej h_w – wzór (7.17). Wielkość występu x wynosi:

$$x = 0,25(H - h_w), \quad (7.18)$$

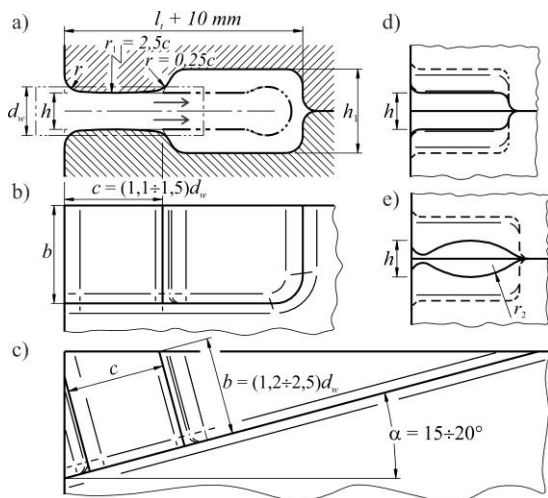
natomiast głębokość wklęsnięcia y jest określa na podstawie warunku $F_1 = F_2$ (rys. 7.47b). Dla wykroju pokazanego na rys. 7.47c, po określeniu wysokości występu modyfikuje się zarys zaokrąglenia r_2 w ten sposób, aby powstałe pole F_2 było równe polu F_1 .

Na rys. 7.48 pokazano kształt wykroju wstępnego z wyginakiem, który jest stosowany dla odkuwek rozwidlonych lub ułożonych prostopadłe do osi przy kuciu w matrycy wielokrotnej. Szerokość a wyginaka jest równa $0,25b$ (z zachowaniem przedziału $8 \div 30$ mm), wysokość h przyjmuje się $(0,4 \div 0,7)H$ oraz kąt pochylenia $\alpha = 10 \div 50^\circ$.

Wykroje przygotowawcze

Wykroje przygotowawcze dzieli się na cztery grupy, w zależności od przeznaczenia. Do **grupy pierwszej** zalicza się wykroje:

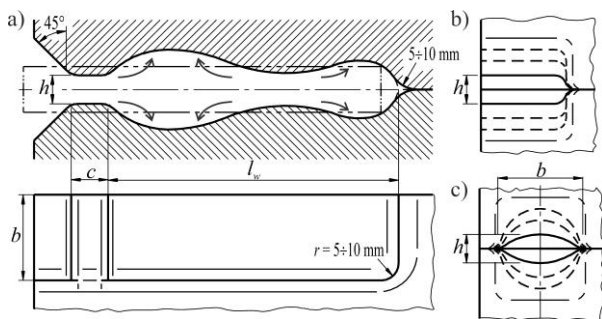
- wydłużające (rys. 7.49), które są przeznaczone do zwiększenia długości materiału poprzez zmniejszenie jego przekroju poprzecznego na całości lub wybranych fragmentach; proces kształtowania w takim wykroju jest realizowany na tych samych zasadach co wydłużanie w kuciu swobodnym; wykroje wydłużające mogą być otwarte (rys. 7.49d) lub zamknięte (rys. 7.49e), które skutecznie ograniczają niepożądane poszerzenie materiału i zwiększają intensywność



Rys. 7.49. Konstrukcja wykroju wydłużającego wraz z ważniejszymi wymiarami; gdzie: d_w – średnica materiału wsadowego, l_1 – długość trzona przedkuwki

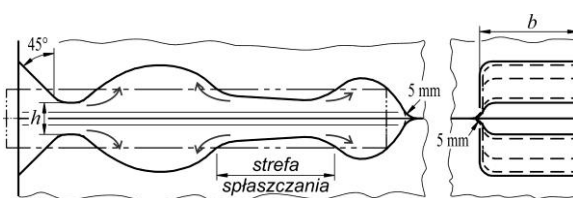
jego płynięcia wzdłuż swojej osi; wykroje te umieszcza się na lewym brzegu matrycy równolegle (rys. 7.49b) lub skośnie (rys. 7.49c) do osi zaogonowania narzędzia; podstawowym parametrem jest prześwit między kowadłami h , który wynosi $(0,7 \div 0,8)d_{min}$, gdzie d_{min} oznacza minimalną średnicę przedkuwki idealnej – pozostałe wymiary dobiera się na podstawie zaleceń opisanych szczegółowo np. w [50, 92, 95, 98];

- rolujące (podkuwające; rys. 7.50), które są przeznaczone do znacznego zwiększenia niektórych przekrojów materiału kosztem zmniejszenia innych jego przekrojów; proces rolowania jest realizowany w kilku uderzeniach, przy których przedkuwka jest obracana wokół swojej osi, dzięki czemu uzyskuje się zaokrąglenie ostrych krawędzi oraz rozmieszczenie materiału zgodne z zaprojektowaną przedkuwką idealną; wykroj rolujący może być otwarty (rys. 7.50b) lub zamknięty (rys. 7.50c);



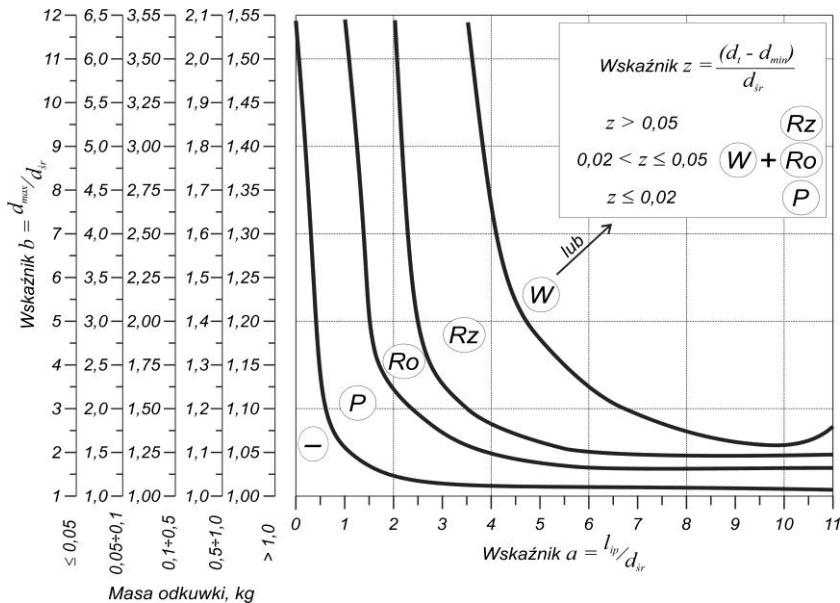
Rys. 7.50. Konstrukcja wykroju rolującego

- przewężające (zwężająco-rozplaszczające; rys. 7.51), które służą do zmniejszania grubości materiału w strefach spłaszczania, dzięki czemu wypełnienie wykroju matrycującego jest znacznie łatwiejsze; przewężanie realizuje się tylko w jednym uderzeniu, w którym materiał dodatkowo ulega poszerzeniu, nieznacznemu przemieszczeniu wzdłuż swojej osi oraz następuje zwiększenie wysokości w niektórych miejscach.



Rys. 7.51. Konstrukcja wykroju przewężającego

Wybór rodzaju wykroju przygotowawczego pierwszej grupy do realizacji procesu kucia ustalany jest na podstawie cech geometrycznych elementarnej przedkuwki idealnej (patrz rys. 7.43). Po wyznaczeniu wskaźników a , b oraz z , które oznaczają odpowiednio smukłość, zgrubienie i zbieżność przedkuwki idealnej, dobiera się wykroje korzystając z wykresu Rebelskiego, który został przedstawiony na rys. 7.52. Wzory do obliczenia charakterystycznych wskaźników umieszczono na wspomnianym wykresie.

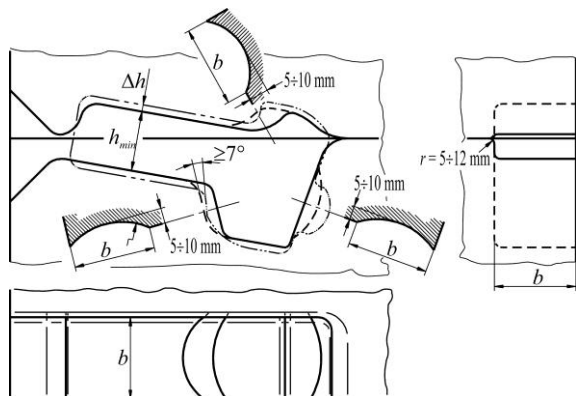


Rys. 7.52. Wykres służący do ustalania wykrojów przygotowawczych z grupy pierwszej [8, 50, 92], gdzie oznaczenia wykrojów: *P* – przewężający, *Ro* – rolujący otwarty, *Rz* – rolujący zamknięty, *W* – wydłużający; pozostałe oznaczenia są zgodne z rys. 7.43

Celem stosowania wykrojów należących do **grupy drugiej** jest nadanie materiałowi kształtu zbliżonego do zarysu odkuwki w płaszczyźnie podziału matrycy. Materiał wyjściowy (lub przedkuwka uzyskana za pomocą wykrojów grupy pierwszej) jest kuty jednym uderzeniem, względnie dwoma, po czym jest przekładany do wykroju matrycującego z jednoczesnym obrotem względem osi o 90° . Do tej grupy wykrojów przygotowawczych zalicza się wykroje:

- ❑ kształtujące (rys. 7.53),

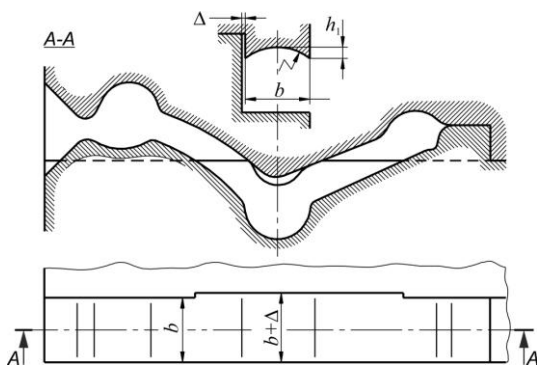
kóre są używane przy kuciu przede wszystkim odkuwek niesymetrycznych lub wielokrotnych; mogą one być również stosowane dla odkuwek symetrycznych; położenie wykroju względem podziału matrycy jest ustalane tak, aby jego obrys był wpisany w obrys podziału odkuwki, przy czym wyso-



Rys. 7.53. Konstrukcja wykroju kształtującego

kość obrysu wykoju w miejscach przewężenia powinna być mniejsza od szerokości odkuwki o wartość $\Delta h = 2 \div 5$ mm;

- ❑ gnące (rys. 7.54), które są odmianą wykrojów kształtujących dla odkuwek o wygiętej osi głównej; wykroje te są stosowane w celu wygięcia przedkuwki odpowiednio do zarysu odkuwki, przy czym gięcie może zachodzić w jednym lub kilku miejscach jednocześnie, ale tylko w jednej płaszczyźnie;



Rys. 7.54. Konstrukcja wykroju gnącego

Wykroje przygotowawcze **trzeciej grupy** mają na celu zmniejszenie wysokości materiału oraz zwiększenie jego przekroju prostopadłego do kierunku uderzenia. Do tej grupy zalicza się wykroje:

- ❑ spłaszczające, które są stosowane przy kuciu odkuwek wydłużonych o osi prostej i niedużym stosunku długości do szerokości odkuwki – tj. o kształcie zbliżonym do prostokąta w płaszczyźnie podziału matrycy; materiał spłaszcza się kilkoma uderzeniami, po czym umieszcza się go w wykroju matrycującym; podczas spłaszczania można jednocześnie odsadzać materiał;
- ❑ spęczające, które stosuje się przy kuciu odkuwek czołowych, o kształcie osiowosymetrycznym i posiadających wysokie piasty lub duże kołnierze.

Wykrój do spęczania (spłaszczania) materiału umieszcza się najczęściej w lewym narożu matrycy, przy czym konstrukcja tego wykroju zależy od występowania lub braku zamkowania matrycy. Najczęściej wykrój ten ma kształt płaszczyzny. Zabieg spęczania (spłaszczania) powoduje również odprysk zgorzeliny od powierzchni materiału wsadowego, a tak uzyskana przedkuwka zapewnia lepsze wypełnienie wykroju matrycującego przez materiał.

Do ostatniej **grupy (czwartej)** wykrojów przygotowawczych zalicza się wykroje:

- ❑ wydłużająco-rolujące,
- ❑ wydłużająco-kształtujące,
- ❑ rolująco-kształtujące.

Są to wykroje złożone, które są stosowane przy wykonywaniu dwóch różnych zabiegów przygotowawczych w jednym wykroju. Decyzję o ich zastosowaniu podczas kucia przedkuwki podejmuje się na podstawie wykresu Rebelskiego (rys. 7. 52).

Zamkovanie matryc

Podczas kucia matrycowego odkuwek o złożonym kształcie powstają dodatkowe siły boczne dążące do wzajemnego przesunięcia matryc, które w efekcie powodują powstanie przesadzenia odkuwki. Nie zawsze udaje się dokonać korzystnego ułożenia odkuwki w matrycy (np. tak jak na rys. 7.24), gdzie powstają zrównoważone powierzchnie oporowe. Dlatego najczęstszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest wykonanie w matrycy specjalnych powierzchni prowadzących (oporowych), które nazywa się zamkami. Zamkovanie matrycy wykonuje się dla wykroju matrycującego wykańczającego w przypadkach, w których występuje:

- ❑ brak możliwości rozplanowania wykrojów matrycy w taki sposób, aby środek matrycy pokrywał się ze środkiem wykroju matrycującego;
- ❑ trudność zupełnego uniknięcia oddziaływania sił bocznych przy kuciu;
- ❑ nadmierne zużycie i mała sztywność konstrukcji maszyny kuźniczej;
- ❑ trudność stwierdzenia wielkości przesadzenia odkuwki ze względu na jej kształt (np. odkuwki typu stożkowych kół zębatych).

Na kolejnym rys. 7.55 pokazano typowe konstrukcje zamkovania matryc, gdzie wyróżnia się następujące typy zamków:

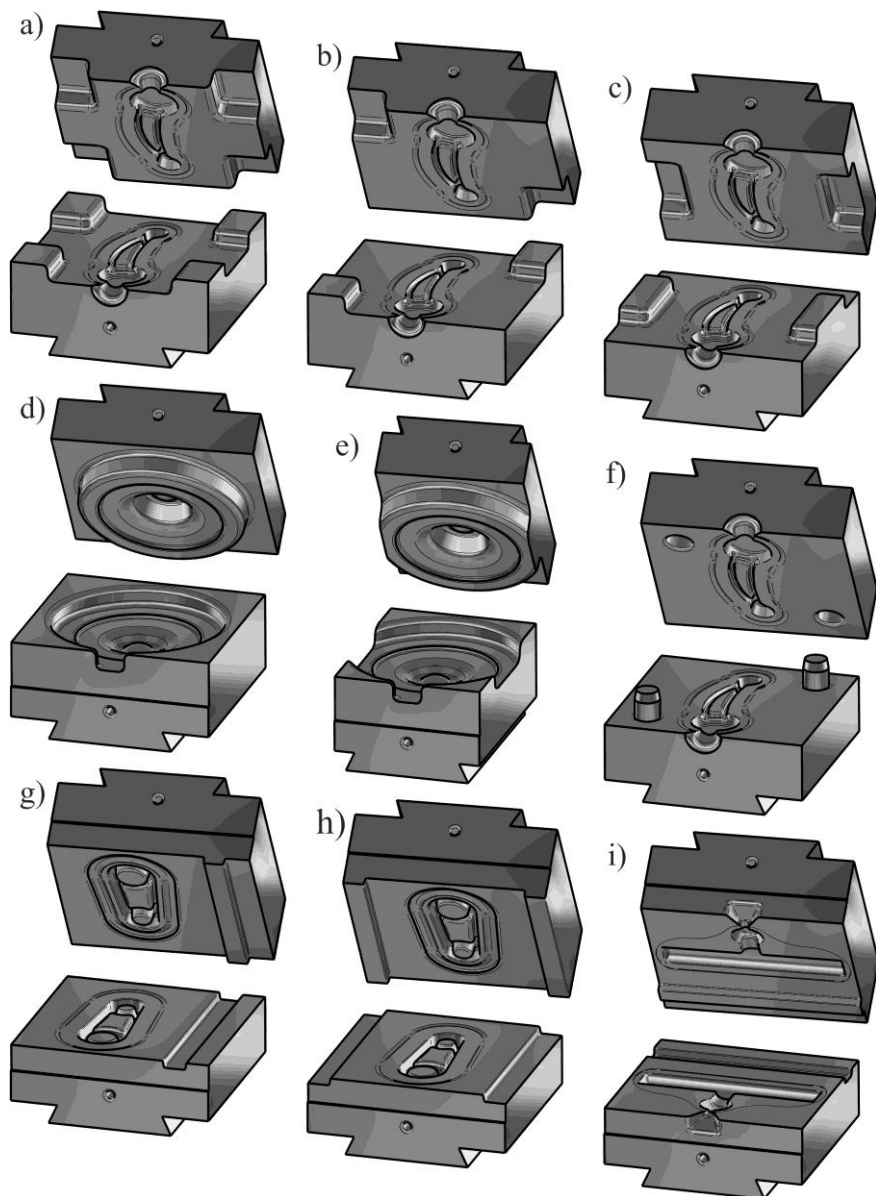
- ❑ krzyżowe, narożne i boczne – odpowiednio rys. 7.55a, b oraz c;
- ❑ okrągłe całkowite i niecałkowite (rysunek d oraz e);
- ❑ z wypustką wzdłużną, wydłużoną i poprzeczną (odpowiednio rysunek g, h oraz i);
- ❑ oraz prowadzenie kołkowe (rys. 7.55f), które jest stosowane najczęściej przy kuciu odkuwek w wysokich matrycach.

Zaleca się, aby występy oporowe zamkovania były wykonywane w dolnej matrycy – w celu uniknięcia ewentualnego zakleszczenia narzędzia spowodowanego nierównomiernym nagrzanieniem się jego połówek. Dolna matryca zawsze nagrzewa się w większym stopniu, z uwagi na dłuższy kontakt z materiałem. Zatem niedopuszczalne jest obniżanie jej pojemności cieplnej poprzez wykonanie wgłębień oporowych. Z drugiej strony takie rozwiązanie utrudnia usuwanie zgorzeliny z wykroju – dlatego, w przypadku zamków okrągłych całkowitych należy koniecznie wykonać dodatkowe wybranie. Szczegółowe wytyczne dotyczące projektowania zamkovania matrycy znajdują się np. w literaturze [8, 92].

Wkładki matrycowe

Narzędzia kuźnicze przy kuciu matrycowym na młotach mogą być wykonane jako matryce:

- ❑ jednolite – są najczęściej stosowane; przykładem jest matryca pokazana na rys. 7.46 oraz na rys. 7.55,



Rys. 7.55. Przykłady zamków wykonywanych w matrycach – opis w tekście

- składane (z wkładkami wymiennymi) – są stosowane tylko w uzasadnionych przypadkach, gdzie podstawowym powodem wykonania wkładek matrycowych jest nierównomierne zużycie poszczególnych wykrojów roboczych (szczególnie matrycującego).

Wkładki matrycowe są najczęściej stosowane dla:

- najbardziej zużywających się fragmentów wykroju wykańczającego;

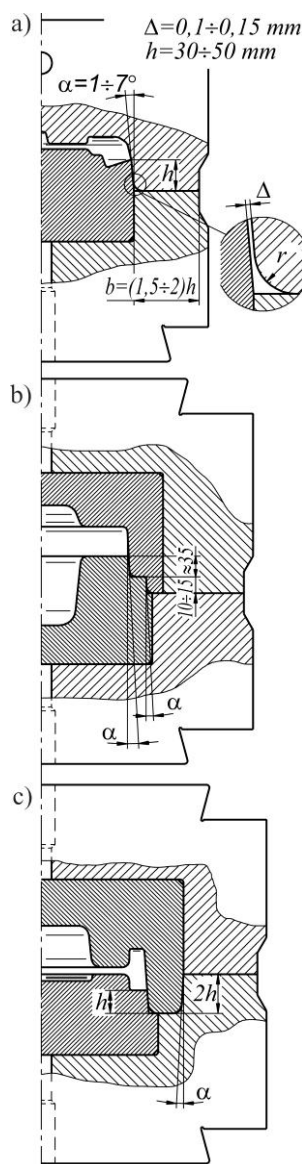
- ❑ wykroju matrycującego lub gnącego, gdy występują wysokie występy ponad powierzchnię podziału matrycy;
- ❑ wykrojów, które bardziej opłaca się wykonać jako wkładki frezowane (lub toczone), ewentualnie za pomocą technologii prasowania i spiekania proszków.

Stosowanie wkładek matrycowych umożliwia wykonanie opraw z materiału znacznie tańszego (np. stali narzędziowej węglowej lub staliwa), gdy tymczasem wkładki wykonuje się z lepszych materiałów i ulepsza się je do wyższych twardości. Takie rozwiązanie technologiczne jest również korzystne ze względu na łatwość i względnie niskie koszty regeneracji lub naprawy matrycy. Kształt i wymiary wkładek dobiera się odpowiednio do kształtu i wymiarów odkuwek. Przeważnie stosuje się wkładki okrągłe, prostokątne lub kwadratowe. Przykład wykonania wkładek matrycowych przedstawiono na rys. 7.56.

Matryce zamknięte

Matryce zamknięte, stosowane przy kuciu bez-wyplywkowym na młotach, mogą być wykonywane jako jednolite lub (częściej) składane, posiadają zamki. W zależności od konstrukcji zamkowania wyróżnia się trzy typy matryc zamkniętych:

- ❑ z pojedynczym zamkiem (rys. 7.56a), które są używane przy kuciu na młotach o bardzo dokładnym prowadzeniu; matryce o takiej konstrukcji są stosowane do wykonywania odkuwek typu kół zębatach, pierścieni i sworzni z kołnierzem;
- ❑ z podwójnym zamkiem (rys. 7.56b), gdzie górny zamek wstrzymuje wypływ metalu na zewnątrz wykroju, natomiast dolny – zabezpiecza matryce przed wzajemnym przesunięciem; konstrukcja zamkowania pozwala zmniejszyć wysokość górnego zamka, przez co uzyskuje się zwiększenie jego wytrzymałości i trwałości; matryce z podwójnym zamkiem są stosowane do kucia odkuwek typu sworzni z kołnierzem o znacznej długości trzona;



Rys. 7.56. Budowa matryc zamkniętych o konstrukcji składanej; opis w tekście

- ❑ z zamkiem i kontrzamkiem (rys. 7.56c) – zamek wewnętrzny ma normalne położenie i odpowiada za wstrzymanie wypływu metalu poza wykroj matrycujący, natomiast zamek zewnętrzny ma położenie odwrócone oraz zapewnia właściwe prowadzenie matrycy i chroni zamek wewnętrzny.

Wykroj wykańczający w matrycy zamkniętej wykonuje się najczęściej ze specjalnym kompensatorem, który służy do pomieszczenia niewielkiego nadmiaru materiału wsadowego. Wahania objętości materiału wynikają głównie z dokładności cięcia wsadu. W praktyce stosuje się dwa typy kompensatorów:

- ❑ zewnętrzny o kształcie cylindrycznym, pierścieniowym lub stożkowym, który jest wykonywany na powierzchni czołowej odkuwki – np. na przedłużeniu trzona (czopa) lub innej części wystającej;
- ❑ wewnętrzny, który jest umieszczany w denku odkuwki – np. jako dodatkowa komora (rys. 7.56a) lub jako „samoistnie powstająca jama”, tak jak to pokazano w podrozdziale 7.5.2 na przykładzie kucia wypływkowego na prasie korbowej (rys. 7.57b oraz rys. 7.58).

7.5.2. Matryce dla kucia na prasach korbowych

Przy kuciu matrycowym na prasach korbowych wykonuje się tylko te zabiegi, które są możliwe do zrealizowania za pomocą jednego nacisku suwaka. Oprócz podstawowych zabiegów – tj. matrycowania wykańczającego oraz wstępnego, stosuje się zabiegi pomocnicze, takie jak:

- ❑ spęczanie lub spłaszczanie – za pomocą wykroju lub płaszczyzny do spęczania (spłaszczania);
- ❑ przewężanie przedkuwek o osi wydłużonej – za pomocą wykroju przewężającego, najczęściej zamkniętego;
- ❑ gięcie lub kształtowanie – przy użyciu wykroju gnącego lub kształtującego.

Poszczególne wykroje wykonuje się w osobnych wkładkach matrycowych, które są mocowane w specjalnych oprawkach. Dla ułatwienia wyjęcia odkuwki z wykroju stosuje się dodatkowo wyrzutnik, który jest napędzany przez odpowiedni mechanizm, sprzężony z wypychaczem prasy. Cały zespół składający się z wymienionych części nazywany jest matrycą do kucia na prasie korbowej.

Konstrukcja wykrojów

Wykroj matrycujący wykańczający projektuje się w oparciu o podobne zasady jak w przypadku kucia na młotach. Jednak pomiędzy tymi technologiami kucia matrycowego wyróżnia się dwie podstawowe różnice, mianowicie:

- ❑ pomiędzy wkładkami matrycowymi (w płaszczyźnie podziału matrycy) stosuje się luz oraz dla wykroju wykańczającego wykonuje się otwarte (lub półotwarte) rowki na wypływkę, gdyż niedopuszczalne jest kucie na prasach

korbowych aż do zetknięcia się połówek matrycy – grozi to przeciążeniem maszyny lub zakleszczeniem narzędzi;

- ❑ na dnie głębokich miejsc wykroju wykonuje się małe otwory (przelotowe lub nieprzelotowe) w celu odprowadzenia gazów powstających podczas kucia na gorąco.

Celem stosowania wykroju matrycującego wstępnego jest:

- ❑ nadanie przedkuwce kształtu zbliżonego do kształtu odkuwki,
- ❑ zwiększenie trwałości wykroju wykańczającego.

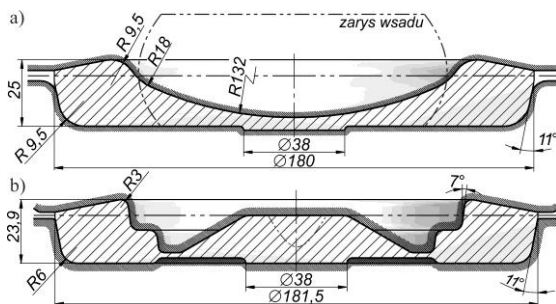
Kształt i wymiary wykroju matrycującego wstępnego dobiera się tak, aby dominującym schematem odkształcenia materiału było spęczanie. Konstruowanie tego wykroju przebiega w następujący sposób:

- ❑ dobiera się kształt wykroju zbliżony do kształtu odkuwki;
- ❑ szerokość wykroju zmniejsza się o 1÷2 mm, a jego wysokość powiększa się o 4÷5% w stosunku do wykroju wykańczającego;
- ❑ przekroje poprzeczne przyjmuje się większe od odpowiednich przekrojów wykroju wykańczającego;
- ❑ promienie zaokrągleń, pochylenia ścianek oraz kształt i wymiary denek przyjmuje się jak w wykroju matrycującym wstępnym przeznaczonym do kucia na młotach.

Na rys. 7.57 przedstawiono schematycznie zarys odkuwki (typu tarcza zębatego koła stożkowego) kutej w wykroju matrycującym wstępnym oraz wykańczającym. Na rysunku tym podano również ważniejsze wymiary dla porównania różnic występujących pomiędzy wykrojami.

Zabieg wstępnego matrycowania (wykroj wstępny) można pominąć, ale tylko w przypadku, gdy:

- ❑ kształt odkuwki jest dostatecznie prosty, pozbawiony wysokich występów, głębokich wgłębień lub znacznych różnic poszczególnych przekrojów;
- ❑ jest do wykonania mała seria odkuwek;
- ❑ materiał wsadowy jest nagrany do właściwej temperatury kucia, a temperatura ta jest zachowana przy kuciu w wykroju wykańczającym;
- ❑ mała przestrzeń robocza prasy nie pozwala na wykonanie wszystkich potrzebnych wykrojów w matrycy.

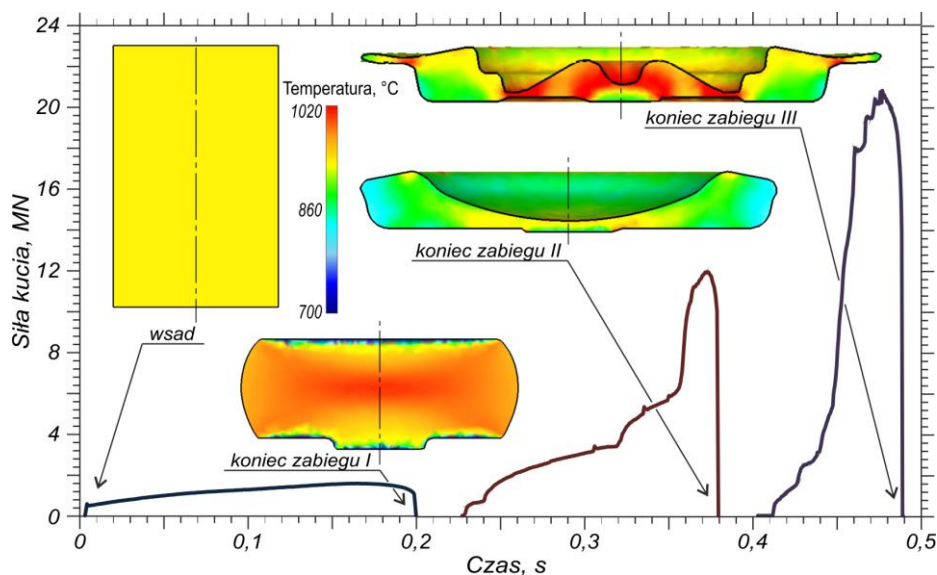


Rys. 7.57. Zarys przykładowej odkuwki oraz zarys powierzchni wykroju matrycującego, gdzie: a) wykroj wstępny, b) wykroj wykańczający

Proces kucia matrycowego na prasach korbowych jest zazwyczaj wykonywany maksymalnie w trzech zabiegach. Z reguły stosuje się tylko jeden wykroj pomocniczy oraz jeden lub dwa wykroje matrycujące. Odkuwki czołowe są wykonywane w:

- ❑ jednym zabiegu (wykroj matrycujący wykańczający), gdy nie mają żadnych występow oraz dużych wgłębień, a ich masa jest skupiona;
- ❑ dwóch zabiegach (wykroj pomocniczy, wykroj wykańczający), kiedy mają występy i wgłębienia, ale różnice ich wysokości są niewielkie, a promienie zaokrąglenia są dostatecznie duże;
- ❑ trzech zabiegach (wykroj pomocniczy, wykroj matrycujący wstępny i wykańczający), gdy posiadają występy i wgłębienia o dużych różnicach wysokości, a promienie zaokrąglenia są małe.

Przykładem procesu trójzabiegowego jest kucie odkuwki z rys. 7.57. Wyniki w postaci rozkładu temperatury w materiale oraz przebiegi siły kształtowania pokazano na kolejnym rys. 7.58. W miejscach styku materiału z powierzchnią wykroju obserwuje się spadek temperatury w wyniku odprowadzania ciepła. Ale już w strefach intensywnego odkształcenia – tj. podczas formowania wypływk i denka, w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło następuje wyraźny, miejscowy wzrost temperatury. Zastosowanie wykroju pomocniczego i matrycującego wstępnego powoduje m.in. skrócenie czasu kontaktu materiału z powierzchnią wykroju wykańczającego oraz obniżenie siły kucia, która i tak jest relatywnie największa ze wszystkich zabiegów.



Rys. 7.58. Wyniki symulacji MES kucia odkuwki (z rys. 7.53) w trzech zabiegach (spęczanie, matrycowanie wstępne i wykańczające) w postaci siły kucia oraz temperatury materiału ($T_0 = 950^\circ\text{C}$, stal węglowa, smarowanie)

Dla odkuwek wydłużonych projektuje się przedkawkę w sposób opisany w rozdziale 7.4.1. Przedkawka jest wykonywana podczas kucia na prasie tylko w sytuacji, kiedy jej kształt można uzyskać stosując jeden wykroj pomocniczy (przewężający, kształtujący lub gnący). We wszystkich pozostałych przypadkach przedkawkę wykonuje się na innych maszynach kuźniczych.

Wkładki matrycowe

Wkładki matrycowe wykonuje się jako okrągłe (rys. 7.59) lub prostokątne (rys. 7.60). Pomiędzy wkładkami danej pary wykonuje się szczelinę s , natomiast w dolnej części wkładka posiada kształt dostosowany do jej zamocowania w oprawce matrycy. Zewnętrzne wymiary wkładek określa się na podstawie wymiarów wykroju roboczego. Szerokość B wkładki prostokątnej lub średnicę D wkładki okrągłej wyznacza się ze wzorów:

$$\begin{aligned} B &= b_{\max} + 2g_b \text{ lub} \\ D &= d_{\max} + 2g_d, \end{aligned} \quad (7.19)$$

długość L wkładki przyjmuje się:

$$L = l_{\max} + 2g_l, \quad (7.20)$$

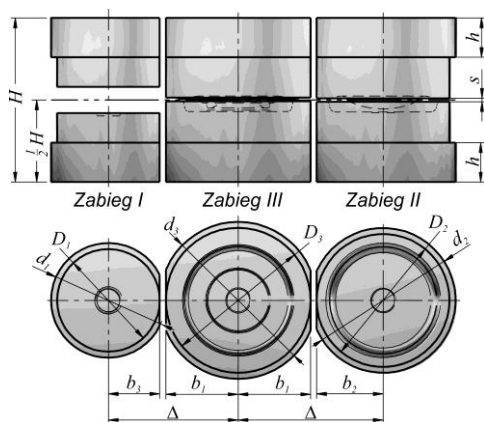
natomiast wysokość H wkładki wynosi:

$$H = (1,6 \div 1,65) h_{\max} \geq 25 \text{ mm}, \quad (7.21)$$

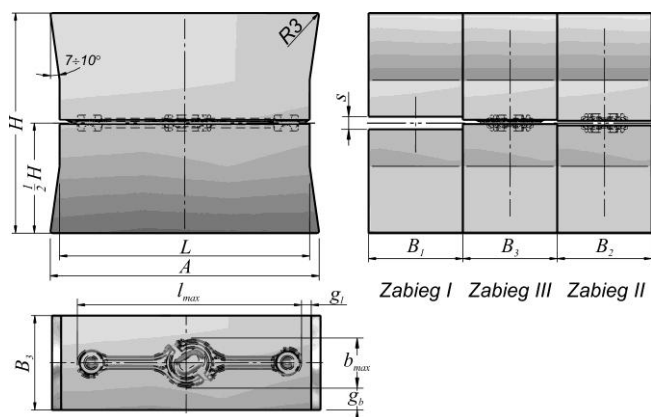
gdzie: $b_{\max}$, $d_{\max}$, $l_{\max}$, $h_{\max}$ – największa szerokość, średnica, długość lub wysokość wykroju; g – grubość ścianki pomiędzy wykrojem a krawędzią wkładki, która naj-

częściej jest równa największej głębokości $h_{\max}$ wykroju. Wszystkie oznaczenia są zgodne z rys. 7.59 i rys. 7.60.

Typowe wymiary wkładek są podane w literaturze, np. [92, 95]. Ich wartość uzależnia się od nacisku nominalnego prasy kuźniczej. Przykładowo, średnica kołnierza mocującego d zazwyczaj



Rys. 7.59. Kształt i rozmieszczenie w matrycy wkładek okrągłych



Rys. 7.60. Kształt i rozmieszczenie w matrycy wkładek prostokątnych

stanowi $(1,06 \div 1,08)$ średnicy D wkładki, natomiast jego wysokość h wynosi $(0,18 \div 0,25) H$. Długość A podstawy wkładki prostokątnej równa jest $(1,06 \div 1,16)$ długości L oraz jest dodatkowo wykonywana z pochyleniem $7 \div 10^\circ$.

Mechanizmy wypychania

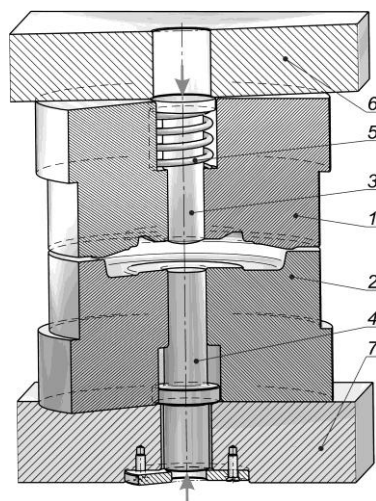
Typowy mechanizm wypychania odkuwki z wykroju składa się dwóch podstawowych części:

- wypychacza, który jest częścią wykroju i styka się bezpośrednio z materiałem;
- drążka pośredniego, który znajduje się poza matrycą (wkładką matrycową) i służy do przekazywania siły wypychania z wyrzutnika prasy na wypychacz.

Wypychacz umieszcza się w matrycy w taki sposób, aby nie powodował zniszczenia powierzchni odkuwki. Wyróżnia się trzy typy wyrzutnika:

- typ I, gdzie nacisk jest przekazywany bezpośrednio na odkuwkę, a robocza powierzchnia wypychacza jest częścią powierzchni wykroju;
- typ II – nacisk jest wywierany na denko;
- typ III – nacisk jest przekazywany na wypływkę, na odcinku mostka, przy czym z uwagi na niebezpieczeństwo przecięcia wypływki stosuje się kilka wypychaczy o odpowiednio dużej średnicy.

Przykład mechanizmu wypychania dla odkuwki czołowej pokazano na rys. 7.61. Zastosowano w nim dwa wypychacze typu pierwszego, o kształcie sworznia – górny 3 oraz dolny 4, które są umieszczone centralnie we wkładkach matrycujących 1 i 2. Na obwodzie wypychaczy są wykonane kołnierze, które opierają się na oprawce matrycy – górnej 6 i dolnej 7. Drążki pośrednie przedstawiono schematycznie za pomocą strzałek. Wypychacz górny posiada sprężynę 5 powodującą automatyczny jego powrót do pozycji wyjściowej. Konstrukcja pokazanego mechanizmu charakteryzuje się budową zwartą, nie ma wpływu na dokładność wykonania odkuwki oraz nie naraża wypychaczy na przeciążenie.



Rys. 7.61. Mechanizm wypychający stosowany dla odkuwek czołowych

Na kolejnym rys. 7.62 pokazano mechanizm wypychania dla odkuwki wydłużonej. Wyrzutnik prasy za pomocą drążka pośredniego 1 wywiera nacisk na dwie dźwignie 2, obracające się na sworzniu 5 i naciskające na płytę 3. Na płycie tej opierają się dwa wypychacze 4 (typ II), które poruszają się we wkładce

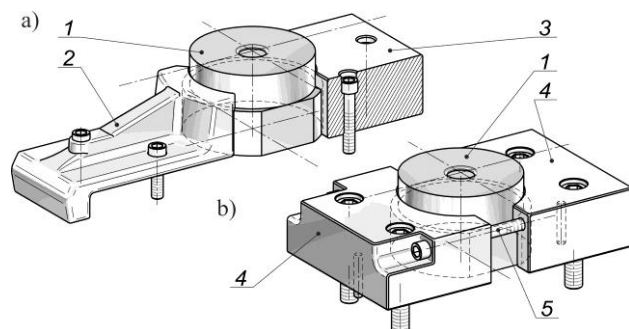
matrycowej 7. Zasadnicze części tego mechanizmu umieszczone są wewnątrz oprawki matrycy 6. Mechanizm o takiej konstrukcji jest również stosowany przy kuciu wielowykrojowym, gdzie dla każdej wkładki matrycowej przewiduje się oddzielny wypychacz.

Oprawki matrycy

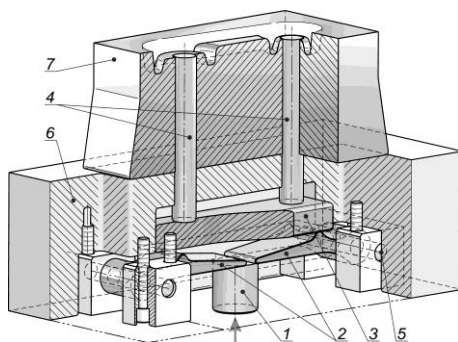
Oprawki służą do zamocowania wkładek matrycowych. Ze względu na ich kształt oraz sposób mocowania i położenie wybrania na wkładki, wyróżnia się cztery podstawowe typy oprawek:

- ❑ typ I – oprawki do mocowania wkładek okrągłych (lub prostokątnych) za pomocą przycisków i listwy oporowej (rys. 7.63a);
- ❑ typ II – oprawki do mocowania wkładek okrągłych za pomocą płyt (rys. 7.63b);
- ❑ typ III – oprawki do mocowania wkładek prostokątnych za pomocą klinów;
- ❑ typ IV – oprawki do mocowania wkładek prostokątnych za pomocą listew, wykonanych w kształcie klina; wkładkę matrycującą umieszcza się w specjalnie wykonanym gnieździe, co powoduje brak możliwości regulowania jej położenia. Jedną wkładkę mocuje się czterema listwami.

Typową konstrukcję matrycy stosowaną przy kuciu na prasach korbowych odkuwek czołowych pokazano na rys. 7.64. Wkładki matrycowe 5 i 6 są zamocowane za pomocą przycisków 7 oraz listew oporowych 8 do płyt oporowych, odpowiednio – dolnej 1 i górnej 2. Płyty oporowe 1 i 2 wykonuje się jako odlewy staliwne, dlatego pomiędzy nimi a wkładkami matrycującymi

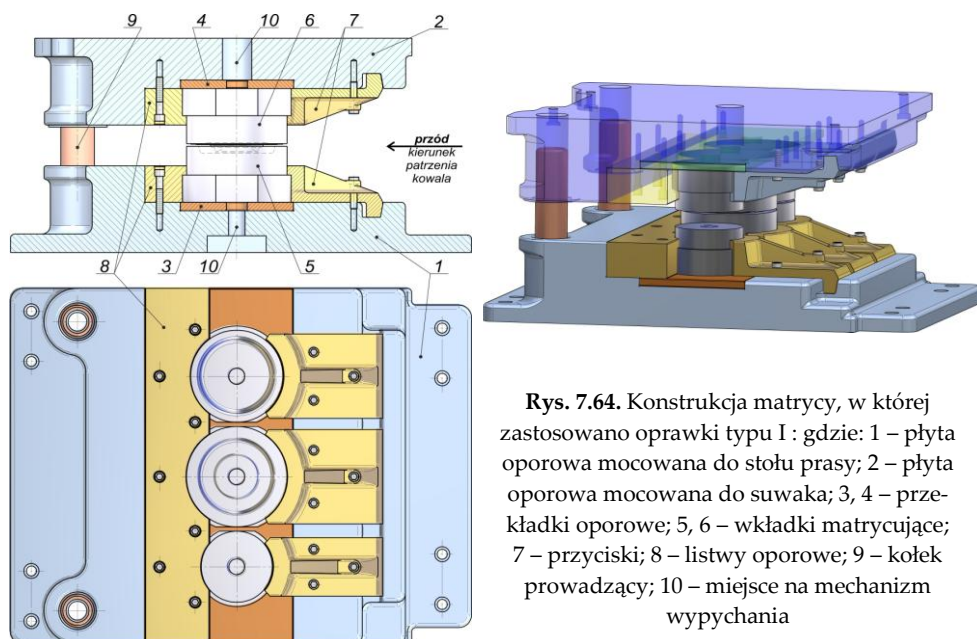


Rys. 7.63. Oprawki do mocowania wkładki okrągłej typu I (a) oraz typu II (b), gdzie: 1 – wkładka matrycowa; 2 – przycisk, 3 – listwa oporowa, 4 – płyta mocująca, 5 – śruba spinająca



Rys. 7.62. Mechanizm wypychający stosowany dla odkuwek wydłużonych oraz matryc wielowykrojowych (opis w tekście)

zalecane jest stosowanie przekładek oporowych 3 i 4, które mają za zadanie przenoszenie nacisków wywieranych przez wkładki podczas kucia. W przedniej części płyt oporowych (od strony kowala) wykonuje się specjalne rowki oporowe, które stanowią bazę do ustalenia pozycji przycisków. Natomiast w tylnej



Rys. 7.64. Konstrukcja matrycy, w której zastosowano oprawki typu I : gdzie: 1 – płyta oporowa mocowana do stołu prasy; 2 – płyta oporowa mocowana do suwaka; 3, 4 – przekładki oporowe; 5, 6 – wkładki matrycujące; 7 – przyciski; 8 – listwy oporowe; 9 – kołek prowadzący; 10 – miejsce na mechanizm wypychania

części płyt oporowych wykonuje się gniazda na kołki 9 (słupy, tuleje) prowadzące. Należy zaznaczyć, że w porównaniu z konstrukcją młotów matrycowych, prowadzenie suwaka prasy jest znacznie dokładniejsze i nie wymusza wykonania bardziej dokładnego zamkowania matryc. W przypadku zastosowania prostokątnych wkładek matrycujących stosuje się dodatkowo elementy zabezpieczające wkładki przed przesunięciem poprzecznym, w płytach oporowych wykonuje się prostokątne wybranie dla wkładek, a listwa oporowa ma kształt klina.

7.5.3. Matryce dla kucia na prasach śrubowych

Narzędzia dla kucia matrycowego odkuwek na prasach śrubowych są projektowane na podobnych zasadach jak dla innych maszyn kuźniczych (tj. młotów, pras korbowych lub kuźniarek). W związku z tym, stosuje się te same normy i zalecenia projektowe. Różnice dotyczą jedynie:

- ❑ sposobu mocowania matryc do stołu i suwaka prasy;
- ❑ zastosowania wyrzutnika – jest on używany tylko dla wykroju w dolnej matrycy;
- ❑ wzajemnego ustawienia matryc – podczas projektowania matryc nie uwzględnienia się szczeliny pomiędzy nimi w płaszczyźnie podziału, ponieważ na prasach śrubowych jest dopuszczalne ich zetknięcie, gdyż zastosowany w prasie mechanizm śrubowy eliminuje niebezpieczeństwo zakleszczenia narzędzi lub przeciążenia maszyny.

W praktyce przemysłowej procesy kucia na prasach śrubowych są realizowane według metody kucia w matrycach:

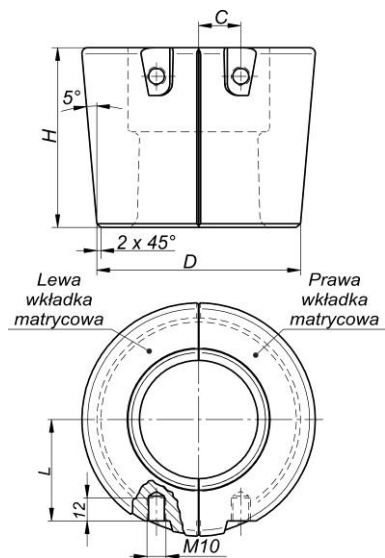
- ❑ otwartych, które posiadają rowek na wypływkę z magazynkiem zamkniętym;
- ❑ zamkniętych, tzw. niedzielonych (zgodnie z technologią stosowaną przy kuciu na młotach – patrz podrozdział 7.5.1);
- ❑ zamkniętych dzielonych, gdzie dolną matrycę wykonuje się z dwóch wkładek (np. rys. 7.65) złożonych w trakcie kucia, a rozkładanych w momencie usuwania odkuwki z matrycy; taką technologię stosuje się do wykonywania odkuwek o złożonym kształcie, np. typu zaworów, sworzni lub wielostopniowych wałków uzębionych.

Z uwagi na niedokładne prowadzenie suwaka prasy śrubowej zaleca się wykonywanie zamkowania. W przypadku kucia odkuwek wydłużonych stosuje się zamki krzyżowe (wg rozwiązania pokazanego na rys. 7.55a) lub kołki (słupy) prowadzące – rys. 7.55f. Przy wykonywaniu odkuwek czołowych osiowosymetrycznych prowadzenie matrycy górnej (stempla) wykonuje się w matrycy dolnej, według schematu pokazanego na rys. 7.55d. Przy czym ze względów konstrukcyjnych częściej spotyka się rozwiązanie, gdzie wybranie wykonuje się w matrycy górnej, nazywanej również stemplem.

Matryce mocowane na prasach śrubowych wykonuje się najczęściej jako zespół (przrząd) składający się z wkładek matrycujących oraz opravek. Górną matrycę ustala się w suwaku prasy za pomocą:

- ❑ czopa mocującego (o odpowiednim, znormalizowanym kształcie) umieszczonego w specjalnym gnieździe – takie rozwiązanie jest wykorzystywane tylko dla narzędzia o małej masie (przy kuciu odkuwek czołowych osiowosymetrycznych) lub w przypadku zastosowania prowadzenia słupowego;
- ❑ śrub mocujących, które umieszcza się bezpośrednio w rowkach teowych suwaka prasy, przy czym w matrycy wykonuje się walcowy czop ustalający (zamiast czopa mocującego) oraz wybrania na śruby mocujące;
- ❑ za pomocą śrub i uchwytów hakowych.

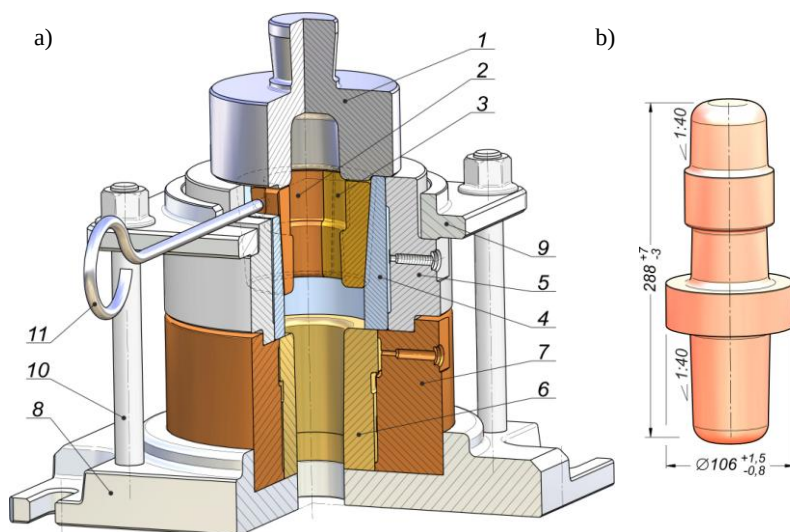
Natomiast matryca dolna jest ustalana na stole prasy, wykorzystując rowki teowe, za pomocą:



Rys. 7.65. Konstrukcja matrycy dzielonej, gdzie zalecane wartości wymiarów: $D = 80 \div 140$ mm, $H = 115 \div 215$ mm, $L = 35 \div 65$ mm, $C = 22 \div 40$ mm

- ❑ śrub mocujących,
- ❑ śrub i uchwytów hakowych lub łap dociskowych,
- ❑ płyty zaciskowej, która jest przykręcona do podłoża za pomocą śrub mocujących, natomiast pomiędzy płytą zaciskową a matrycą znajduje się dzielona tuleja.

Przykład matrycy do kucia odkuwki typu wielostopniowych wałków (np. uźębionych) na prasie śrubowej ciernej pokazano na rys. 7.66. Matryca górna 1 (nazywana stemplem) posiada czop mocujący oraz zamek okrągły, zgodny ze schematem z rys. 7.55d. Pomiedzy stemplem a dzielonymi wkładkami matrycowymi 2 i 3 (które pokazano również na poprzednim rys. 7.65) zastosowano przestrzeń na wypływkę promieniową, przy czym pomiędzy stemplem a tuleją 4 oraz oprawą 5 nie przewiduje się żadnej szczeliny. Tuleje 4 i 6 są umieszczone w oprawkach 5 i 7, w których wykonano specjalne kanały na płyn chłodzący narzędzia będące w kontakcie z kształtowanym materiałem. Matryca dolna, jako zespół składający się z wkładek, tulei i oprawek, jest spięta z podstawą oporową 8 za pomocą płyty zaciskowej 9 oraz czterech śrub 10. Natomiast podstawa jest ustalona na stole prasy za pomocą śrub mocujących (niepokazanych na rysunku). W podstawie dodatkowo wykonano otwór centralny na wyrzutnik. W celu ułatwienia składania i wyjmowania wkładek dzielonych 2 i 3 z tulei 4 stosuje się uchwyty 11. Uchwyty te wykonuje się zazwyczaj z drutu o średnicy $\varnothing 12$ mm, a ich długość jest w przedziale 350÷450 mm.



Rys. 7.66. Przykład matrycy (a) do kucia odkuwki (b) typu wielostopniowych wałków; opis w tekście

8. Operacje zamykające procesy kucia

8.1. Prostowanie odkuwek

Operację prostowania wykonuje się w celu usunięcia wykrzywienia lub zwichrowania odkuwki matrycowej, które przekraczają dopuszczalne wartości określone w normach. Wady kształtu odkuwki powstają w trakcie:

- ❑ kucia w wykroju matrycującym wykańczającym o wadliwym kształcie, gdzie najczęściej położenie osi wykroju nie odpowiada osi głównej na rysunku odkuwki;
- ❑ matrycowania odkuwki wydłużonej o znacznej długości, która w trakcie kucia wymaga zmiany położenia w wykroju matrycującym – jest to tzw. czynnik ludzki, związany z niedokładnym ułożeniem częściowo ukształtowanej odkuwki w wykroju przez kowala;
- ❑ niewłaściwego usuwania odkuwki, która zakleszczyła się w wykroju matrycującym;
- ❑ przenoszenia odkuwki z jednego stanowiska do drugiego (np. na prasę do okrawania), gdzie odkuwki długie i cienkie ulegają zniekształceniu pod wpływem własnego ciężaru;
- ❑ okrawania wypływu lub wycinania denka – powodem najczęściej jest niedokładne wykonanie przyrzędu (narzędzi) do realizacji wspomnianych operacji;
- ❑ obróbki cieplnej.

Czasami wykrzywienie odkuwek wydłużonych może nastąpić w zdarzeniu losowym. Przykładem może być upadek odkuwki po jej odcięciu za pomocą nożna odcinającego podczas kucia matrycowego na młotach lub przy niezachowaniu ostrożności w trakcie transportu lub składowania odkuwek do koszy pakietowych.

Wyróżnia się następujące rodzaje zniekształceń odkuwek:

- ❑ wykrzywienie odkuwki wydłużonej lub czołowej, najczęściej w płaszczyźnie podziałowej matryc (rys. 8.1a) lub w płaszczyznach do niej prostopadłych (rys. 8.1b);
- ❑ skrećenie (wichrowatość) odkuwki wydłużonej (rys. 8.1c);

- skrócenie z jednoczesnym wykrzywieniem w jednej lub dwóch płaszczyznach.

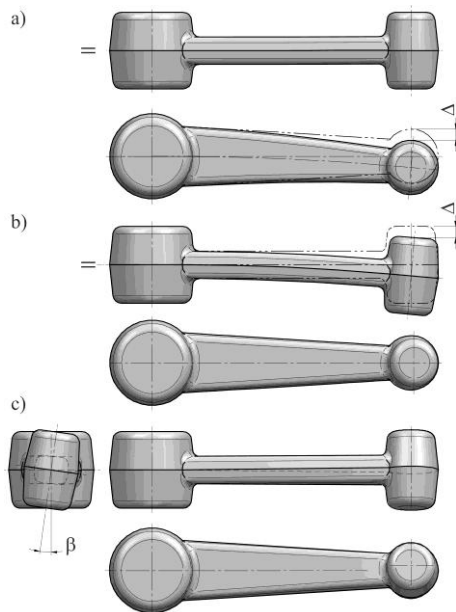
8.1.1. Metody prostowania

Prostowanie odkuwek wykonuje się na:

- gorąco, przy tym samym nagraniu metalu – najczęściej tę metodę stosuje się w przypadku, gdy największe wykrzywienia powstają bezpośrednio podczas kucia w wykroju matrycującym wykańczającym;
- zimno, gdy niedopuszczalne wykrzywienie odkuwki powstaje podczas operacji okrawania wypłytki i wycinania denek oraz w trakcie obróbki cieplnej; prostowanie na zimno jest bardziej wydajne i dogodne w porównaniu z prostowaniem na gorąco; prostowanie tą metodą jest operacją ostatnią, a odkuwka musi być w stanie normalizowanym lub wyżarzonym (dla uniknięcia pęknięć); podstawowym ograniczeniem prostowania na zimno jest mały stopień odkształcenia materiału;
- gorąco i zimno, tj. dwukrotne prostowanie odkuwki, która doznaje niedopuszczalnych wykrzywień zarówno podczas kucia jak i w trakcie późniejszych operacji zamykających proces technologiczny (okrawania, wycinania lub obróbki cieplnej).

Operację prostowania wykonuje się przy użyciu:

- tych samych maszyn kuźniczych i narzędzi, które są wykorzystywane do kucia (młoty matrycowe) lub okrawania wypłytki (prasy); prostowanie wykonuje się na gorąco w wykroju matrycującym wykańczającym lub na tłoczniku dwuzabiegowym, zamocowanym na prasie do okrawania; wadą prostowania w wykroju matrycującym jest obniżenie wydajności procesu kucia oraz zmniejszenie trwałości narzędzi;
- osobnych maszyn kuźniczych – tj. młotów spadowych, pras hydraulicznych lub pras śrubowych ciernych; prostowanie na gorąco lub zimno wykonuje

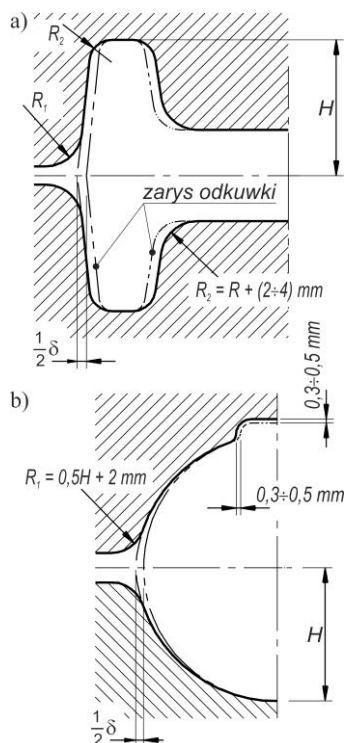


Rys. 8.1. Rodzaje wykrzywień (a, b) oraz skrócenie (c) odkuwek wraz z parametrami pomiarowymi: Δ – wykrzywienie [mm], β – kąt skręcenia

się w specjalnych matrycach przy wytwarzaniu odkuwek o znacznej masie oraz przy produkcji masowej odkuwek średnich o złożonym kształcie.

8.1.2. Konstrukcja narzędzi do prostowania

Do prostowania odkuwek wykrzywionych lub skrzywionych stosuje się narzędzia wykonane jako regulowane podkładki płaskie (uniwersalne rozwiązanie dla odkuwek dużych; prostowanie wykonuje się poprzez wielokrotny nacisk na odkuwkę obracaną przez kowala) lub wykroje otwarte (dla odkuwek średnich, w produkcji masowej – rys. 8.2; prostowanie odbywa się przy jednym nacisku).



Rys. 8.2. Przekroje wykroju do prostowania odkuwek, gdzie:
 H – głębokość wykroju, R – promień zaokrąglenia krawędzi odkuwki,
 δ – dodatnia odchyłka wymiarowa na szerokości [8, 92, 95]

Wykroje w matrycach do prostowania są projektowane na podstawie rysunku odkuwki zimnej lub gorącej. Wykroje te mają łagodne przejścia, a ich wymiary spełniają warunki:

- głębokość wykroju H jest wykonana według nominalnego wymiaru odkuwki;
- szerokość wykroju jest powiększona o wartość szczeliny δ równej dodatniej odchyłce wymiarowej;
- promienie zaokrąglenia krawędzi wykroju R_2 są powiększone o $2 \div 4 \text{ mm}$ w stosunku do odpowiednich promieni odkuwki;
- krawędzie wykroju w płaszczyźnie podziału są zaokrąglone promieniem R_1 , o wartości nieznacznie większej od połowy głębokości tego wykroju;
- wybrania na występy powinny być powiększone o $0,3 \div 0,5 \text{ mm}$ (rys. 8.2b), a w przypadku odkuwek symetrycznych występy te należy wykonać zarówno w matrycy górnej, jak i dolnej.

8.2. Dogniatanie odkuwek

Dogniatanie (kalibrowanie, dotłaczanie) odkuwek ma na celu uzyskanie dużej dokładności wymiarowej oraz jakości ich powierzchni, aby dodatkowa

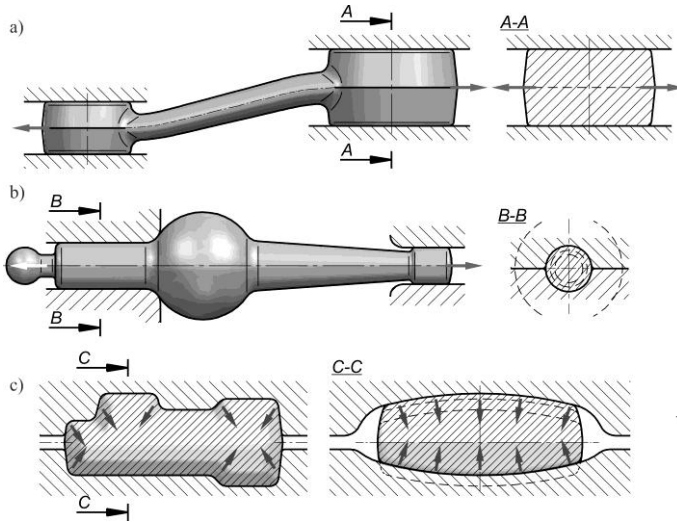
obróbka mechaniczna była zbędna. Przy dogniataniu zwiększa się dokładność przed wszystkim wymiarów wysokościowych, a w miarę potrzeby również innych wymiarów. Uzyskuje się tolerancję wymiarową w zakresie $\pm 0,1 \div 0,3$ mm (dokładność zwykła) lub $\pm 0,04 \div 0,18$ mm (dokładność podwyższona), przy czym zależy ona od wielkości powierzchni dotłaczanej. Ograniczenie lub prawie całkowite wyeliminowanie mechanicznej obróbki wykańczającej nie tylko ma wymierne korzyści ekonomiczne (koszty, czasochłonność procesu produkcyjnego), ale również pozwala zachować własności konstytutywne warstwy wierzchniej odkuwki, które uzyskano przez przeróbkę plastyczną.

8.2.1. Metody dogniatania

Istota operacji dogniatania polega na tym, że odkuwka w całości lub jej oddzielne części poddaje się gniotowi. Proces ten wykonuje się na zimno, półgorąco lub gorąco (kalibrowanie). Podwyższenie temperatury ma na celu zmniejszenie poziomu nacisków. Rzadko przeprowadza się dogniatanie przy tym samym nagrzewie, z uwagi na niebezpieczeństwo wprasowania zgorzeliny w powierzchnię odkuwki. Zaleca się ponowny nagrzew po uprzednim piaskowaniu lub trawieniu, ale do zakresu temperatury, przy której nie występuje intensywne utlenianie. Ważne jest również, by temperatura kalibrowania była utrzymywana w stałym zakresie, co gwarantuje uzyskanie wymaganej dokładności wymiarowej. Po operacji kalibrowania odkuwki na gorąco stosuje się operację czyszczenia jej powierzchni (piaskowanie, śrutowanie itp.).

Pod względem rodzaju gniotów i zachodzących odkształceń w materiale wyróżnia się trzy podstawowe metody dogniatania, tj.:

- ❑ płaskie (rys. 8.3a) – polega na wywieraniu nacisku na płaszczyznę odkuwki przez płaską powierzchnię narzędzia; dogniatanie jest realizowane na zimno, a boczne płynięcie materiału jest niczym nieograniczone; celem dogniatania jest uzyskanie dokładnej odległości pomiędzy równoległymi płaszczyznami wybranych części odkuwki; ponieważ boczne powierzchnie odkuwki (oraz niedogniatane fragmenty) mogą zostać zniekształcone, to z reguły przyjmuje się jednostronny naddatek na dotłaczanie w wielkości $0,4 \div 0,8$ mm, ale nie większy niż 2 mm, z jednoczesnym uwzględnieniem dodatniej odchyłki wymiarowej przyjętej przy kuciu odkuwki; dogniatanie płaskie jest również stosowane do usuwania skosów matrycowych;
- ❑ powierzchni krzywoliniowych (tj. wycinków powierzchni brył obrotowych; rys. 8.3b) – metoda ta jest złożonym przypadkiem dogniatania płaskiego, gdzie płynięcie materiału jest częściowo ograniczone i odbywa się zazwyczaj tylko w kierunku pokrywającym się z osią odkuwki; operacja ta wymaga wykonania kilkunastu nacisków suwaka prasy, przy czym po każdym kolejnym nacisku odkuwka jest obracana o określony kąt; dognia-



Rys. 8.3. Rodzaje dogniatania odkuwki: a) płaskie, b) krzywoliniowe, c) objętościowe [8, 92, 98]

tanie tą metodą jest mniej dokładne niż podczas dogniatania płaskiego i dodatkowo należy uwzględnić wzrost długości odkuwki;

- ❑ objętościowe (rys. 8.3c) – polega na wywieraniu nacisku na całą powierzchnię odkuwki przez ścianki wykroju narzędzia dotłaczającego; dogniatanie tą metodą jest realizowane na zimno lub półgorąco na prasie kolanowej, albo na gorąco na młocie o bardzo dużej energii uderzenia; kształt wykroju ogranicza swobodne płynięcie materiału generując przy tym duże naciski i powodując jednocześnie objętościowe odkształcenie materiału; w celu uniknięcia tworzenia się wypłytki w szczelinie pomiędzy narzędziami, wymiary wysokościowe odkuwki powinny być powiększone przy jednoczesnym pomniejszeniu wymiarów w płaszczyźnie podziału, ale z zachowaniem stałej objętości;

8.2.2. Konstrukcja narzędzi do dogniatania

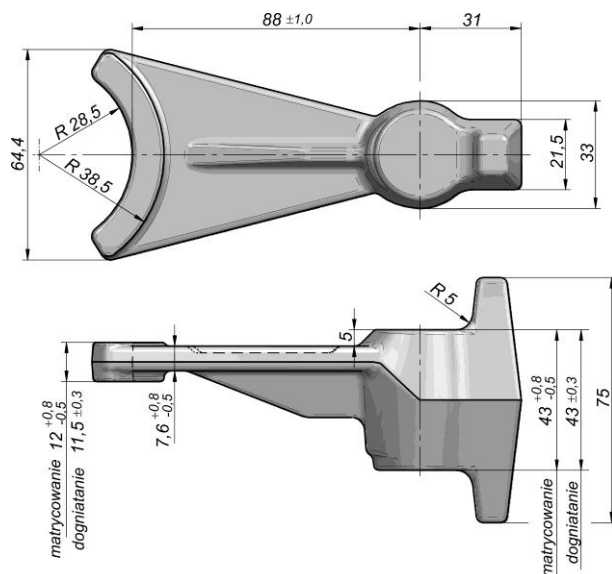
Narzędzia do dogniatania konstruuje się na podstawie rysunku odkuwki. Rysunek musi zawierać stosowne informacje, takie jak: powierzchnie podlegające dotłaczaniu, wymiary początkowe i końcowe oraz tolerancje wymiarów. Wielkość naddatków i tolerancja wymiarów dogniatanych zależy od:

- ❑ stanu powierzchni odkuwki,
- ❑ wielkości powierzchni dogniatanej,
- ❑ stosunku wysokości fragmentu dogniatanej odkuwki do wymiarów poprzecznych (średnicy lub szerokości odkuwki),
- ❑ metody dogniatania.

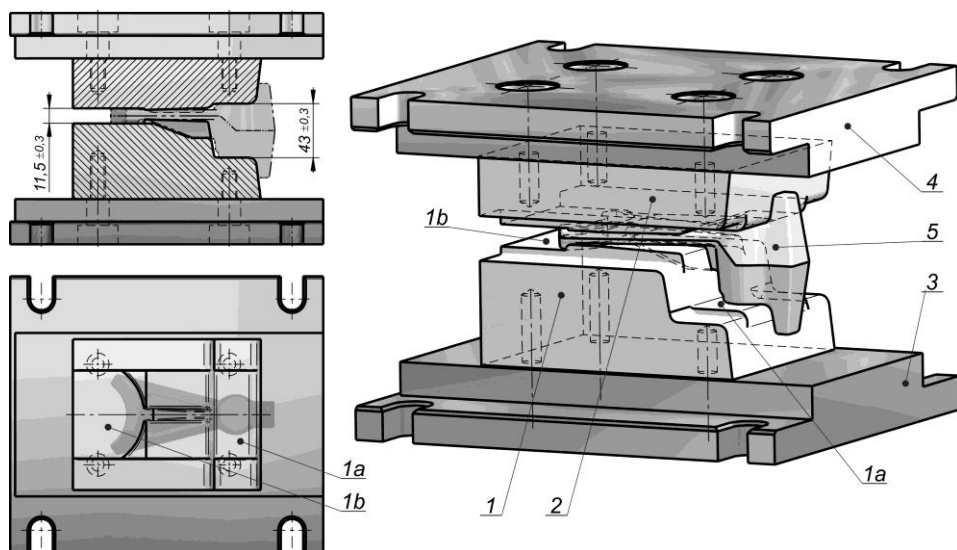
Przykład rysunku odkuwki (w formie uproszczonej), która jest poddawana operacji dogniatania, pokazano na rys. 8.4. W przypadku, gdy przy dogniataniu

następuje zmiana kształtu odkuwki należy sporządzić dwa oddzielne rysunki – tj. dla odkuwki przed oraz po dogniataniu.

Narzędzia do dogniatania odkuwek pod względem działania i konstrukcji są bardzo podobne do typowych tłoczników, w szczególności przeznaczonych do prostowania odkuwek. Na rys. 8.5 pokazano schematycznie narzędzie (matrycę, przyrząd) do dogniatania płaskiego odkuwki z poprzedniego rys. 8.4. Częściami roboczymi są wkładki matrycowe 1 i 2, w których najważniejszą częścią są płaszczyzny robocze (przykładowo oznaczone jako 1a i 1b w przypadku wkładki dolnej 1). Wkładki są zamocowane w oprawkach 3 i 4 przytwierdzanych do suwaka i stołu prasy. Sposób mocowania oprawek do dogniatania zależy od cech konstrukcyjnych



Rys. 8.4. Uproszczony rysunek odkuwki pokazujący sposób podawania wymiarów podlegających dogniataniu [92, 95]



Rys. 8.5. Przykład matrycy do dogniatania płaskiego odkuwki z rys. 8.4; opis w tekście

maszyny i jest podobny jak w przypadku oprawek matryc kuźniczych (zagadnienie to omówiono w rozdziale 7.5).

Najważniejszymi warunkami stawianymi narzędziom do dogniatania jest sztywność konstrukcji oraz minimalna ilość części pośrednich łączących poszczególne elementy matrycy. Powierzchnie robocze (do dogniatania – np. 1a i 1b; rys. 8.5) są wykonywane z dużą dokładnością, gładkością i są ulepszone cieplnie do odpowiedniej twardości. Ponadto, wszystkie części składowe matrycy muszą być spasowane, w celu uzyskania oczekiwanej dokładności wymiarowej dogniatanych części odkuwki. Konstrukcja narzędzi musi również umożliwiać swobodne i dokładne umieszczenie odkuwki w matrycy – np. mieć wybrania na uźebrowanie odkuwki.

Matryce przeznaczone do dogniatania objętościowego mają konstrukcję bardzo podobną do narzędzi opisanych wcześniej. Dodatkowym warunkiem jest uwzględnienie i wykonanie szczeliny pomiędzy wkładkami. Przyjmuje się, że w dolnym położeniu suwaka szczelina ta powinna zawierać się w przedziale $0,5 \div 2,0$ mm.

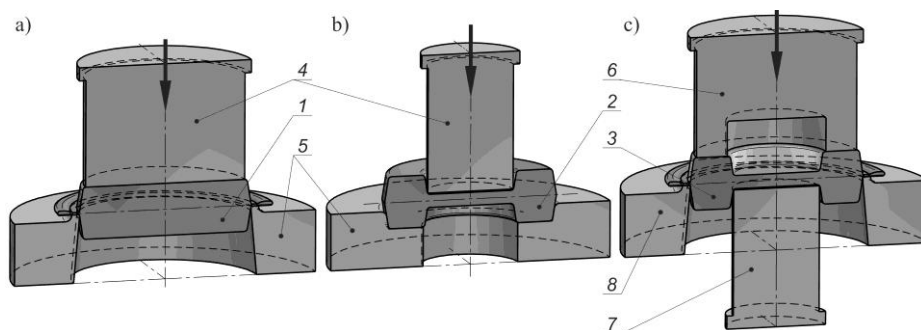
8.3. Okrawanie wypływki i przebijanie otworów

8.3.1. Charakterystyka ogólna

Odkuwki matrycowe, które są kute na młotach lub prasach kuźniczych, zazwyczaj posiadają wypływkę oraz denka, które należy bezwzględnie usunąć. Operację usuwania wypływki nazywa się okrawaniem i jest ona realizowana na przyrządzie nazywanym okrojnikiem. Natomiast operacja usuwania denka lub wykonywania otworów przelotowych w odkuwkach nazywana jest przebijaniem (wycinaniem) otworów i jest wykonywana na przyrządzie, który z kolei jest nazywany wycinarką. Typowy układ narzędzi do realizacji omawianych operacji pokazano schematycznie na rys. 8.6. Wyróżnia się trzy podstawowe układy okrojników (wycinarek), tj.:

- ❑ okrojniki do okrawania wypływki (rys. 8.6a);
- ❑ wycinarki do otworów (rys. 8.6b);
- ❑ okrojniki jednoczesne (rys. 8.6c), na których jednocześnie okrawa się wypływkę oraz usuwa denko – są stosowane przeważnie dla odkuwek okrągłych lub zbliżonych do okrągłych w produkcji seryjnej i masowej, co pozwala zwiększyć wydajność i zmniejszyć ilość koniecznego oprzyrządowania, np. w stosunku do przyrządów dwutaktowych, na których najpierw okrawa się wypływkę, a następnie wycina otwór.

Okrawanie i przebijanie wykonuje się na prasach przeznaczonych do okrawania, które są dodatkową maszyną w linii produkcyjnej. Prasa ta jest



Rys. 8.6. Układ narzędzi stosowany do: a) okrawania wyplýwki, b) wycinania otworu, c) jednoczesnego okrawania i przebijania; 1 – odkuwka z wyplýwką, 2 – odkuwka z denkiem, 3 – odkuwka z wyplýwką i z denkiem, 4 – stempel, 5 – płyta tnąca, 6 – stempel z wybraniem czołowym, 7 – stempel do wycinania otworu, 8 – płyta obcinająca

umieszczana bezpośrednio przy maszynie kuźniczej. W praktyce przemysłowej stosuje się najczęściej prasy:

- ❑ mechaniczne mimośrodowe wysięgowe jednostojakowe o nacisku nominalnym suwaka do 1,6 MN;
- ❑ korbowe wysięgowe jednostopniowe o nacisku do 5 MN;
- ❑ prasy korbowe ramowe dwustojakowe o nacisku do 10 MN, które z uwagi na dużą sztywność korpusu są typowymi prasami do okrawania;
- ❑ prasy dwukorbowe (dwupunktowe) o szerokim stole, na których można oprócz okrojnika (wycinarki) ustawić również narzędzia do prostowania lub dogniatania odkuwki.

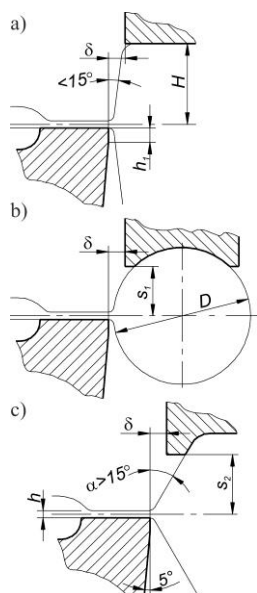
Operację okrawania (lub przebijania) wykonuje się metodą na:

- ❑ zimno – metoda ta jest rzadko stosowana z uwagi na powstające duże siły cięcia, które wymuszają użycie pras o dużym nacisku;
- ❑ gorąco, bezpośrednio po kuciu matrycowym, gdy odkuwka nadal znajduje się w stanie nagrzanym; metoda ta jest częściej stosowana.

Wartość siły, jaka potrzebna jest do okrawania (lub przebijania), jest wyznaczana na podstawie wzoru (3.3), przyjmując wartość współczynnika $k = 1,4$. Przy jednoczesnym okrawaniu wyplýwki i wycinaniu otworu (tj. przy jednym ruchu suwaka prasy) całkowita siła obcinania jest sumą sił wyznaczonych z osobna dla okrawania i wycinania. Natomiast całkowita siła nacisku prasy powinna być większa o 10-30% w stosunku do obliczonej siły obcinania.

8.3.2. Konstrukcja okrojników

Podstawową czynnością podczas projektowania okrojników jest dobór kształtu i wymiarów stempla oraz płyty tnącej – rys. 8.7. Między powierzchniami tnącymi tych narzędzi stosuje się jednostronny luz δ , którego wartość zależy od:



Rys. 8.7. Podstawowe parametry opisujące krawędzie robocze narzędzi stosowanych do okrawania – opis w tekście

- kształtu przekroju odkuwki – tj. wyróżnia się przekrój okrągły lub zbliżony do prostokątnego;
- wielkości pochylenia ścianki bocznej przekroju odkuwki – tj. większe lub mniejsze od 15°.

Wartość luzu δ nie zależy od temperatury. Luz powinien być jednakowy na całym obrysie okrawania i wykonuje się go kosztem zmniejszenia wymiaru stempla. Zalecane wartości luzu δ podano w tabeli 8.1.

Tabela 8.1.

Zalecana wartość jednostronnego luzu δ - oznaczenia wg rys. 8.7

przypadek wg rys. a			przypadek wg rys. b			przypadek wg rys. c
<i>H</i>		δ	<i>D</i>		δ	δ
>	≤		>	≤		
mm						
	5	0,3		20	0,3	0,3
5	10	0,5	20	30	0,5	
10	20	0,8	30	50	0,8	
20	25	1,0	50	60	1,0	
25	30	1,2	60	70	1,2	
30		1,5	70		1,5	

Powierzchnia czołowa stempla powinna przylegać do powierzchni odkuwki. Obrys stempla wykonuje się na podstawie obrysu odkuwki, uwzględniając jej stan – tj. zimny lub gorący. W przypadku odkuwki o przekroju w kształcie okrągłym odległość s_1 krawędzi czołowej stempla od linii podziału odkuwki równa jest (rys. 8.7b):

$$s_1 = 0,2D + 1 \text{ [mm]}, \quad (8.1)$$

natomiast dla odkuwek o dużym pochyleniu ścianki bocznej, wymiar s_2 wynosi:

$$s_2 = \frac{3,3 - 0,03\alpha}{\text{tg } \alpha} \text{ [mm]}, \quad (8.2)$$

gdzie α jest kątem pochylenia ścianki przekroju odkuwki, którego wartość podaje się w radianach.

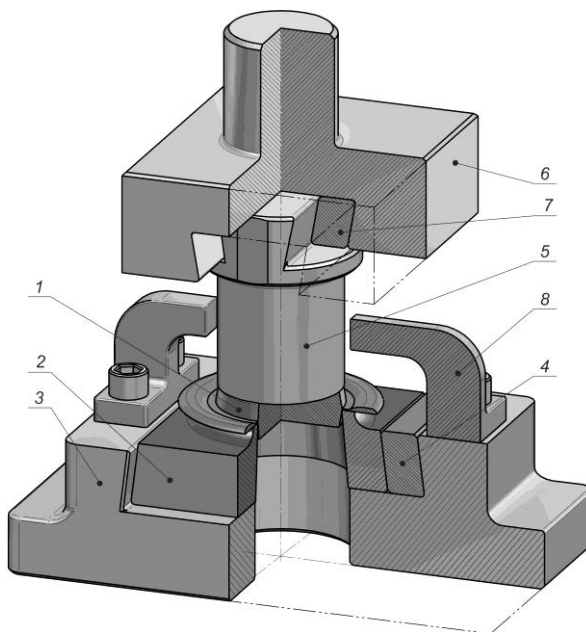
Płytę tnącą wykonuje się w kształcie prostopadłościanu, którego wymiary są zunifikowane [92, 95]. Otwór tnący wykonuje się na podstawie obrysu odkuwki w płaszczyźnie podziału. Otwór ten jest przelotowy, a ścianki są pochylone pod kątem w zakresie 3÷5°. Przy krawędzi tnącej wykonuje się pasek pionowy o wysokości równej $h_1 = 1,5h$, gdzie h jest grubością wypływy (rys. 8.7). Dookoła krawędzi tnącej wykonuje się również występ o wysokości 10÷15 mm i szeroko-

kości większej o 2 mm od szerokości wypłytki. Zapewnia to prawidłowe ułożenie odkuwki o masie mniejszej niż 30 kg na płycie tnącej nawet w przypadku zdeformowanej wypłytki.

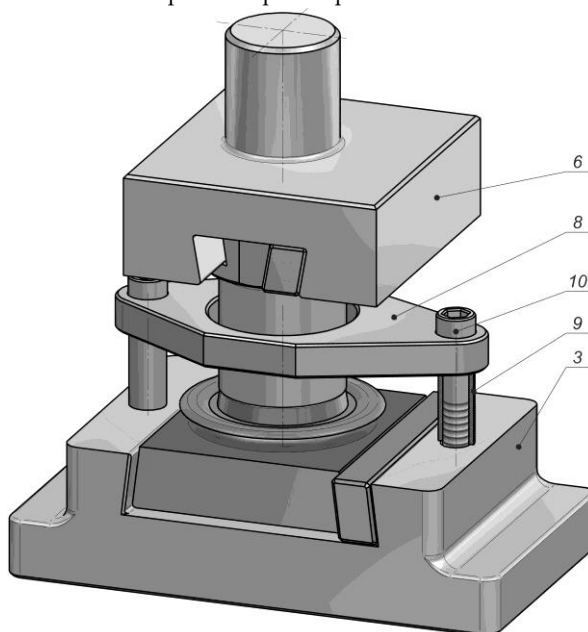
Płyty tnące można wykonać jako:

- ❑ monolityczne, które są mocowane do opraw za pomocą klinów;
- ❑ składane – przy okrawaniu odkuwek wydłużonych zazwyczaj stosuje się płyty dwudzielne, natomiast odkuwek o złożonym kształcie – wielodzielne; podział płyty na części musi być wykonany w ten sposób, aby umożliwić regulację obrysu okrawania we wszystkich kierunkach; wzajemne ułożenie części płyty zabezpiecza się kołkami; płyty składane mocuje się w oprawkach specjalnych za pomocą śrub.

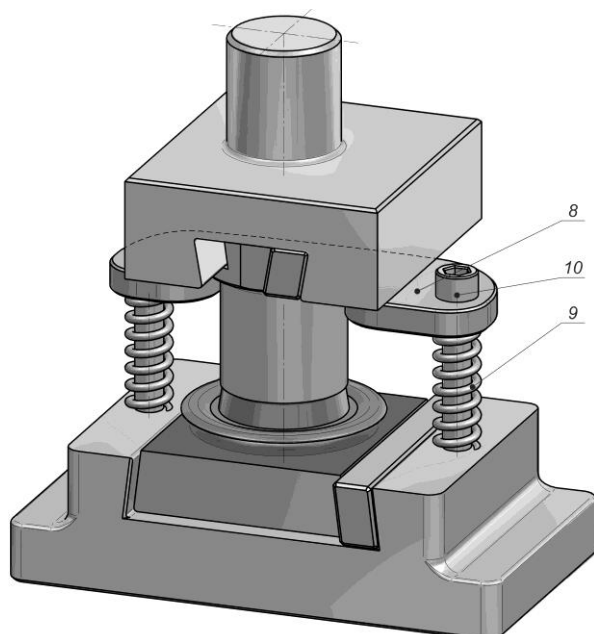
Na kolejnych rysunkach 8.8÷8.11 przedstawiono typowe konstrukcje okrojników, w których zastosowano monolityczne płyty tnące 2 mocowane w oprawkach 3 z użyciem klina 4. Stosuje się trzy typy oprawek – niską (np. rys. 8.8), wysoką (rys. 8.11) oraz z kołkami prowadzącymi. Stempel 5 jest mocowany w uchwy-



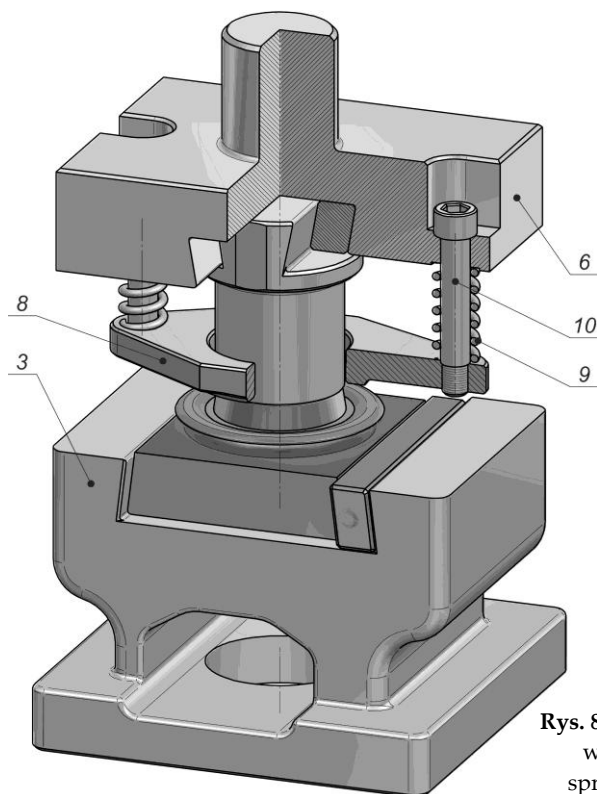
Rys. 8.8. Okrojnik do okrawania wypłytki ze ściągaczem w postaci łapek – opis w tekście



Rys. 8.9. Okrojnik do okrawania wypłytki ze ściągaczem płytkowym wspartym na tulejach – opis w tekście



Rys. 8.10. Okrojnik do okrawania wypływkę ze ściągaczem płytkowym wspartym na sprężynach – opis w tekście



Rys. 8.11. Okrojnik do okrawania wypływkę ze ściągaczem sprężystym – opis w tekście

cie 6 w podobny sposób jak monolityczna płyta tnąca w oprawce – tj. stosuje się tzw. połączenie na jaskółcze gniazdo oraz klin ustalający 7. Uchwyty są mocowane do suwaka prasy za pomocą czopa.

Przedstawione na omawianych rysunkach konstrukcje okrojników różnią się systemem ściągania wypływkę ze stempla. Należy go stosować, gdy jednostronny luz δ jest mniejszy od 0,5 mm (podczas okrawania na zimno) lub 1,0 mm (przy odkrawaniu na gorąco). Konstrukcja układów ściągaczy zależy głównie od wymiarów odkuwki 1, którą kowal powinien umieścić na płycie tnącej w sposób dogodny. Wyróżnia się cztery typy ściągaczy wypływkę, tj. w postaci:

- łapek (rys. 8.8) – jest to najprostszy sposób ściągania wypływkę, który najczęściej jest stosowany przy odkrawaniu na gorąco odkuwek dużych; łapki 8 są znormalizowane, a ich wymiary są podane np. w [92];

- ❑ płyty wspartej na tulejach (rys. 8.9) – jest to najbardziej niezawodny układ ściągania wypluwki; składa się on z płyty 8 o grubości $15 \div 25$ mm, wspartej na tulejach 9 i przytrzymywanej przez śruby o średnicy $15 \div 25$ mm; otwór na stempel w płycie jest wykonywany według obrysu z luzem $1,5 \div 2,5$ mm;
- ❑ płyty wspartej na sprężynach (rys. 8.10) – jest stosowany przy okrawaniu na zimno, gdy stempel ma stosunkowo małą długość; płyta 8 jest wsparta na sprężynach 9 i przytrzymywana śrubami 10; podczas ruchu stempla w dół, płyta ma możliwość przemieszczania się razem ze stemplem; na rysunku pokazano płytę otwartą, która jest stosowana zamiast płyty zamkniętej, gdy jest utrudnione swobodne ułożenie odkuwki na płycie tnącej;
- ❑ płyty dociskanej sprężynami (tzw. sprężysty; rys. 8.11) – jest stosowany przy okrawaniu na zimno i na gorąco odkuwek bardzo wysokich; w odróżnieniu od poprzednich typów ściągaczy, w tym układzie płyta 8 jest przymocowana za pomocą śrub 10 i sprężyn 9 do uchwytu.

8.3.3. Konstrukcja wycinarek

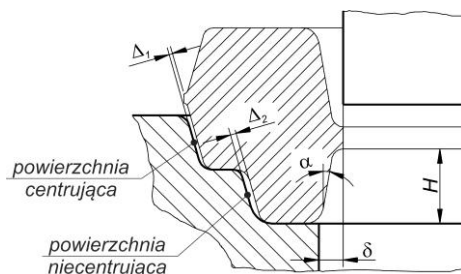
Podstawową czynnością podczas projektowania wycinarek jest ustalenie wymiarów wycięcia oraz wielkości luzu δ pomiędzy stemplem a otworem w płycie tnącej. Wykonuje się to w oparciu o kształt denka, umiejscowienie denka w odkuwce, rodzaj materiału oraz temperaturę wycinania otworu.

Przy usuwaniu denek wklęsłych (rys. 7.35a) linia cięcia przechodzi przez środek zaokrąglenia r łączącego denko z odkuwką. Dla pozostałych kształtów denek dopuszcza się przesunięcie linii cięcia o $2 \div 5$ mm w kierunku odkuwki.

Wielkość luzu δ (rys. 8.12) przyjmuje się w zakresie $0,5 \div 3,0$ mm (dla denek płaskich) lub $0,5 \div 1,0$ (dla denek kształtowych oraz jednostronnych wgłębień). Z reguły, większa wartość luzu jest stosowana dla większych pochyłych α ścianki odkuwki oraz większej głębokości H . W zależności od wielkości luzu δ płyta tnąca może uczestniczyć tylko częściowo w wycinaniu otworu lub pełnić rolę krawędzi tnącej.

Projektując płytę tnącą dla wycinarki należy kierować się następującymi zaleceniami (rys. 8.12):

- ❑ wybranie na odkuwkę powinno być łatwe do wykonania;
- ❑ głębokość wybrania powinna być mniejsza od głębokości wykroju matrycującego, w którym była wcześniej kuta odkuwka;



Rys. 8.12. Podstawowe parametry opisujące narzędzia stosowanych do wycinania otworu; opis w tekście

- ❑ zaleca się dążenie do minimalizacji wymiarów płyty tnącej wykonując wybranie tylko dla części odkuwki (tzn. minimalne zagłębienie);
- ❑ tylko jedna powierzchnia wybrania może być centrującą odkuwkę;
- ❑ luz Δ_1 między odkuwką a powierzchnią centrującą wybrania powinien wynosić $0,2 \div 0,5$ mm (dla odkuwek małych) lub 1,0 mm (dla odkuwek dużych), natomiast luz Δ_2 dla pozostałych powierzchni nie centrujących odkuwki powinien być powiększony w stosunku do luzu Δ_1 o 0,5 mm.

Ogólna konstrukcja wycinarek jest bardzo podobna jak okrojników. Stosuje się takie same oprawki, uchwyty oraz ściągacze. Najbardziej zalecane rozwiązania konstrukcyjne charakteryzują się:

- ❑ mocowaniem płyty tnącej za pomocą śrub do oprawki;
- ❑ mocowaniem stempla za pomocą jaskółczego ogona do uchwyty (np. rys. 8.11) – w wycinarkach bez prowadzenia;
- ❑ mocowaniem stempla za pomocą uchwyty specjalnego (tj. w podobny sposób, jaki stosuje się dla typowych wykrojników – np. rys. 3.14) – w wycinarkach z prowadzeniem;
- ❑ zastosowaniem ściągacza płytkowego (rys. 8,9) opierającego się na dwóch, trzech lub czterech tulejach – w wycinarkach bez prowadzenia;
- ❑ zastosowaniem ściągacza sprężystego (rys. 8.11) – w wycinarkach z prowadzeniem.

8.4. Czyszczenie odkuwek ze zgorzeliny

Odkuwki, które były kształtowane na gorąco lub będące po obróbce cieplnej, posiadają na swojej powierzchni zgorzelinę. Usunięcie tej zgorzeliny nie tylko jest podyktowane walorami estetycznymi, ale przede wszystkim jest ważne ze względów technologicznych, ponieważ zgorzelina jest warstwą twardych tlenków utrudniającą realizację dalszych operacji. Zgorzelinę usuwa się z powierzchni odkuwki po obróbce cieplnej, przed obróbką cieplną (w uzasadnionych sytuacjach), przed operacją dogniatania i prostowania na zimno oraz przed kontrolą techniczną. Zgorzelinę (lub warstwę tlenków powstałą na powierzchni materiału w wyniku np. zjawisk atmosferycznych) usuwa się również z powierzchni półfabrykatów lub wsadu.

Operacja usuwania warstwy zgorzeliny lub innych zanieczyszczeń z powierzchni metalu jest nazywana oczyszczaniem. Może ono być wykonywane metodami mechanicznymi lub chemicznymi.

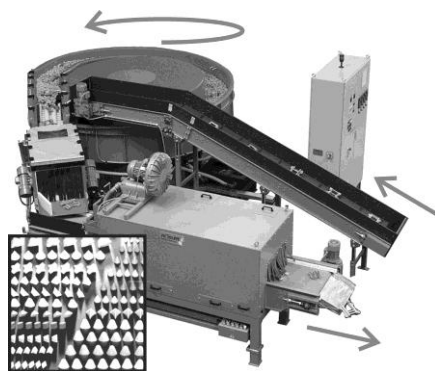
8.4.1. Oczyszczanie mechaniczne

Operację oczyszczania mechanicznego odkuwek wykonuje się metodami:

- ❑ bębnowania (rys. 8.13) – jest to metoda polegająca na umieszczeniu wsadu w postaci odkuwek do specjalnego bębna oczyszczarki ociernej, gdzie w wyniku ruchu rotacyjnego bębna odkuwki wzajemnie ocierają się o siebie; niekiedy wsad do bębnowania uzupełnia się o kulki stalowe lub specjalne kształtki (wykonane z materiałów twardych), które mają na celu zwiększenie efektywności procesu oczyszczania; powierzchnia odkuwki po bębnowaniu jest czysta i błyszcząca, ostre krawędzie są stępione, a wszelkie rysy lub pęknięcia stają się niewidoczne, co jest uważane za wadę tego procesu uniemożliwiającą sprawdzanie odkuwki pod kątem pęknięć, np. metodą magnetyczno-proszkową;
- ❑ oczyszczania wibrościernego (rys. 8.14) – metoda ta polega na umieszczeniu odkuwek wraz z kształtami ceramicznymi lub żywicznymi do maszyny wibracyjnej; efekt procesu oczyszczania powierzchni odkuwek tą metodą jest podobny jak w przypadku bębnowania;
- ❑ piaskowania – jest to metoda oczyszczania powierzchni odkuwki poprzez narzucanie ścierniwa przez dysze za pomocą sprężonego powietrza (piaskowanie na sucho); ścierniwem jest najczęściej wyselekcjonowany piasek kwarcowy (o granulacie $1\div 2,5$ mm) lub syntetycznie drobinki (o granulacie $0,1\div 1,4$ mm) uzyskane z takich materiałów jak: węgiel krzemu, elektrokorund (ścierniwo na bazie tlenku glinu) lub żużel pomiedziowy (ścierniwo na bazie SiO_2 wytwarzane zgodnie z normą PN-EN ISO 11126-3, która to norma przewiduje wielkość granulatu nawet 3,2 mm); oczyszczona powierzchnia odkuwki jest matowa i często pokryta cienką warstwą ścierniwa, co jest uważane za wadę –



Rys. 8.13. Oczyszczarka ocierająca bębnowa o pojemności bębna 500 litrów i ładowności 1000 kg; wymiary bębna (o przekroju sześciokąta): 1000 x 350 mm [90]



Rys. 8.14. Wibrator kołowy typu Long-Radius do pracy ciągłej oraz fotografia przedstawiająca używane kształtki ceramiczne i żywiczne [53]

np. warstwa kwarcu na powierzchni odkuwki przyspiesza tępienie narzędzi skrawających podczas dalszej jej mechanicznej obróbki wykańczającej;

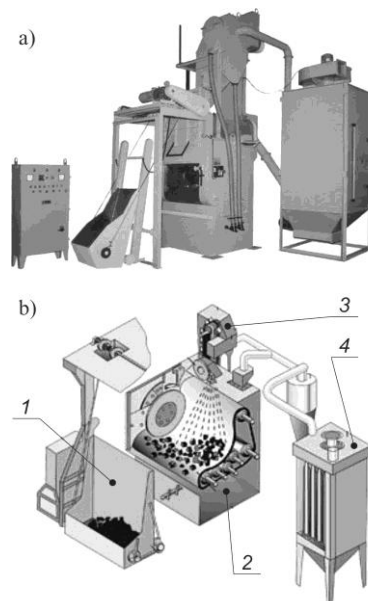
- śrutowania – jest to metoda polegająca na czyszczeniu powierzchni odkuwki za pomocą strumienia śrutu narzucanego przez obracający się wirnik (rys. 8.15); w operacji tej stosuje się śrut okrągły, łamany lub mieszany, który uzyskuje się albo w procesie granulacji twardego staliwa lub żeliwa, albo za pomocą łamania (cięcia) ciągnionego drutu stalowego o średnicy 0,5÷1,5 mm; powierzchnia oczyszczona odkuwki dodatkowo podlega niewielkiemu utwardzeniu.

Do realizacji procesu oczyszczania mechanicznego stosuje się oczyszczarki, które dzieli się na urządzenia do pracy ciągłej lub cyklicznej. Można je również podzielić ze względu na stopień automatyzacji, tj.: urządzenia zautomatyzowane oraz stosowane do oczyszczania ręcznego. Nowoczesne oczyszczarki (do piaskowania lub śrutowania) są urządzeniami dostosowanymi do stosowania dowolnego ścierniwa oraz są wyposażone w systemy odpylające, które spełniają surowe normy środowiskowe i BHP.

8.4.2. Oczyszczanie chemiczne

Chemiczne oczyszczanie odkuwek ze zgorzeliny polega na ich wytrawieniu w roztworze aktywnie działającym na tlenki oraz metal. Zależnie od rodzaju metalu lub stopu z jakiego jest wykonana odkuwka (stal, miedź, mosiądz, aluminium itp.) dobiera się skład kąpieli i parametry procesu trawienia. W wytrawialniach, oczyszczanie chemiczne odkuwek prowadzi się zazwyczaj w kwasie solnym lub siarkowym, bądź w mieszaninach tych kwasów. Inne kwasy stosuje się rzadziej i tylko dla specjalnych gatunków materiału odkuwki. Wyjątkowo aluminium trawi się w kąpielach alkalicznych. W praktyce przemysłowej, najczęściej trawieniu poddaje się wyroby wykonane ze stali.

Do trawienia odkuwek wykonanych ze stali najczęściej stosuje się kąpiele oparte na kwasie solnym lub siarkowym. Stale stopowe, takie jak nierdzewne są trudniejsze w trawieniu, dlatego do procesu czyszczenia używa się mieszaniny

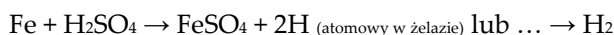
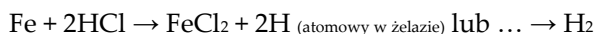
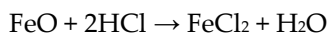
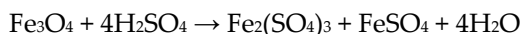
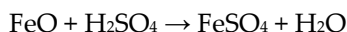


Rys. 8.15. Zautomatyzowana oczyszczarka taśmowa (śrutownica) do pracy okresowej o wydajności 2÷3 ton odkuwek na godzinę (a) wraz ze schematem działania (b), gdzie: 1- zasobnik ładujący wsad, 2 – ruszt taśmowy, 3 – dysza narzutowa, 4 – system odpylający [2, 47]

kwasów, przy czym są to zwykle mieszaniny kwasu siarkowego lub solnego z dodatkiem kwasu utleniającego, np. HNO_3 [46, 92].

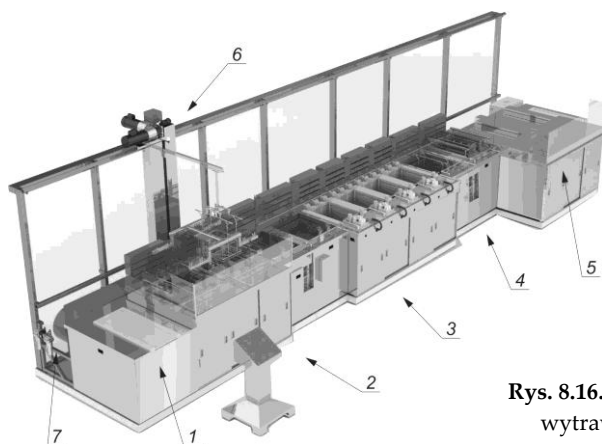
Do oczyszczenia odkuwek z metali nieżelaznych stosuje się kompozycje kwasów siarkowego i solnego, często z dodatkiem kwasu azotowego [46]. Przykładowo, odkuwki wykonane z miedzi lub jej stopów oczyszcza się stosując roztwory kwasu siarkowego z dodatkiem kwasu azotowego lub innych związków utleniających (np. CrO_2 lub H_2O_2). Natomiast dla wyrobów wykonanych z aluminium lub jego stopów stosuje się kąpiele oparte na związku NaOH .

Podczas trawienia zgorzelina jest usuwana z powierzchni metalu poprzez odrywanie się od powierzchni odkuwki, w wyniku wydzielającego się wodoru (np. trawienie w kwasie siarkowym). Po odsłonięciu powierzchni odkuwki niestety zaczyna się rozpuszczać metal rodzimy. Reakcja ta zachodzi również na skutek przenikania roztworu kwasu do powierzchni odkuwki poprzez pory i pęknięcia w warstwie zgorzeliny. Reakcji rozpuszczania metalu towarzyszy intensywne wydzielanie wodoru. W celu zahamowania tego szkodliwego procesu degradacji powierzchni odkuwki do kąpeli trawiących wprowadza się specjalne inhibitory trawienia [46, 92]. Przykłady reakcji zachodzących podczas chemicznego oczyszczania odkuwki stalowej ze zgorzeliny są następujące [46]:



Na rys 8.16 przedstawiono schematycznie zautomatyzowaną wytrawialnię. Odkuwki przeznaczone do trawienia umieszcza się na stole 1, które następnie są zabierane przez przenośnik 6. Odkuwki kolejno są zanurzane w wannach 2 zawierających kąpiele trawiące, wannach 3 wypełnionych wodą i cieczą neutralizującą, a następnie są prze-

kazywane do stanowiska osuszającego 4. Wytrawione odkuwki są składowane na stole odbiorczym 5. Z uwagi, że przy trawieniu wydzielają się niebezpieczne gazy, przy wannach znajduje się system wentylacji,



Rys. 8.16. Schemat zautomatyzowanej wytrawialni [81]; opis w tekście

który jest połączony z wyciągiem 7. Koszty działania wytrawialni są znaczne oraz ze względu jej szkodliwe oddziaływanie na środowisko należy zapewnić szczególne środki bezpieczeństwa – przede wszystkim pełną neutralizację zużytej kąpieli trawiącej i czyszczącej. Jednak w przypadku pełnej automatyzacji procesu trawienia oraz wysokowydajnej regeneracji kwasu, koszt oczyszczania chemicznego odkuwek jest porównywalny z kosztami czyszczenia mechanicznego (np. śrutowania).

8.5. Obróbka cieplna odkuwek

Wyroby kuźnicze (odkuwki) dostarcza się zależnie od warunków technicznych bez obróbki cieplnej lub po obróbce cieplnej. Odkuwki zawsze poddaje się obróbce cieplnej gdy:

- ❑ są one wykonane ze stali wysokostopowej lub ze stopów nieżelaznych,
- ❑ będą one obrabiane mechanicznie poprzez obróbkę skrawaniem.

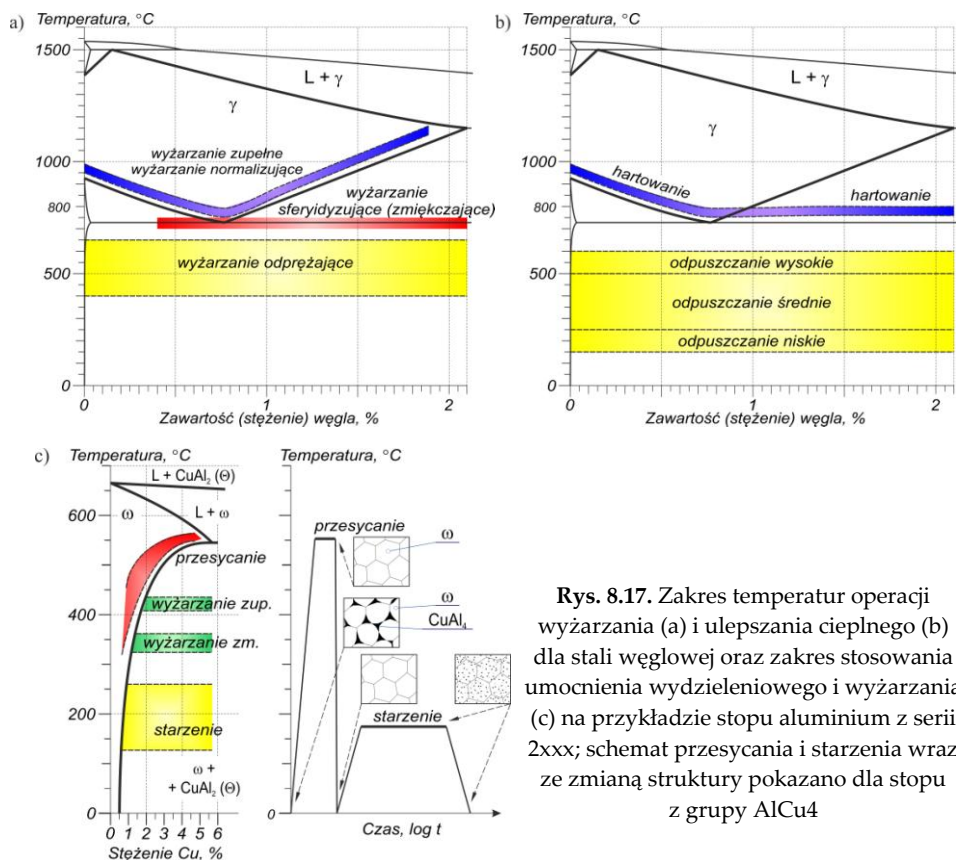
Celem obróbki cieplnej jest przede wszystkim polepszenie niekorzystnej struktury materiału oraz usunięcie naprężeń własnych, które są efektem poprzednich zabiegów obróbki plastycznej. Głównymi przyczynami pogorszenia struktury materiału są:

- ❑ nadmierny rozrost ziaren – jest wynikiem przegrzania materiału;
- ❑ gruboziarnista i nierównomierna struktura – powstaje, gdy proces kucia zakończył się przy zbyt wysokiej temperaturze lub przy zgniotach krytycznych;
- ❑ pozostałości zimnych zgniotów – gdy proces kucia realizowano przy zbyt niskiej temperaturze.

W odkuwkach po procesie obróbki plastycznej pozostają naprężenia wewnętrzne, które wynikają z nierównomiernych odkształceń i nierównomiernego studzenia. Pozostawienie tych naprężeń powoduje obniżenie własności mechanicznych, przyczynia się do skrzywień (zniekształceń) podczas dalszej obróbki odkuwki oraz w efekcie końcowym pogarsza warunki eksploatacji części finalnej.

Zatem, w celu usunięcia naprężeń własnych z odkuwki, polepszenia własności struktury, zwiększenia obrabialności materiału (dla dalszej obróbki skrawaniem) oraz podwyższenia własności wytrzymałościowych materiału stosuje się takie operacje obróbki cieplnej jak: wyżarzanie, ulepszanie cieplne lub umocnienie wydzieleniowe. Zakres i możliwości obróbki cieplnej zależą od rodzaju materiału odkuwki. Zgodnie z rys. 8.17 wyróżnia się:

- ❑ wyżarzanie normalizujące – stosowane jest dla stali konstrukcyjnej w celu uzyskania jednolitej drobnoziarnistej struktury, co polepsza własności



Rys. 8.17. Zakres temperatur operacji wyżarzania (a) i ulepszenia cieplnego (b) dla stali węglowej oraz zakres stosowania umocnienia wydzieleniowego i wyżarzania (c) na przykładzie stopu aluminium z serii 2xxx; schemat przesycania i starzenia wraz ze zmianą struktury pokazano dla stopu z grupy AlCu4

wytrzymałościowe oraz podatność na obróbkę mechaniczną; operacja ta polega na nagrzaniu stali do temperatury normalizacji (rys. 8.17a), wygrzaniu w tej temperaturze i następnym powolnym studzeniu na powietrzu;

- ❑ wyżarzanie zupełne – ma na celu uzyskanie struktury odznaczającej się dobrą ciągliwością, małą twardością oraz usunięcie naprężeń własnych; wyżarzanie zupełne stosuje się dla stali stopowych zamiast normalizowania, dla stopów aluminium z serii 2xxx, 6xxx i 7xxx oraz stopów tytanu; w stosunku do wyżarzania normalizującego różni się sposobem chłodzenia – bardzo powolnym razem z piecem w zakresie temperatur krytycznych (przemian fazowych) i następnym chłodzeniu na powietrzu;
- ❑ wyżarzanie izotermiczne – jest odmianą wyżarzania zupełnego i jest stosowane głównie dla stali; chłodzenie polega na szybkim obniżeniu temperatury do zakresu przemiany austenitu w perlit, wygrzaniu w tej temperaturze aż do zakończenia przemiany i następnie chłodzeniu na powietrzu; celem tego wyżarzania jest skrócenie czasu wyżarzania zupełnego oraz uzyskanie mniejszej twardości materiału niż przy wyżarzaniu zupełnym;

odmianą tego wyżarzania jest patentowanie stosowane do stalowych drutów i taśm, które pozwala uzyskać drobnoziarnistą strukturę perlityczną, idealnie nadającą się dalszej obróbki plastycznej na zimno (np. ciągnięcia); połączenie patentowania z odkształceniem na zimno stalowych drutów pozwala osiągnąć wytrzymałość materiału do 3600 MPa;

- ❑ wyżarzanie zmiękczające (niezupełne, częściowe, sferydizujące) – dla odkuwek wykonanych ze stali wysokowęglowej i stopowej; celem wyżarzania jest zamiana cementytu płytkowego na kulkowy – w efekcie uzyskuje się najmniejszą twardość, podatność do obróbki plastycznej na zimno oraz najlepszą skrawalność; dla odkuwek wykonanych ze stopów aluminium wyżarzanie zmiękczające pozwala usunąć naprężenia wewnętrzne i poprawia podatność na obróbkę mechaniczną;
- ❑ wyżarzanie odprężające – stosuje się dla odkuwek stalowych, które uprzednio były prostowane lub dogniatane na zimno; wyżarzanie polega na nagrzeniu materiału do temperatury niższej od temperatury przemian fazowych (rys. 8.17a), wygrzaniu w tej temperaturze i następnym powolnym chłodzeniu na powietrzu; efektem wyżarzania jest zmniejszenie naprężeń własnych powstałych w wyniku obróbki plastycznej lub nierównomiernego studzenia;
- ❑ ulepszanie cieplne – jest to połączenie zabiegów hartowania oraz wysokiego odpuszczania (rys. 8.17b) i jest stosowane do odkuwek wykonanych ze stali przeznaczonych na odpowiedzialne części maszyn; odpuszczanie wysokie zapewnia zachowanie dobrej skrawalności, uzyskanie najwyższej możliwej udurowienia stali oraz korzystnego stosunku granicy plastyczności do wytrzymałości doraźnej R_c/R_m ;
- ❑ przesycanie, starzenie lub umacnianie wydzieleniowe – zabiegi te są wykonywane zazwyczaj dla stopów nieżelaznych, które wykazują zmienną rozpuszczalność jednego ze składników w roztworze stałym – przykładem takich stopów są: stopy aluminium Al-Cu, Al-Mg-Si, Al-Zn, stopy magnezu Mg-Al, Mg-Zn oraz stopy miedzi Cu-Sn, Cu-Be. Na rys. 8.17c pokazano schematycznie obróbkę umacniania wydzieleniowego dla stopu AlCu₄ (duraluminium), który powszechnie jest stosowany na odkuwki matrycowe dla przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego – przy temperaturze otoczenia w stanie równowagi stop ten posiada strukturę składającą się z ziaren roztworu stałego ω i wydzieleni fazy międzymetalicznej Θ , skupionych na granicy ziaren. Przesycanie polega na nagrzeniu materiału do temperatury przesycania, wygrzaniu w tej temperaturze i następnym szybkim studzeniu, co powoduje uzyskanie struktury składającej się z ziaren przesyczonego roztworu stałego ω będącego w stanie metastabilnym. Natomiast starzenie (sztuczne lub naturalne) doprowadza strukturę stopu do stanu bliskiego równowagi fazowej, ale bez skoncentrowanych wydzieleni

fazy Θ na granicy ziaren (tj. są niewielkie wydzielения rozproszone równomiernie po całych ziarnach). Efektem umocnienia wydzieleniowego jest uzyskanie najlepszych własności wytrzymałościowych, ale kosztem pogorszenia własności plastycznych.

Odkuwki stalowe najczęściej poddaje się normalizacji lub ulepszeniu cieplnemu. Odkuwki wykonane ze stopów aluminium podlegają zazwyczaj przesycaniu i następnym sztucznym starzeniu, odkuwki wykonane ze stopów magnezu poddaje się tylko sztucznemu starzeniu po uprzednim studzeniu po obróbce plastycznej. Natomiast odkuwki ze stopów tytanu są wyżarzane.

Do obróbki cieplnej odkuwek używa się pieców elektrycznych, względnie gazowych o różnej konstrukcji. Są to zazwyczaj piece komorowe, przepychowe, taśmowe lub obrotowe. Do obróbki cieplnej stopów nieżelaznych (np. stopów Al) stosuje się piece próżniowe lub powietrzne, w których temperatura uzyskiwana jest przez regulowany system grzałek elektrycznych oraz system wentylatorów i przewodnic powodujących wymuszony obieg ogrzanego powietrza, co powoduje utrzymanie równomiernego rozkładu temperatury w całej komorze grzewczej. Piece do obróbki cieplnej często są dostosowane do pracy w atmosferze ochronnej.

9. Wyciskanie

9.1. Wprowadzenie

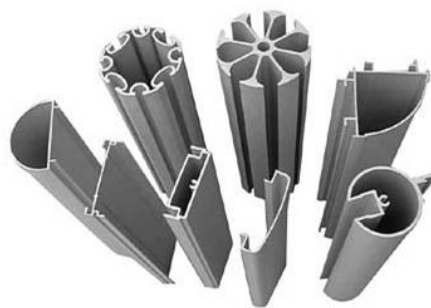
Wyciskaniem określa się proces kształtowania plastycznego, w którym metal zamknięty w pojemniku (rycypiencie) pod wpływem nacisku narzędzia przemieszczany jest przez otwór matrycy i uzyskuje kształt przekroju poprzecznego, odpowiadający temu otworowi. Wyciskanie nazywa się także prasowaniem wypływowym.

Proces wyciskania znajduje zastosowanie w wytwarzaniu wyrobów (odkuwek) o różnych kształtach: stożkowych, cylindrycznych, gładkich, z występami, pełnych, drażnionych. Metodą tą można także wykonywać odkuwki o kształcie złożonym – rys. 9.1. Analiza wyrobów wytwarzanych w zakładach kuźniczych wykazuje, iż znaczną ich ilość można uzyskać metodą wyciskania. Dla przykładu, w przemyśle samochodowym 10÷12% odkuwek może być uzyskana tą metodą kształtowania plastycznego.

Do największych zalet procesu wyciskania zalicza się:

- ❑ występowanie korzystnego trójosiowego stanu naprężeń (na ogół ściskających), który umożliwia wytwarzanie odkuwek również z materiałów trudno-odkształcalnych;
- ❑ małe straty materiału – w stosunku do kucia matrycowego w procesie wyciskania nie występuje wypływka i zmniejszone są nadatki na obróbkę skrawaniem;
- ❑ zwiększenie dokładności wykonania odkuwek, przy zwiększonej wydajności i obniżonej pracochłonności wytwarzania;
- ❑ łatwość mechanizacji i automatyzacji.

Do ujemnych cech procesu wyciskania można z kolei zaliczyć sto-



Rys. 9.1. Przykłady wyrobów (z aluminium) o złożonym kształcie, wytwarzanych metodą wyciskania

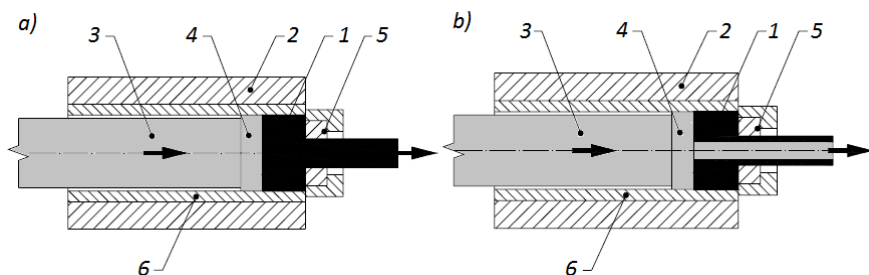
sunkowo duże naciski powierzchniowe, większe zużycie energii oraz małą żywotność narzędzi (matryc i stempli).

9.2. Klasyfikacja procesów wyciskania

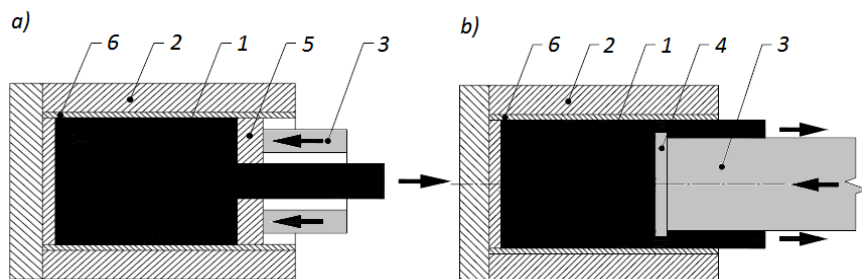
9.2.1. Podział ze względu na płynięcie materiału względem ruchu stempla

Ze względu na kierunek płynięcia materiału w stosunku do ruchu stempla wyróżnia się:

- Wyciskanie współbieżne (rys. 9.2), w którym materiał wypychany jest stemplem z rycypienta przez otwór w matrycy znajdującej się naprzeciw stempla. Kierunek i zwrot wypływania materiału jest zgodny z kierunkiem i zwrotem ruchu stempla. W tym przypadku wyciskania materiał przemieszcza się względem ścianek nieruchomego rycypienta, co powoduje występowanie na powierzchni kontaktu materiał-rycypient sił tarcia, które przeciwdziałają przemieszczaniu materiału zwiększają siłę wyciskania.
- Wyciskanie przeciwbieżne (rys. 9.3), stosowane do wytwarzania wyrobów pełnych i drażonych. W przypadku odkuwek pełnych materiał wypy-



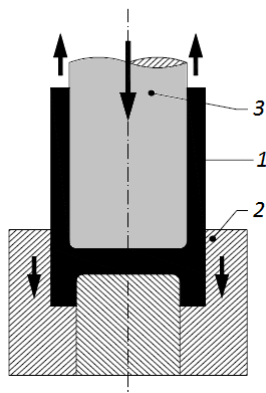
Rys. 9.2. Schemat wyciskania współbieżnego: a) prętów i b) rur; 1 – materiał wyciskany, 2 – pojemnik, 3 – tłoczysko (stempel), 4 – przekładka, 5 – matryca, 6 – tuleja pojemnika [100]



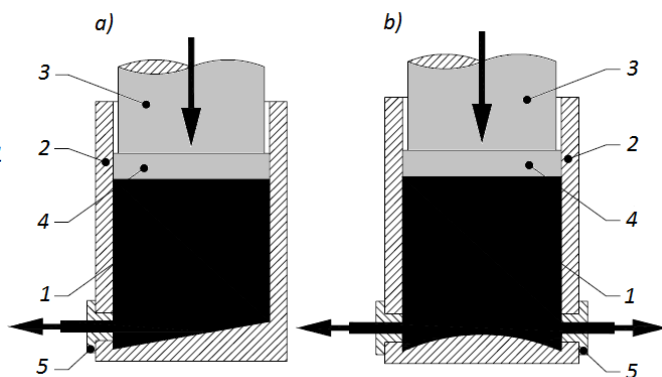
Rys. 9.3. Schemat wyciskania przeciwbieżnego: a) prętów i b) rur; 1 – materiał wyciskany, 2 – pojemnik, 3 – tłoczysko, 4 – przekładka, 5 – matryca, 6 – tuleja pojemnika [100]

chany jest z rycypienta przez otwór w stemplu, a podczas wytwarzania odkuwek drażonych przez otwór utworzony przez rycypient i stempel. Charakterystyczne jest, iż w obu tych procesach materiał płynie w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu stempla, ale zwrot tych ruchów jest przeciwny.

- Wyciskanie mieszane (rys. 9.4), które stanowi połączenie występujących równocześnie, omówionych powyżej, procesów wyciskania współbieżnego i przeciwbieżnego.
- Wyciskanie boczne (promieniowe) – rys. 9.5, w którym kierunek płynięcia materiału jest inny od kierunku przemieszczania stempla. Najczęściej kierunki określające wypływ materiału i ruch stempla są do siebie prostopadłe. Mówimy wówczas o wyciskaniu promieniowym lub poprzecznym. Ten przypadek wyciskania pod względem stanu naprężenia i odkształcenia jest podobny do wyciskania współbieżnego. Jednakże w porównaniu z nim w analizowanym przypadku kształtowania występuje nierównomierność odkształceń, ze względu na brak symetrii osiowej procesu [26, 100].



Rys. 9.4. Schemat wyciskania mieszanego: 1 – materiał wyciskany, 2 – matryca, 3 – tłoczysko [100]



Rys. 9.5. Schemat wyciskania z bocznym wypływem materiału: a) jednokierunkowym, b) dwukierunkowym; 1 – materiał wyciskany, 2 – pojemnik, 3 – tłoczysko, 4 – przetłoczka, 5 – matryca, 6 – tuleja pojemnika [100]

9.2.2. Podział ze względu na temperaturę materiału

Ze względu na temperaturę kształtowanego materiału wyróżnia się metody wyciskania na zimno, na ciepło i na gorąco. W tabelach 9.1 i 9.2 przedstawiono ogólne porównanie wymienionych metod wyciskania (na tle obróbki skrawaniem) pod kątem zużycia materiałów i energii, jak również dokładności wytwarzanych elementów. Natomiast w dalszej części podrozdziału krótko scharakteryzowano poszczególne metody.

Tabela 9.1.

Zużycie materiałów i energii w wybranych procesach obróbki metali [10]

Sposób obróbki	Uzysk, %	Zużycie energii, MJ/kg
Skrawanie	40÷50	80÷100
Wyciskanie na gorąco	75÷80	53÷56
Wyciskanie na ciepło	85	48
Wyciskanie na zimno	85	48

Tabela 9.2.

Dokładność wykonania wyrobów w wybranych procesach obróbki [10]

Sposób obróbki	Osiągana dokładność średnicy (klasa)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Szlifowanie	X	X	X	X	X							
Toczenie		X	X	X	X	X						
Wyciskanie na zimno			X	X	X	X	X	X				
Wyciskanie na ciepło				X	X	X	X	X	X			
Wyciskanie na gorąco							X	X	X	X	X	X

Wyciskanie na zimno

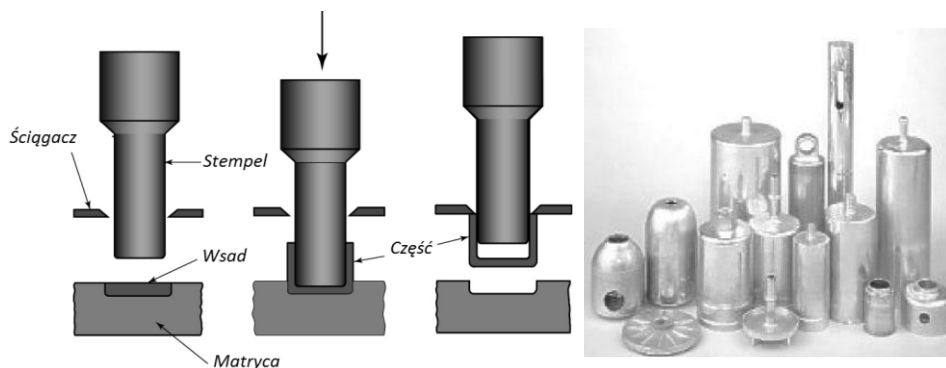
Wyciskanie na zimno wykorzystywane jest przede wszystkim do wykonywania części maszyn na gotowo, charakteryzujących się podwyższonymi własnościami mechanicznymi, dużą dokładnością wymiarowo-kształtową, dobrą jakością i gładkością powierzchni oraz korzystną strukturą.

Do wyciskania na zimno stosuje się następujące materiały:

- ❑ Stale węglowe i niskostopowe zawierające: C < 0,35% dla wyciskania przeciwbieznego i C < 0,6% dla wyciskania współbieżnego; Si 0,15÷0,35%; Mn < 1%; S, P < 0,035÷0,040%; Ni < 1%; Cr < 0,9%; Mo < 0,4% [33].
- ❑ Metale nieżelazne. Aluminium, miedź oraz stopy tych metali były pierwszymi materiałami kształtowanymi metodą wyciskania na zimno. Najlepszą odkształcalność w tej grupie miało czyste aluminium. Maleje ona jednak po stopieniu tego metalu z magnezem (do 2%), miedzią (do 1%) oraz przede wszystkim z krzemem (do 1%). Czysta miedź ma również dobrą odkształcalność, która w przypadku mosiądzów maleje wraz ze wzrostem zawartości cynku (37% Zn jest wartością graniczną dla wyciskania na zimno).

Odmianą wyciskania na zimno jest wyciskanie udarowe (*impact extrusion*), które jest wykorzystywane do wytwarzania wyrobów drażonych, jak puszki na napoje, pojemniki na pastę do zębów itp. Proces ten wymaga zastoso-

wania miękkich materiałów jak: aluminium, ołów, miedź. W procesie tym niewielka ilość materiału umieszczana jest w matrycy i podlega kształtowaniu przez stempel, przymocowany do suwaka szybkiej prasy mechanicznej, w sposób pokazany na rys. 9.6.



Rys. 9.6. Schemat procesu wyciskania udarowego wraz z przykładowymi wyrobami

Wyciskanie na ciepło

Wyciskanie na ciepło (półgorąco) jest realizowane przy podwyższonej temperaturze materiału, mniejszej od temperatury rekrytalizacji. Pozwala to na otrzymywanie wyprasek o niewiele gorszej powierzchni i dokładności, jak w przypadku wyciskania na zimno. Równocześnie dzięki zwiększeniu plastyczności materiału następuje zmniejszenie siły wyciskania, co umożliwia prowadzenie kształtowania przy zwiększonym odkształceniu materiału.

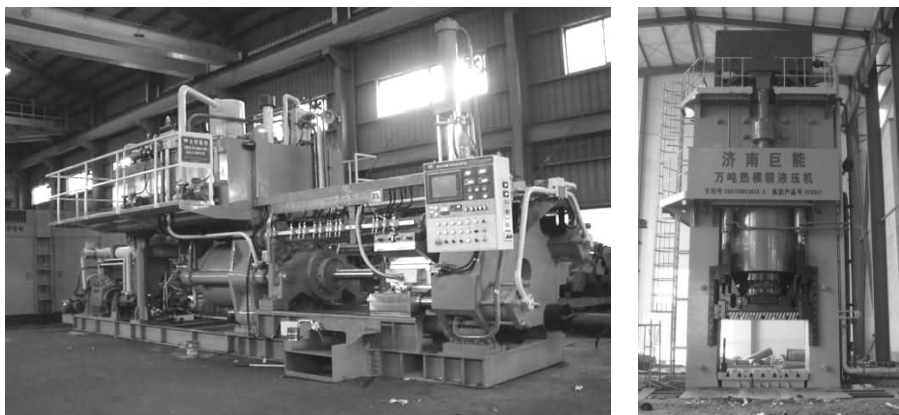
Wyciskanie na gorąco

Wyciskanie na gorąco jest zwykle stosowane do wyciskania hutniczego prętów, rur i kształtowników, poddawanych na późniejszym etapie innym zabiegom lub obróbce wykańczającej. Półwyroby otrzymywane tą metodą charakteryzują gorsze własności mechaniczne oraz jakość powierzchni, a także bardziej licznie niż w procesach wyciskania na zimno wady wyprasek (skrzywienia, pęknięcia). Zakres temperatur stosowanych przy wyciskaniu na gorąco przedstawia się następująco:

- ❑ ołów $20 \div 250$ °C;
- ❑ aluminium i jego stopy $375 \div 475$ °C;
- ❑ miedź i jej stopy $650 \div 975$ °C;
- ❑ stale $875 \div 1300$ °C;
- ❑ stopy ogniotrwałe $975 \div 2200$ °C.

9.2.3. Podział ze względu na zastosowane oprzyrządowanie

Ze względu na rodzaj zastosowanego oprzyrządowania (narzędzia, prasa) wyróżnia się wyciskanie poziome i pionowe. Oba te procesy realizowane są na ogół z wykorzystaniem pras hydraulicznych, z których przykładowe pokazano na rys. 9.7. W przypadku zastosowania prasy poziomej podczas wyciskania praktycznie nie występuje ograniczenie ze względu na długość wyciskanego elementu, ułatwione jest również jego odcinanie od reszty materiału. Maszyny tego typu zajmują jednak znacznie większą powierzchnię.

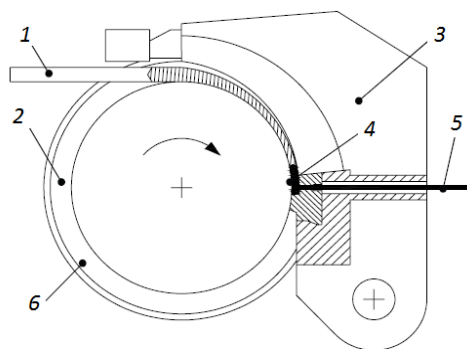


Rys. 9.6. Prasy hydrauliczne stosowane do wyciskania: pozioma (po lewej) oraz pionowa (po prawej)

9.2.4. Specjalne metody wyciskania

Metoda Conform

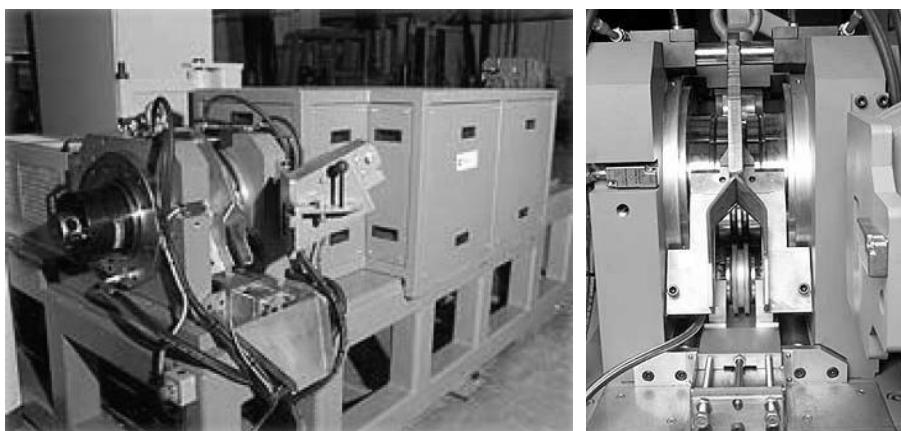
Wyciskanie metodą Conform (rys. 9.8), którego cechą główną jest to, iż ciśnienie na materiał wywierane jest nie przez stempel a przez koło cierne 2, z rowkiem prowadzącym 6. W rowku tym umieszcza się styknie do obracającego się koła materiał wsadowy (kształtownik) 1. Dzięki mimośrodowo zamocowanej szabocie 3 materiał dociskany jest do koła cierne, który powoduje jego przesuw i wyciśnięcie przez matrycę 4. Gotowy produkt 5 wychodzi przez otwór wydrążony w szabocie. Tarcie



Rys. 9.8. Schemat procesu wyciskania metodą Conform: 1 – wsad, 2 – koło cierne, 3 – szabota, 4 – matryca, 5 – element wyciśnięty, 6 – rowek prowadzący

występujące między kołem ciernym i materiałem powoduje rozgrzewanie się metalu i wzrost ciśnienia do wartości pozwalającej na jego przejście przez matrycę.

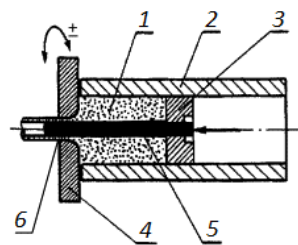
Na kolejnym rys. 9.9 przedstawiono urządzenie do ciągłego wyciskania metodą Conform, które wykorzystywane jest do wykonywania elementów z miedzi i aluminium (wsadem oprócz półwyrobów hutniczych mogą być także granulaty i proszki). Wydajność prezentowanej maszyny waha się od 350 kg/h, przy średnicy wyrobu 12,5 mm do 2040 kg/h, przy średnicy 25 mm. Jej zaletami są szybkość i łatwa wymiana matrycy oraz ekonomiczność wyciskania, prowadzonego nawet przy małej liczbie wytwarzanych elementów.



Rys. 9.9. Widok maszyny do ciągłego wyciskania Conform MC260, firmy Meltech-Confex (Wielka Brytania)

Metoda KOBO

Wyciskanie metodą KOBO, którego nazwa pochodzi od nazwisk pomysłodawców, tj. Korbel i Bochniak, polega na cyklicznej zmianie sposobu odkształcenia metali i stopów poddanych wyciskaniu, która jest osiągana przez cykliczną zmianę schematu ich obciążenia. W praktyce efekt ten jest wywoływany przez wprowadzenie matrycy w trakcie kształtowania w oscylacyjny ruch obrotowy (rys. 9.10). Do zalet metody KOBO należy zaliczyć przede wszystkim: możliwość rozdrobnienia struktury nawet do rozmiarów nanostrukturalnych; możliwość wytwarzania wyrobów o złożonej geometrii,



Rys. 9.10. Schemat wyciskania metodą KOBO: 1 – wsad, 2 – ry-cypient, 3 – stempel, 4 – matryca poruszająca się oscylacyjnie, 5 – trzpień, 6 – oś [7]



Rys. 9.11. Wypraski z miedzi (a), stopu CuP6 (b) stopów aluminium (c) otrzymane wyciskaniem KOBO prowadzonym w temperaturze pokojowej [7]

w tym z materiałów trudnoodkształcalnych (rys. 9.11); redukcję pracy odkształcenia; mniejsze zużycie narzędzi roboczych [6, 7].

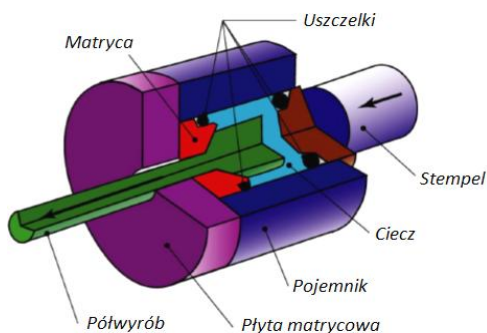
Wyciskanie hydrostatyczne

Wyciskanie hydrostatyczne charakteryzuje się tym, że materiał z rycypienta jest wypychany przez otwór w matrycy nie za pomocą sztywnego stempla, lecz przez będącą pod wysokim ciśnieniem ciecz (rys. 9.12). Oddziela ona materiał od narzędzi powodując zmniejszenie sił tarcia na powierzchni kontaktu, co prowadzi do redukcji sił kształtowania. Ciśnienie cieczy zwiększa się przy pomocy metod statycznych lub dynamicznych. Co ciekawe, ośrodkiem roboczym (wywierającym nacisk na materiał) niekoniecznie musi być ciecz. W jej miejsce można zastosować czynnik gazowy lub metal o małej wytrzymałości na ściskanie.

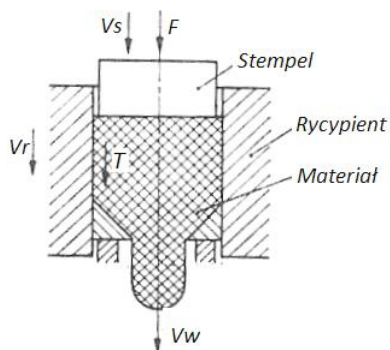
Proces wyciskania hydrostatycznego można prowadzić na standardowych prasach pionowych i poziomych o napędzie hydraulicznym lub mechanicznym. Metodą tą można wytwarzać zarówno odkuwki proste jak i o kształtach złożonych.

Proces wyciskania hydrostatycznego można podzielić stosując różne kryteria, takie jak: stan skupienia czynnika roboczego, prędkość odkształcania, stosunek nacisków bocznych i czołowych. Najpopularniejszy podział dotyczy stanu skupienia czynnika roboczego i z tego względu wyróżnia się następujące sposoby wyciskania hydrostatycznego (na gorąco):

- ❑ gazowostatyczne, w którym czynnik roboczy stanowi gaz o wysokim ciśnieniu;
- ❑ właściwe, gdzie stosowany jest czynnik roboczy o podwyższonej lepkości w stanie płynnym lub półpłynnym;



Rys. 9.12. Schemat procesu wyciskania hydrostatycznego



Rys. 9.13. Schemat wyciskania z tarcie aktywnym, gdzie: v_s – prędkość stempla, v_r – prędkość rycypienta, v_w – prędkość wypraski, T – siła tarcia, F – siła wyciskania

- ❑ pseudopłynnymi czynnikami, czyli za pomocą proszków i materiałów o małej wytrzymałości na ściskanie;
- ❑ w twardych osłonach metalicznych i niemetalicznych.

Wyciskanie z tarcie aktywnym

Wyciskanie z tarcie aktywnym polega na tym, że przemieszczają się równocześnie stempel i rycypient, ale z określoną prędkością. W procesie tym (rys. 9.13) na bocznych ściankach rycypienta powstaje tzw. tarcie aktywne, które wspomaga płynięcie materiału, ponieważ zwrot wektora siły tarcia T jest zgodny z kierunkiem wyciskania. W efekcie takiego oddziaływania tarcia następuje zmniejszenie siły wyciskania F .

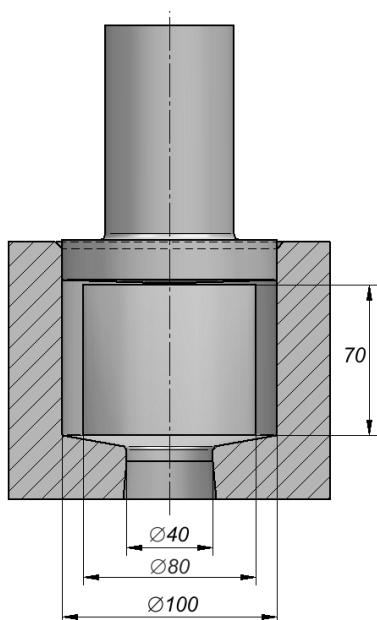
9.3. Charakterystyka procesu wyciskania

9.3.1. Stan naprężenia i odkształcenia

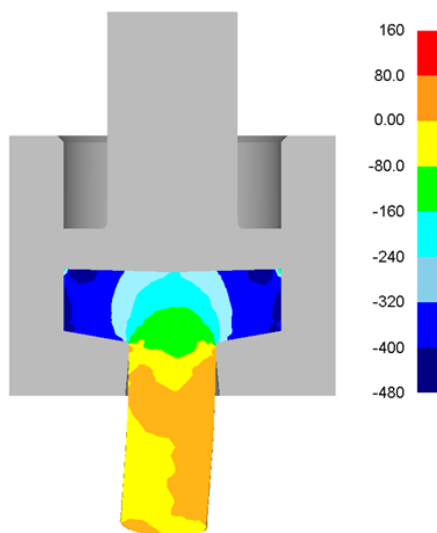
Celem scharakteryzowania procesu wyciskania w zakresie stanu naprężenia i odkształcenia skorzystano z możliwości stwarzanych przez modelowanie numeryczne. Mianowicie, stosując MES wykonano symulacje trzech sposobów wyciskania, tj. współbieżnego, przeciwbieżnego i z tarcie aktywnym. Dane do obliczeń przyjęto następująco:

- ❑ materiał – aluminium w gatunku AW-Al99,0Cu, dla którego $R_m \sim 140$ MPa;
- ❑ temperatura wsadu i narzędzi 20°C ;
- ❑ prędkość przemieszczania stempla 10 mm/s;
- ❑ współczynnik tarcia $0,1$ (model tarcia Culomba);
- ❑ współczynnik wymiany ciepła 20 kW/m²K;
- ❑ geometria procesu dla wyciskania przeciwbieżnego zgodnie z rys. 9.14 (w pozostałych rozważanych przypadkach zastosowano identyczne wymiary wsadu, pojemnika oraz średnicę wyrobu).

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że w procesie wyciskania w materiale występuje trójosiowy stan naprężenia. Przy czym część materiału znajdująca się w pojemniku podlega na ogół wszechstronnemu ścisaniu. Świadczy o tym przedstawiony na rys. 9.15 rozkład naprężeń średnich. Pod wpływem oddziaływania stempla materiał przemieszcza się w kierunku otworu w matrycy.



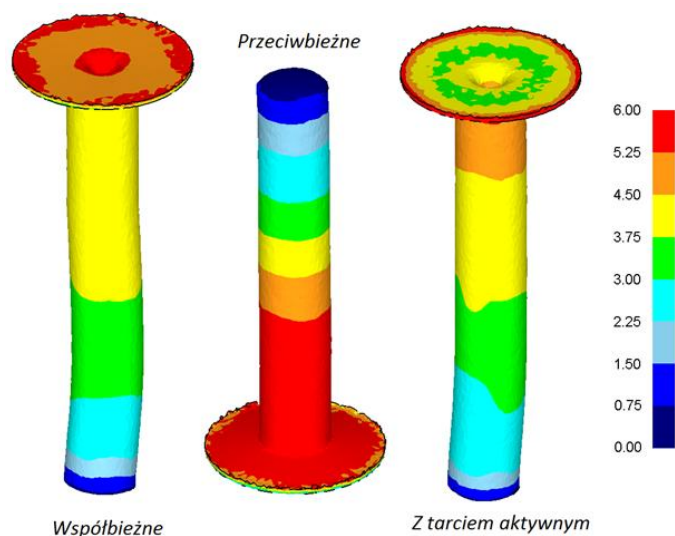
Rys. 9.14. Model geometryczny procesu wyciskania współbieżnego wykorzystany w analizie numerycznej



Rys. 9.15. Rozkład naprężenia średniego (w MPa) w przekroju osiowym wypraski otrzymanej w procesie wyciskania współbieżnego

Największe naprężenia występują w narożach pojemnika, gdzie zalegający materiał tworzy tzw. strefy martwe. Wyciśnięcie materiału z tych stref jest utrudnione i wymaga zwiększenia siły wyciskania. W części wyciśniętej (wyprasce) powstają natomiast naprężenia rozciągające wynikające z faktu, iż płynięcie materiału przebiega swobodnie w strefie osiowej, natomiast w obszarach przypowierzchniowych jest ono hamowane przez siły tarcia występujące na powierzchni styku.

Na kolejnym rys. 9.16 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia w wypraskach otrzymanych różnymi sposobami wyciskania. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że odkształcenia układają się warstwowo. Są one najmniejsze na początku wyciśniętego elementu i stopniowo zwiększają się ku jego końcowi. Taki rozkład odkształceń jest odbiciem zastosowanego schematu obciążeń (efekt oddziaływania sił tarcia) oraz geometrii procesu (najpierw następuje spęczenie wstępniaka, a następnie wyciśnięcie wypraski). Odnośnie wpływu zastosowanego sposobu wyciskania na rozkład odkształceń należy podać, iż są one najbardziej zróżnicowane w procesie wyciskania przeciwbieżnego, a najmniej podczas wyciskania z tarciem aktywnym.



Rys. 9.16. Rozkład intensywności odkształcenia w wypraskach uzyskanych różnymi sposobami wyciskania

9.3.2. Wpływ wybranych czynników procesu wyciskania na jego przebieg

Na przebieg procesu wyciskania wpływa szereg czynników, do których zalicza się: własności materiału kształtowanego, stopień przerobu plastycznego, długość wsadu, prędkość kształtowania, temperaturę, smarowanie (omówione w rozdziale 9.5), geometrię zastosowanego oprzyrządowania i inne.

Własności wyciskanego materiału wynikają z jego składu chemicznego i struktury. Najczęściej metodą wyciskania wykonywane są elementy z żelaza, miedzi, aluminium oraz ze stopów tych metali. Dokładne określenie własności materiału poddanego wyciskaniu wymaga przeprowadzenia badań plastometrycznych, w trakcie których wyznaczane jest naprężenie uplastyczniające (na ogół w zależności od odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury).

Stopień przerobu plastycznego określa zaistniałe w procesie wyciskania zmiany wymiarów materiału. Podstawową miarą w tym zakresie jest odkształcenie logarytmiczne ε , które oblicza się na podstawie zależności:

$$\varepsilon = \ln \frac{S_0}{S_1}, \quad (9.1)$$

gdzie: S_0 – powierzchnia przekroju poprzecznego wsadu, S_1 – powierzchnia przekroju poprzecznego wyrobu (wypraski).

Innym parametrem stosowanym do określenia przerobu plastycznego materiału w procesie wyciskania jest współczynnik wydłużenia λ , definiowany jako:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0}, \quad (9.2)$$

gdzie: l_0 – długość wsadu, l_1 – długość wyciśniętej wypraski.

Procesy wyciskania wykonuje się na ogół ze współczynnikiem wydłużenia wynoszącym około 50. Możliwe jest jednak prowadzenie procesu nawet przy sześciokrotnie większej wartości tego parametru.

Długość wsadu (najczęściej cylindrycznego) określa się stosunkiem jego długości do wymiaru przekroju poprzecznego (średnicy). Ze względu na fakt, iż w części początkowej wyciśniętego elementu materiał jest mało odkształcony i, że jego odkształcenie wzrasta wraz z długością (rys. 9.16) w procesach wyciskania zwykle stosuje się wsady, dla których podany stosunek zawiera się w przedziale 1,5÷3. Takie rozwiązanie pozwala na minimalizację zróżnicowania wielkości odkształcenia na długości wytworzonego elementu. Należy również pamiętać o tym, że w przypadku wyciskania współbieżnego zwiększenie długości wsadu powoduje wzrost sił tarcia występujących na powierzchniach bocznych materiału, co prowadzi do zwiększenia siły wyciskania.

Prędkość kształtowania. W procesie wyciskania można wyróżnić prędkość wypływu materiału z matrycy, prędkość kształtowania (prędkość przemieszczania stempla) i prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon}$. Dla uzyskania w wyrobie możliwie jednorodnej struktury i jednakowych własności mechanicznych proces wyciskania należy prowadzić w taki sposób by materiał był kształtowany przy jak najbardziej zbliżonych do siebie wartościach $\dot{\epsilon}$. Wymaga to stosowania sterowania prędkością stempla, która powinna być największa w początkowej fazie wyciskania, a następnie powinna się zmniejszać wraz z zaawansowaniem procesu.

Temperatura kształtowania. Optymalną temperaturę wyciskania określa się na podstawie bilansu cieplnego procesu, uwzględniającego ciepło:

- dostarczone przez materiał wsadowy;
- dostarczone w wyniku zamiany pracy tarcia i pracy odkształcenia plastycznego;
- odprowadzone do narzędzi (pojemnika, stempla, matrycy) i otoczenia.

Ustalone w ten sposób zakresy temperatury wyciskania na gorąco różnych materiałów podano w rozdziale 9.2.2.

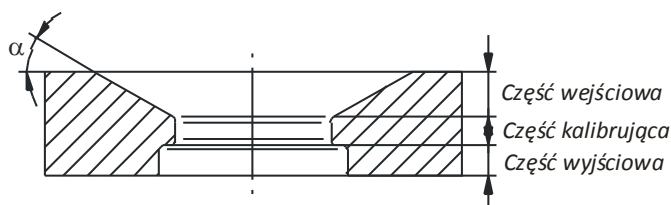
Geometria oprzyrządowania. Bardzo ważne dla właściwego przebiegu wyciskania jest dobranie odpowiedniego kształtu matrycy i stempla. W klasycznej matrycy wykorzystywanej w tym procesie wyróżnia się części (rys. 9.17):

- wejściową, w której następuje redukcja przekroju poprzecznego materiału;

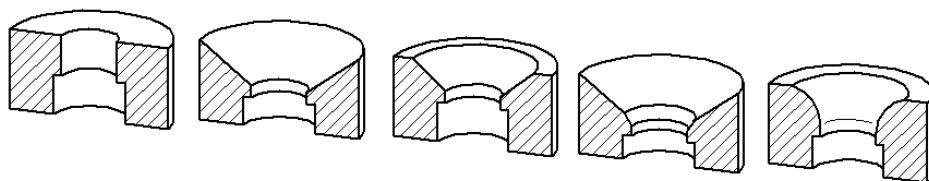
- ❑ kalibrującą, gdzie ma miejsce ostateczne ukształtowanie przekroju poprzecznego wypraski;
- ❑ wyjściową.

Matryce do wyciskania mogą mieć jeden lub więcej otworów, gdy równocześnie wykonuje się kilka elementów. Narzędzia wielootworowe stosowane są do wyciskania wyrobów mających mały przekrój poprzeczny.

W zależności od zastosowanego kształtu części wejściowej można wyróżnić następujące rodzaje matryc (rys. 9.18): płaskie, stożkowe, płasko-stożkowe, podwójnie stożkowe i łukowe.

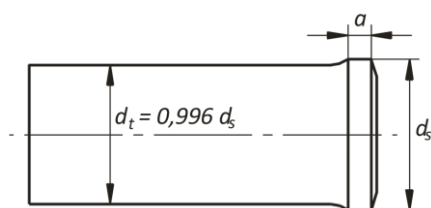


Rys. 9.17. Schemat matrycy wykorzystywanej w procesach wyciskania współbieżnego



Rys. 9.18. Rodzaje matryc do wyciskania współbieżnego (kolejno od lewej): płaska, stożkowa, płasko-stożkowa, podwójnie stożkowa, łukowa

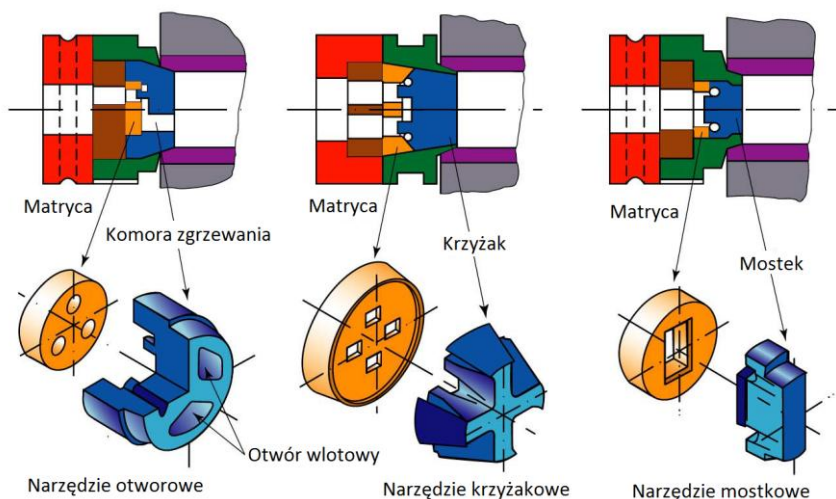
W procesie wyciskania współbieżnego wykorzystuje się przekładki (rys. 9.2), które oddzielają materiał od tłoczyska. Mają one średnicę mniejszą o 1÷2 mm od średnicy pojemnika, a ich powierzchnia robocza może być płaska, wypukła lub wklęsła (zapewnia najlepszą równomierność płynięcia materiału).



Rys. 9.19. Kształt stempla stosowanego w procesie wyciskania przeciwbieżnego na zimno

Na rys. 9.19 przedstawiono stempel wykorzystywany do wyciskania przeciwbieżnego. Szczególnie istotne w tym przypadku jest właściwe dobranie długości części cylindrycznej a . Powinna ona gwarantować uzyskanie kształtu otworu w wyprasce o założonej do uzyskania jakości, przy możliwie najmniejszej sile wyciskania.

W przypadku wytwarzania na gorąco kształtowników pustych (zamkniętych) o złożonym kształcie wykorzystuje się matryce mostkowo-komorowe (rys. 9.20). Podczas wyciskania przebiegającego w tych narzędziach (zwanym wyciskaniem zgrzewającym) materiał rozcinany jest na grzbiecie mostka matrycy, a utworzone w ten sposób strugi metalu przemieszczają się przez kanały wlotowe do komory zgrzewania, gdzie ulegają połączeniu. Uzyskane w ten sposób kształtowniki puste (zamknięte) mają charakterystyczne zgrzeiny wzdłużne, których ilość wynika z konstrukcji zastosowanej matrycy [36, 37].

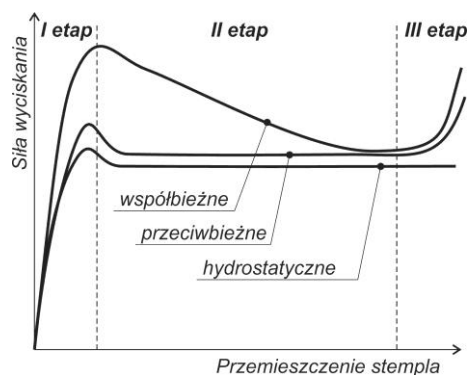


Rys. 9.20. Matryce mostkowo-komorowe wykorzystywane w procesach wyciskania na gorąco kształtowników pustych (zamkniętych), na podstawie [36]

9.4. Siła wyciskania

Siła wyciskania jest parametrem decydującym o konstrukcji oprzyrządowania oraz o doborze materiałów na poszczególne narzędzia. Stanowi ona także podstawę do dobrania odpowiedniej maszyny (prasy) zapewniającej właściwą realizację procesu. Na rys. 9.21 przedstawiono zależność siły wyciskania F od drogi stempla w procesach wyciskania współbieżnego, przeciwbieżnego i hydrostatycznego.

Na początku procesu (etap I) siła F zwiększa się do wartości maksymalnej, która jest największa w procesie wyciskania współbieżnego, a najmniejsza podczas wyciskania hydrostatycznego. W tej fazie procesu następuje spęczenie wsadu (jego średnica jest mniejsza od średnicy pojemnika), które zachodzi do momentu całkowitego wypełnienia pojemnika przez materiał.



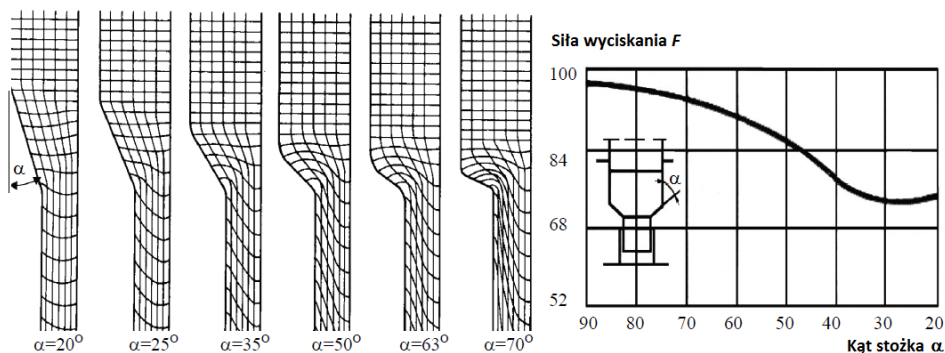
Rys. 9.21. Schematyczny przebieg siły w procesach wyciskania współbieżnego, przeciwbieżnego i hydrostatycznego (opis w tekście)

W kolejnej fazie procesu (etap II) ma miejsce ustalony wypływ materiału z matrycy. Siła wyciskania na tym etapie ma stałą wartość w przypadku wyciskania przeciwbieżnego i hydrostatycznego, albo zmniejsza się (wskutek skrócenia długości wsadu prowadzącego do redukcji sił tarcia) podczas wyciskania współbieżnego. Ten etap procesu zwany jest także wyciskaniem laminarnym.

W końcowej fazie wyciskania (etap III) następuje nagły wzrost siły F , co jest związane z małą wysokością materiału znajdującego się w pojem-

niku. Dochodzi wówczas do płynięcia materiału, który zalegał w strefach martwych, co wymaga zwiększenia sił kształtowania. W tej fazie procesu w elemencie wyciskany może zostać ukształtowany charakterystyczny wciąg (w postaci leja czołowego), dobrze widoczny na rys. 9.16.

Wielkość siły wyciskania zależy od wielu parametrów, takich jak: rodzaj kształtowanego materiału, temperatura wyciskania, prędkość przemieszczania stempla, rodzaj smaru, geometria narzędzi. Przykładowo podczas wyciskania współbieżnego duży wpływ na siłę F ma kąt stożka matrycy α . Wyniki prac badawczych wykonanych w tym zakresie wykazały, iż zmniejszenie kąta α najpierw prowadzi do spadku siły F , a następnie do jej wzrostu – rys. 9.22. Na ogół optymalny kąt stożka matrycy (w zależności od pozostałych parametrów procesu) zawiera się w przedziale $45 \div 30^\circ$.

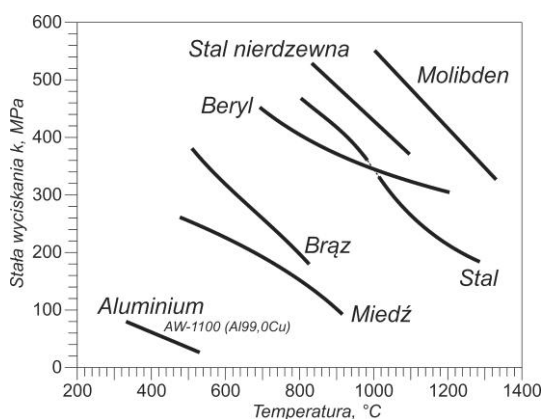


Rys. 9.22. Wpływ kąta stożka matrycy α na płynięcie materiału (zniekształcenie siatki modelowej) oraz maksymalną siłę w procesie wyciskania współbieżnego [100]

Oszacowania wartości siły wyciskania F można dokonać korzystając z następującej zależności:

$$F = S_0 k \ln \frac{S_0}{S_1}, \quad (9.3)$$

w której S_0 i S_1 oznaczają odpowiednio pole przekroju poprzecznego wsadu i wypraski, zaś k jest stałą wyciskania, której wartość można dobrać korzystając z wykresu przedstawionego na rys. 9.23.

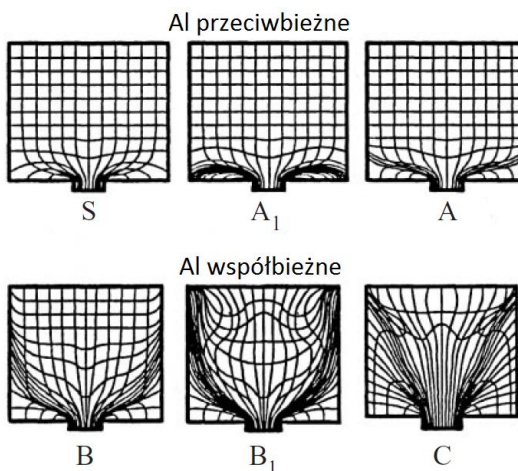


Rys. 9.23. Zależność stałej wyciskania k od temperatury procesu [20]

9.5. Tarcie i smarowanie w procesie wyciskania

Tarcie wywiera duży wpływ na przebieg procesu wyciskania. Powoduje ono występowanie na powierzchni kontaktu naprężeń stycznych, które zmieniają schemat stanu naprężenia, powodują nierównomierność odkształcenia i wzrost siły wyciskania. Tarcie działa hamująco na płynięcie materiału w warstwach przypowierzchniowych i dlatego w wypraskach wyciśniętych w procesie bez smarowania występują zagięcia poprzecznych linii siatki modelowej (rys. 9.24). Oprócz tego tarcie zwiększa w sposób znaczący zużycie narzędzi.

W celu zmniejszenia tarcia stosuje się smarowanie narzędzi lub wsadu. Ważne jest by smar miał wystarczającą lepkość w temperaturze obróbki i by tworzył ciekłą, ciągłą warstwę odporną na działanie wysokiego ciśnienia występującego w rycpiencie. Smar



Rys. 9.24. Zniekształcenia siatek naniesionych na przekrojach poprzecznych wyprasek, otrzymane w procesach wyciskania, przy: A – braku tarcia materiał-pojemnik, B – występującym tarcie materiał-pojemnik, S – smarowaniu szkłem wodnym, C – temperaturze pojemnika mniejszej od temperatury wsadu, A₁, B₁ – dane dla aluminium [49]

nie powinien zawierać składników oddziałujących negatywnie na kształtowany materiał oraz powinien mieć jak najmniejszy współczynnik tarcia. Ponadto, powinien on posiadać dobre własności izolujące, tak by zapobiegać spadkowi temperatury nagrzanego materiału wsadu, a równocześnie chronić powierzchnie robocze narzędzi przed nadmiernym nagrzewaniem.

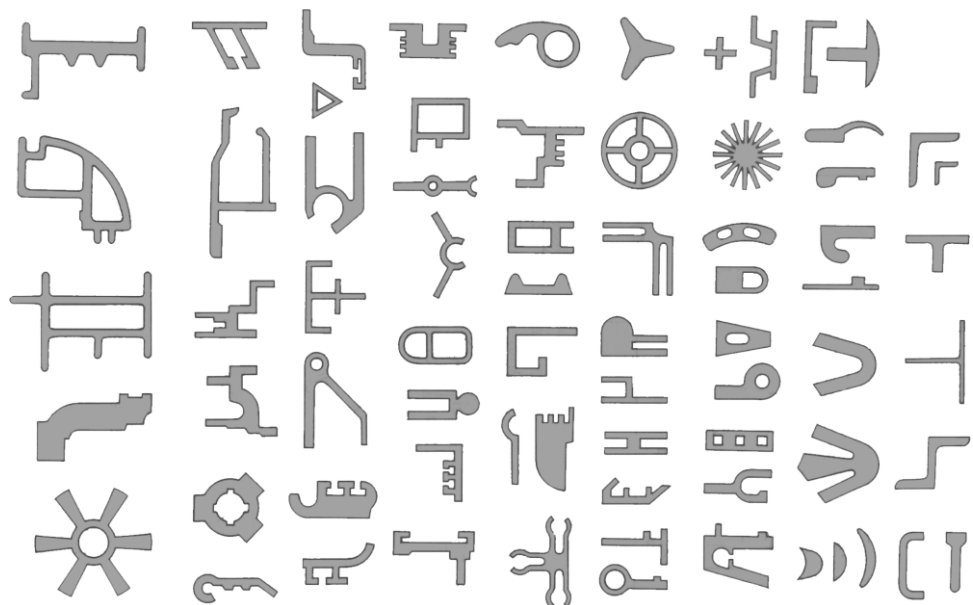
Najczęściej podczas wyciskania stali na gorąco wykorzystuje się środek smarujący w postaci mieszaniny grafitu płytkowego i oleju roślinnego. Tego rodzaju środki mają mały współczynnik tarcia, jednak odznaczają się dobrym przewodnictwem cieplnym. Dlatego też nie mogą być one stosowane przy wyciskaniu wyrobów długich. Dodatkowym mankamentem jest przylepianie się do tych smarów odpadającej zgorzeli, którą trudno jest usunąć za pomocą sprężonego powietrza wykorzystywanego do przedmuchiwania matryc. W przypadku, gdy dojdzie do spalenia oleju wydzielają się także duże ilości przykrych dla pracowników obsługi zapachów. Z podanych powodów obecnie na popularności zyskują inne środki smarujące, np. szkło (w postaci płótna, waty, proszku) lub mieszaniny szkła wodnego z grafitem, które są wolne od wyżej wymienionych wad.

Szkło odznacza się małym przewodnictwem cieplnym, a po naniesieniu na powierzchnię nagrzanego materiału przykleja się do niego i stanowi warstwę ochronną, rozdzielającą materiał i narzędzia. Przy dobrze dobranej lepkości oraz własnościach smarujących w określonych warunkach wyciskania czyste szkło (ewentualnie szkło wodne w połączeniu z grafitem) stanowi bardzo dobry środek smarujący.

Podczas wyciskania na zimno stali bardzo dobre rezultaty przynosi fosforowanie powierzchni stopu i następujące po nim zanurzenie w emulsji mydlanej. Zastosowanie tego rozwiązania powoduje, że siła wyciskania zmniejsza się o 20% w stosunku do materiału pokrytego warstwą miedzi, o 50% w stosunku do procesu przebiegającego z wykorzystaniem oleju maszynowego, jako środka smarnego i o 65% w porównaniu do wyciskania bez użycia smaru. Z kolei podczas wyciskania na zimno elementów ze stopów miedzi oraz stopów aluminium dobre rezultaty daje stosowanie jako środka smarnego pasty zawierającej olej maszynowy i sproszkowany grafit, wymieszanej w stosunku 1:3.

9.6. Kształtowane odkuwki

Oprócz wyciskania hutniczego, w którym wytwarzane są różnego rodzaju kształtowniki pełne i puste (rys. 9.25) omawiana metoda kształtowania metali i stopów znalazła zastosowanie w kuźnictwie w produkcji odkuwek.

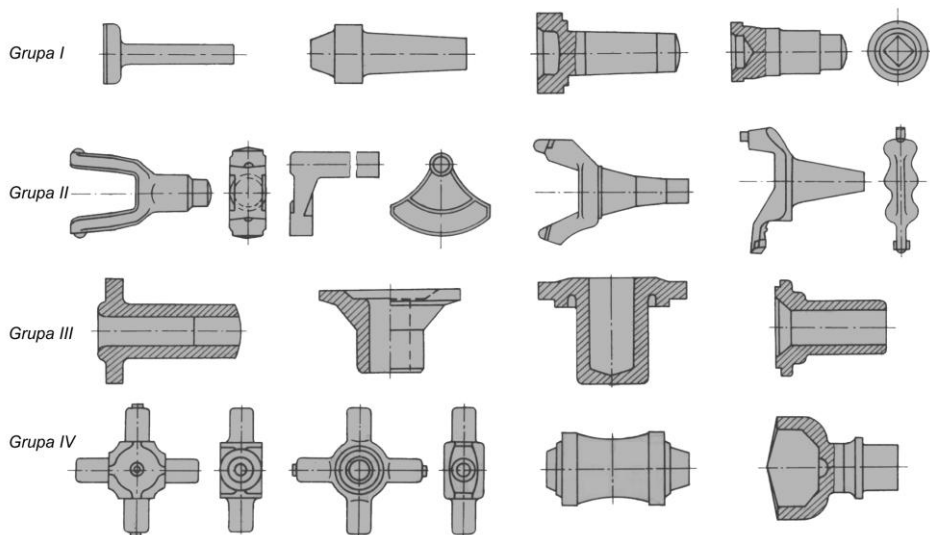


Rys. 9.25. Asortyment kształtowników pełnych i pustych (zamkniętych) wykonywanych metodą wyciskania [95]

9.6.1. Podział odkuwek na grupy

Asortyment odkuwek wyciskanych na gorąco w zależności od ich kształtu dzieli się na scharakteryzowane poniżej grupy (rys. 9.26):

- ❑ **Grupa I** obejmuje odkuwki trzonowe mające pojedyncze zgrubienie na końcu lub w części środkowej. W wyrobach zaliczanych do tej grupy wyróżnia się dwie zasadnicze części tj. trzon oraz zgrubienie, które mogą mieć zupełnie inny kształt. Przykładowo, trzon może być cylindryczny, stożkowy, a nawet może mieć odsadzenia. Natomiast zgrubienie wykonywane na ogół jako cylindryczne, stożkowe lub sferyczne może być gładkie lub posiadać wgłębienia. Odkuwki z tej grupy wykonuje się zwykle wyciskaniem współbieżnym (czasami dla ukształtowania zgrubienia o bardziej złożonej geometrii stosuje się dodatkowo operacje matrycowania).
- ❑ **Grupa II** odnosi się do odkuwek o kształcie złożonym, które mają na końcu rozwidlenie lub niesymetryczne zgrubienie oraz jednostronny trzon o dowolnym kształcie. W operacji wyciskania współbieżnego otrzymywany jest trzon odkuwki, natomiast zgrubienie kształtowane jest podczas kucia w matrycach dzielonych.
- ❑ **Grupa III** zawiera odkuwki mające otwory przelotowe bądź nieprzelotowe, na ogół z kołnierzami. Ponadto, obejmuje ona także odkuwki rozwidlone z otworami przelotowymi. Części tulejowe odkuwek wykonuje się metodą



Rys. 9.26. Klasyfikacja odlewów wykonywanych metodą wyciskania na gorąco [95]

wyciskania. Natomiast kołnierze, czy rozwidlenia otrzymuje się w matrycy podczas wyciskania, bądź w dodatkowej operacji kucia matrycowego.

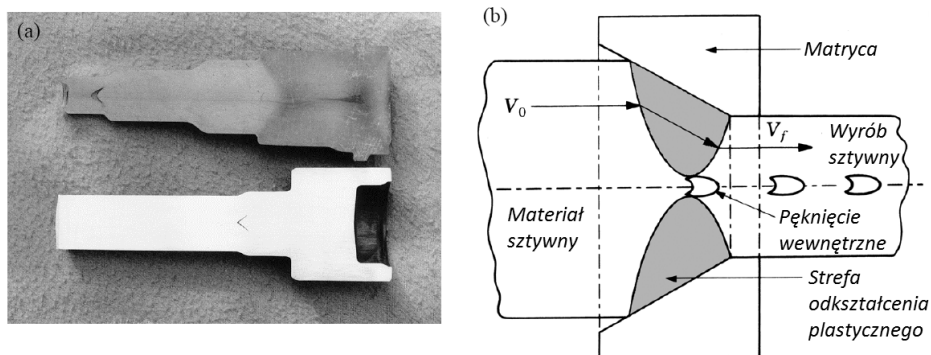
- ❑ **Grupa IV** obejmuje odlewki o bardzo złożonym kształcie mające: dwa lub więcej zgrubienia, występy boczne, jednostronne wgłębienia, rozwidlenia itp. Wykonanie tego rodzaju odlewów wymaga stosowania specjalnych matryc dzielonych.

9.6.2. Wady wyrobów wyciskanych

Podczas wyciskania mogą wystąpić zakłócenia stabilności kształtowania, w efekcie których otrzymana odlewka (wypraska) jest wadliwa i często nie nadaje się do wykorzystania. Do najczęstszych wad wyrobów wyciskanych zalicza się:

- ❑ Rozwarstwienia, które spowodowane są zbyt wysoką temperaturą kształtowania powodującą nadtapianie materiału, doprowadzające następnie do jego pęknięcia.
- ❑ Pęknięcia zewnętrzne wywołane zbyt dużą szorstkością powierzchni narzędzi zastosowanych w procesie wyciskania.
- ❑ Niejednorodność odkształcenia, będąca następstwem występowania strefy martwej, w której materiał nie ulega odkształceniu.
- ❑ Zmiany własności i struktury (np. rozrost ziaren) wynikające z niejednorodnego płynięcia materiału.
- ❑ Pęknięcia wewnętrzne (tzw. pęknięcia Chevrona), będące skutkiem zbyt dużego zróżnicowania prędkości płynięcia materiału wypływającego z ma-

trycy, odpowiednio w jego osi oraz w warstwie przypowierzchniowej. Tendencja do powstawania tych pęknięć wzrasta, gdy strefy odkształceń plastycznych powstałych w wyniku oddziaływania matrycy nie stykają się ze sobą (rys. 9.27). Wzrost wielkości strefy plastycznej można uzyskać przez zmniejszenie kąta zbieżności matrycy i/lub przez zwiększenie redukcji przekroju poprzecznego.



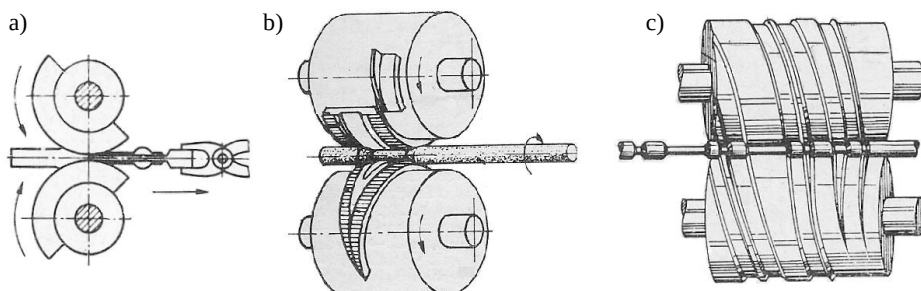
Rys. 9.27. Pęknięcia Chevona w odkuwkach wyciskanych (a) oraz schematycznie przedstawiony rozkład stref sztywnych i plastycznych w wyrobie wyciskanym (b) [1]

10. Walcowanie kuźnicze

Walcowanie, szeroko stosowane w hutnictwie, jest również coraz częściej wykorzystywane w przemyśle kuźniczym do kształtowania przedkuwek oraz odkuwek typu stopniowanych osi i wałów. Technika walcowania kuźniczego, leżąca na pograniczu walcowania hutniczego i kuźnictwa, jest obszernie opisana w książce [39].

Procesy walcowania kuźniczego na ogół realizowane są w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Ze względu na rodzaj ruchu, kształt i ustawienie walców można wyodrębnić następujące metody walcowania (rys. 10.1):

- ❑ wzdłużne (rys. 10.1a), w którym: materiał wykonuje ruch postępowy, walce ustawione wzajemnie równolegle obracają się w kierunku przeciwnym, punkty styczności walców z materiałem walcowanym przemieszczają się w kierunku długości materiału walcowanego;
- ❑ poprzeczne (rys. 10.1b), w którym: materiał wykonuje ruch obrotowy, walce ustawione równolegle obracają się w jednakowym kierunku, a punkty styczności przemieszczają się po obwodzie materiału w płaszczyźnie prostopadłej do jego osi;
- ❑ skośne (rys. 10.1c), w którym materiał wykonuje ruch postępowo-obrotowy, walce ustawione skośnie względem siebie obracają się w tym samym kierunku, punkty styczności walców z materiałem przemieszczają się wzdłuż.



Rys. 10.1. Metody walcowania kuźniczego: a) wzdłużne, b) poprzeczne, c) skośne

10.1. Walcowanie wzdłużne

10.1.1. Parametry charakteryzujące walcowanie wzdłużne

Najprostszym przypadkiem walcowania wzdłużnego jest kształtowanie na walcach gładkich (beczce) pasma o przekroju prostokątnym – rys. 10.2. W wyniku sił tarcia działających między metalem a narzędziami pasmo jest wciągane między walce i odkształcane. W efekcie oddziaływania walców na pasmo (w obszarze ograniczonym przekrojami A-A i B-B – rys. 10.2) jego wysokość zmniejsza się z h_0 do h_1 . Równocześnie zwiększa się długość i szerokość pasma, odpowiednio od wartości l_0 i b_0 do l_1 i b_1 . Miary odkształcenia plastycznego, stosowane w procesie walcowania wzdłużnego, to:

- gniot bezwzględny

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (10.1)$$

- poszerzenie bezwzględne

$$\Delta b = b_0 - b_1, \quad (10.2)$$

- wydłużenie bezwzględne

$$\Delta l = l_0 - l_1, \quad (10.3)$$

- gniot względny

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0}, \quad (10.4)$$

- poszerzenie względne

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} = \frac{b_0 - b_1}{b_0}, \quad (10.5)$$

- wydłużenie względne

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l_1}{l_0}, \quad (10.6)$$

- współczynnik gniotu

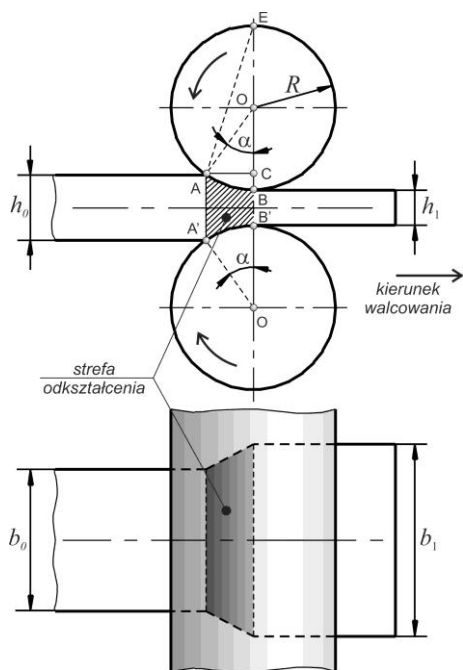
$$\gamma = \frac{h_1}{h_0}, \quad (10.7)$$

- współczynnik poszerzenia

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}, \quad (10.8)$$

- współczynnik wydłużenia

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{S_0}{S_1}, \quad (10.9)$$



Rys. 10.2. Strefa odkształcenia w procesie walcowania wzdłużnego

gdzie: S_0 – pole przekroju poprzecznego wsadu, S_1 – pole przekroju poprzecznego pasma po walcowaniu.

W przypadku, gdy proces walcowania realizowany jest w kilku przepustach, to całkowity współczynnik wydłużenia λ_c równy jest iloczynowi współczynników wydłużenia $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ w poszczególnych przepustach:

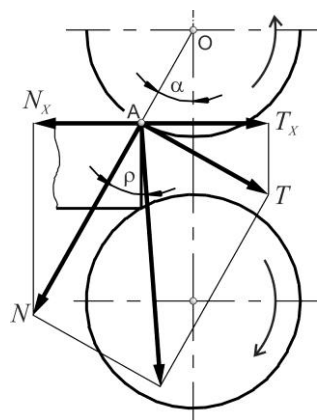
$$\lambda_c = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n, \quad (10.10)$$

gdzie: n – liczba przepustów.

Warunek chwytu metalu przez walce

Chwycenie metalu przez walce zachodzi dzięki siłom tarcia występującym na powierzchni styku materiał-narzędzie. Rozkład sił działających w procesie walcowania w chwili chwytu pokazano na rys. 10.3. Warunkiem chwytu jest, by składowa pozioma T_x siły tarcia T była większa od składowej poziomej N_x siły normalnej N . Po uwzględnieniu zależności trygonometrycznych warunek ten można zapisać jako:

$$T \cos \alpha > N \sin \alpha, \quad (10.11)$$



Rys. 10.3. Siły przyłożone do metalu w chwili chwytu

gdzie: α – kąt chwytu, tworzony przez promień walca przechodzący przez punkt, w którym następuje pierwsze zetknięcie metalu z walcem oraz prostą pionową łączącą oba środki walców – rys. 10.3. Siła tarcia T na podstawie prawa Coulomba – Amontonsa może być określona jako:

$$T = N \mu = N \operatorname{tg} \rho, \quad (10.12)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia, ρ – kąt tarcia ($\mu = \operatorname{tg} \rho$). Podstawiając zależność (10.12) do nierówności (10.11) po przekształceniach ostatecznie otrzymuje się, że

$$\operatorname{tg} \rho > \operatorname{tg} \alpha \quad \text{lub} \quad \rho > \alpha. \quad (10.13)$$

Z powyższej zależności wynika, że chwytanie i wciąganie metalu między walce zachodzi wtedy, gdy kąt chwytu jest mniejszy od kąta tarcia.

10.1.2. Zjawiska zachodzące w strefie walcowania

Proces walcowania zależy od wielu parametrów, jednakże za najważniejszy z nich uznaje się wydłużenie, od którego głównie zależy intensywność kształtowania metalu. Przy danym gniocie wydłużenie jest tym większe im mniejsze jest poszerzenie i na odwrót. Z tego względu w procesie walcowania wzdłużnego dąży się do minimalizowania wartości poszerzenia.

Wartość poszerzenia można ograniczyć przez:

- ❑ zmniejszenie: średnicy walców, współczynnika tarcia;
- ❑ zwiększenie: prędkości walcowania, temperatury kształtowania, stosunku szerokości pasma do jego wysokości, liczby przepustów.

Wartość poszerzenia w procesie walcowania wzdłużnego można oszacować stosując np. wzór Siebla [94]:

$$\Delta b = b_1 - b_0 = a \frac{\Delta h}{h_0 \sqrt{R_{cz} \Delta h}}, \quad (10.14)$$

gdzie: $a = 0,35 \div 0,45$ (mniejszą wartość a należy przyjmować dla temperatury walcowania ponad 1000 °C), R_{cz} – promień czynny walca, Δh – gniot bezwzględny. Jednakże znacznie lepsze rezultaty daje zastosowanie metod modelowania numerycznego, pozwalających na pełne uwzględnienie parametrów danego przypadku walcowania. Przykładowe zmiany szerokości pasma w trakcie walcowania, obliczone MES pokazano na rys. 10.4.

W procesie walcowania wzdłużnego metal wchodzący w strefę odkształcenia ma prędkość mniejszą od prędkości obwodowej walców. Natomiast prędkość metalu wychodzącego z tej strefy jest większa od prędkości obwodowej walców. Istnieje zatem takie miejsce na powierzchni styku walców z kształtowanym metalem, nazwane punktem podziału, w którym prędkość liniowa walców równa jest prędkości przepływu metalu – rys. 10.4.

Zwiększenie prędkości wyjściowej metalu w stosunku do prędkości obwodowej walców v_w nazywa się wyprzedzeniem. Natomiast występowanie mniejszych prędkości metalu od strony wejściowej określa się mianem opóźnienia. Do liczbowego określenia tych zjawisk wykorzystuje się zależności na:

- ❑ wyprzedzenie względne s_w :

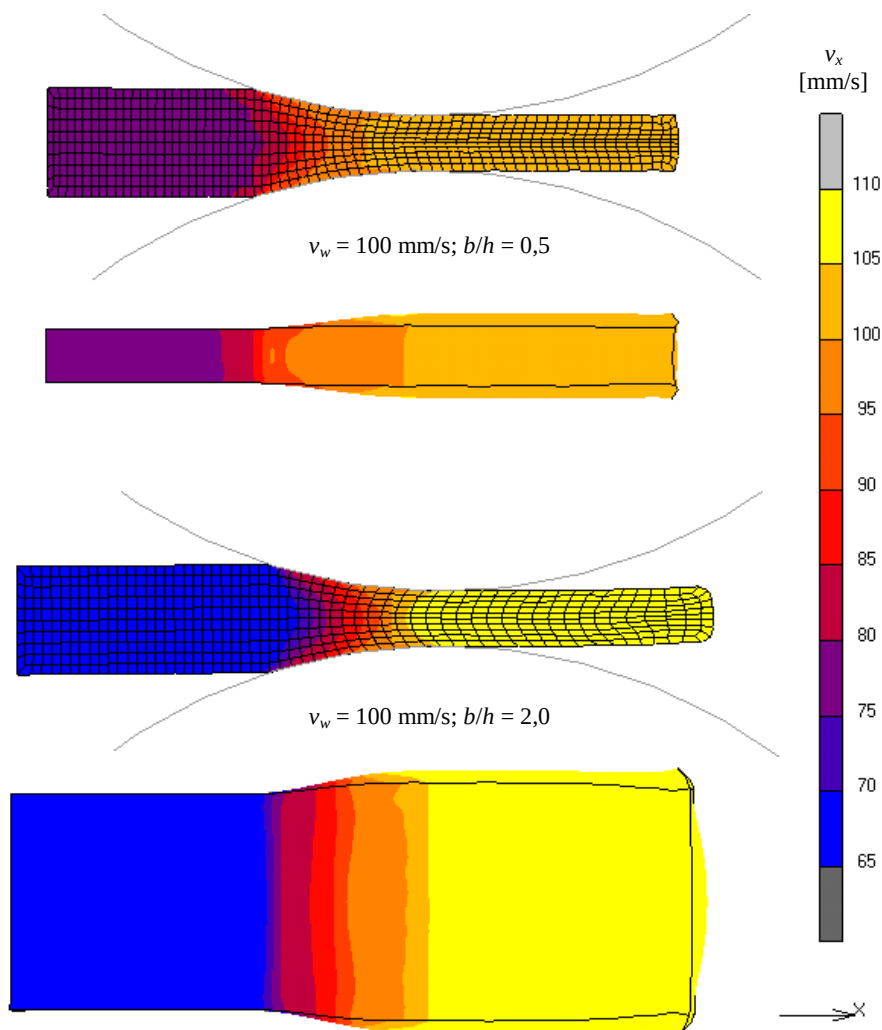
$$s_w = \frac{v_1 - v_w}{v_w}, \quad (10.15)$$

- ❑ opóźnienie względne s_o :

$$s_o = \frac{v_0 - v_w}{v_w}, \quad (10.16)$$

gdzie: v_1 – prędkość metalu wciągane między walce, v_w – prędkość obwodowa walców, v_0 – prędkość metalu opuszczającego walce.

Na wartość wyprzedzenia w procesie walcowania wzdłużnego ma wpływ szereg czynników. Intensyfikację tego zjawiska powoduje zwiększanie: średnicy walców, współczynnika tarcia, gniotu względnego oraz temperatury kształtowania.



Rys. 10.4. Zmiany kształtu pasma w procesie walcowania wzdłużnego, z zaznaczonym rozkładem prędkości w kierunku x , w zależności od stosunku wymiarów b/h

10.1.3. Walcowanie przedkuwek

Projektowanie procesów walcowania wzdłużnego przedkuwek obejmuje:

- ☐ konstruowanie przedkuwki walcowanej i określenie wymiarów materiału wejściowego;
- ☐ ustalenie układu wykrojów;
- ☐ obliczenie wymiarów wykrojów dla przyjętego układu walcowania;
- ☐ określenie podstawowych parametrów siłowych walcowania.

Konstruowanie przedkuwki walcowanej prowadzi się w sposób analogiczny jak dla odkuwek matrycowanych na młotach, przedstawiony w rozdziale 7. Znając kształty i wymiary przedkuwki walcowanej wyznacza się przekrój materiału wyjściowego S_0 :

$$S_0 = (1,05 \div 1,2) S_{p \max}, \quad (10.17)$$

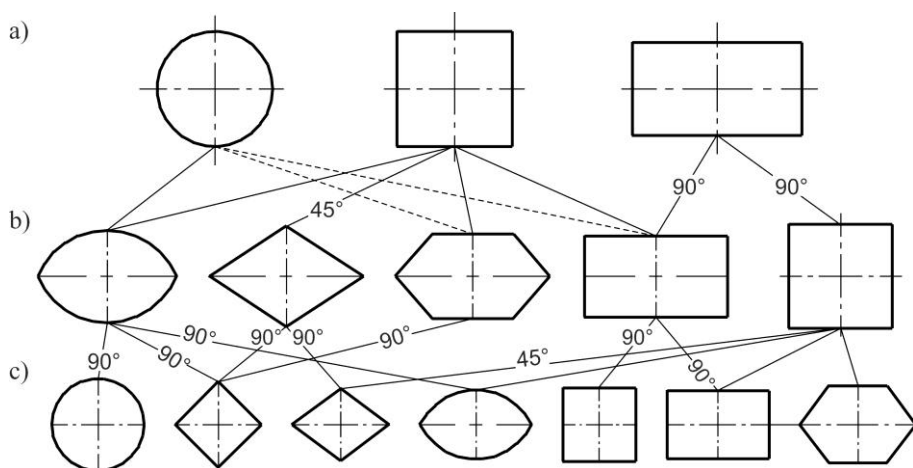
oraz długość materiału wyjściowego l_0 :

$$l_0 = \frac{V_{ip}}{S_0} z. \quad (10.18)$$

W wyrażeniach (10.17) i (10.18) przyjęto następujące oznaczenia: $S_{p \max}$ – największy przekrój poprzeczny przedkuwki walcowanej, V_{ip} – objętość idealnej przedkuwki, z – współczynnik strat na zgorzelinę.

W zależności od kształtu i wymiarów przedkuwki walcowanie jest prowadzone w jednym lub w kilku wykrojach. Rozróżnia się przy tym kilka podstawowych systemów walcowania przedkuwek, które schematycznie przedstawiono na rys. 10.5. Kombinacje pokazane na tym rysunku mogą być powtarzane dowolną ilość razy. Można także przyjąć bardziej złożone kształty wykrojów, co jednakże powoduje znaczne utrudnienia w kalibrowaniu i wykonawstwie segmentów.

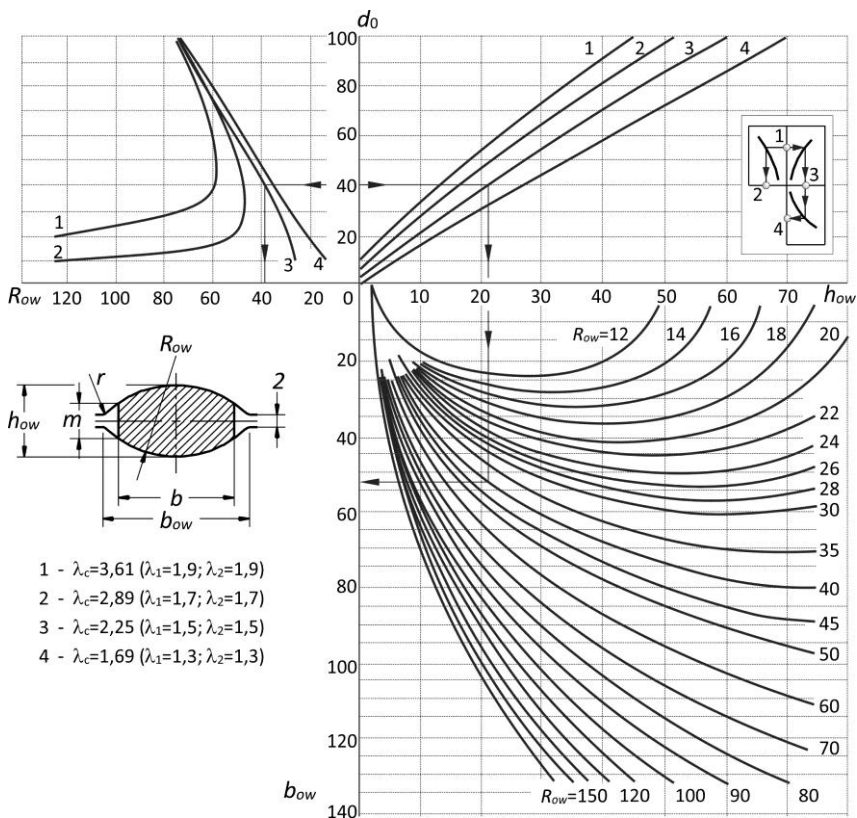
Dla obliczania wymiarów wykrojów (w przyjętym systemie walcowania), można zastosować cały szereg sposobów kalibrowania walców. Są to metody opracowane przez: Spiessa, Hallera, Bachtinowa - Sztienowa, Smirnowa, Atroszenkę, Kaufmana, Martynowa, Chamouarda - Bielina. Szczegółowy opis postępowania przy kalibrowaniu wymienionymi metodami, podany w literaturze [9, 39],



Rys. 10.5. Systemy walcownicze wykrojów wydłużających: a) materiał wyjściowy, b) wykroj pierwszy, c) wykroj drugi [39]

znacznie wykracza poza zakres bieżącego opracowania. Poniżej objaśniono tylko metodę kalibrowania walców według Martynowa, którą zastosowano w przykładzie ilustrującym zastosowanie walcowania wzdłużnego w procesie kształtowania odkuwki korbowodu.

Martynow zaleca stosowanie w obliczaniu wykrojów specjalnych nomogramów, dotyczących systemów walcowania: koło – owal – koło (rys. 10.6) oraz koło – owal – kwadrat. Z nomogramów odczytuje się wymiary wykrojów, w zależności od żądanego całkowitego współczynnika wydłużenia oraz od średnicy pręta wyjściowego d_0 . Znając średnicę d_0 prowadzi się przez odpowiadający jej punkt (w górnej części nomogramu) linię poziomą, do przecięcia się z krzywymi odpowiadającymi żądanej wartości całkowitego współczynnika wydłużenia λ_c . Następnie odczytuje się wartości promienia owalu R_{ow} (część lewa – górna nomogramu) i wysokości owalu h_{ow} (część prawa – górna nomogramu). Proces kalibrowania kończy się odczytaniem szerokości owalu b_{ow} na skali pionowej części



Rys. 10.6. Nomogram do określania wymiarów wykroju owalnego w systemie koło – owal – koło [39]

dolnej nomogramu, odpowiadającej przyjętej wartości R_{ow} .

Długość wykroju oblicza się ze wzoru:

$$l_w = \frac{l_n}{s_w + 100}, \quad (10.19)$$

gdzie: l_w – długość wykroju lub jego części mierzona po łuku o promieniu R_{cz} , l_n – długość przedkuwki lub jej części w stanie gorącym, s_w – wyprzedzenie na danym odcinku (zwykle $s_w = 4\div 6\%$).

Przykład zastosowania technologii walcowania kuźniczego

Poniżej przedstawiono przykład procesu kucia odkuwki korbowodu (rys. 10.7a), w którym do kształtowania przedkuwki zastosowano walcowanie kuźnicze wzdłużne. Założono, że odkuwka kuta będzie na prasie z wykorzystaniem rowka wypływkii o wysokości $h = 1$ mm.

Wykres przekrojów przedkuwki walcowanej wyznaczono na podstawie wykresu przekrojów przedkuwki idealnej (rys. 10.7b), sporządzonego w sposób analogiczny jak dla odkuwek kutyh na młotach.

Na podstawie wykresu przekrojów przedkuwki walcowanej, korzystając ze wzoru (7.13), obliczono średnice przedkuwki i sporządzono jej rysunek 10.7c. Średnicę materiału wyjściowego d_0 przyjęto równą największej średnicy przedkuwki $d_0 = 26$ mm.

W następnej kolejności korzystając z zależności (10.9) obliczono całkowity współczynnik wydłużenia λ_c :

$$\lambda_c = \frac{S_0}{S_1} = \frac{26^2 \pi/4}{19^2 \pi/4} = 1,87, \quad (10.20)$$

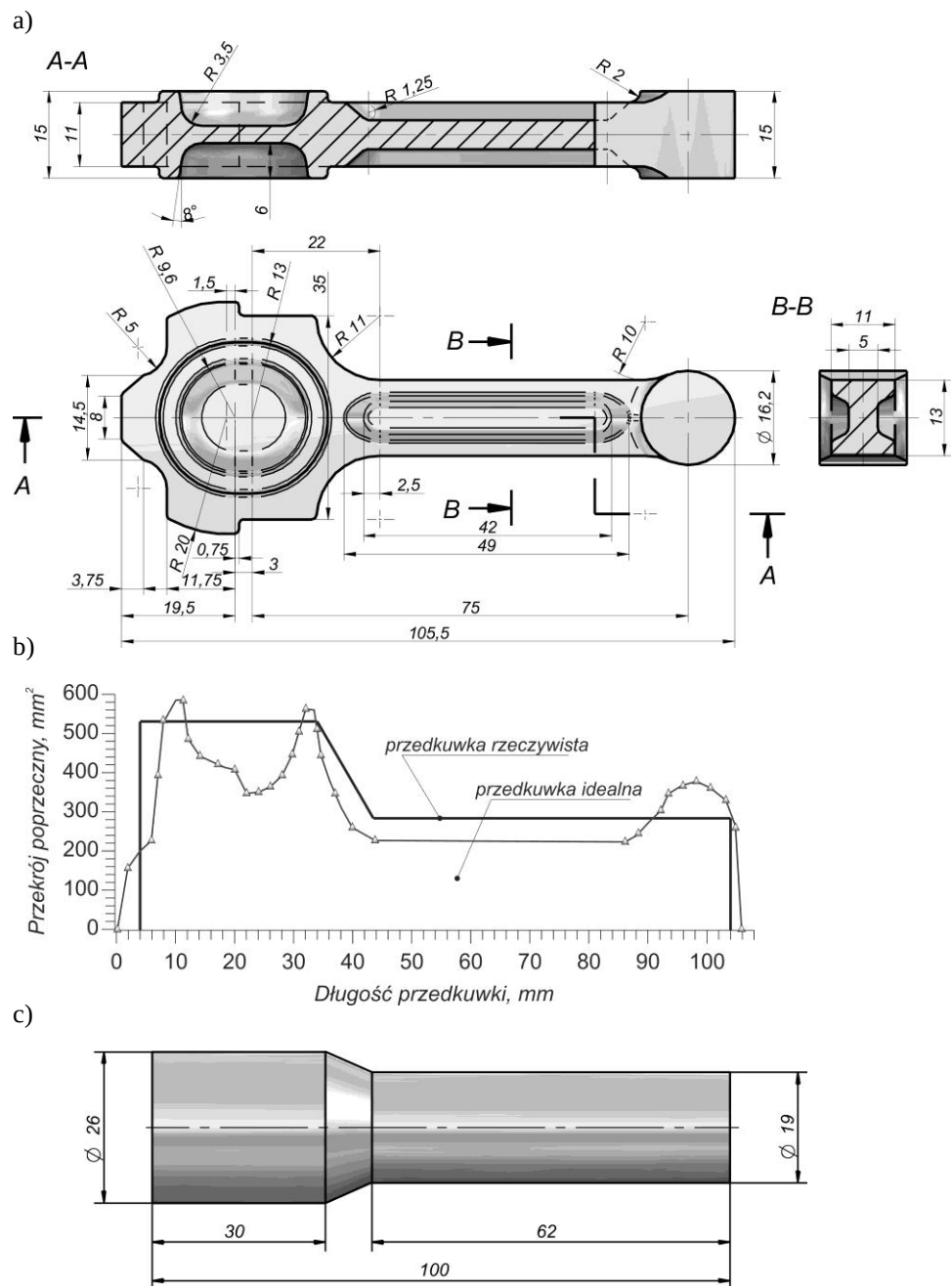
Dla otrzymanego współczynnika wydłużenia walcowanie można przeprowadzić w dwóch wykrojach: owalnym i okrągłym.

Do wyznaczenia wymiarów wykroju owalnego wykorzystano nomogram Mantynowa (rys. 10.6), z którego odczytano: promień owalu $R_{ow} = 30$ mm, wysokość owalu $h_{ow} = 15$ mm, szerokość owalu $b_{ow} = 38$ mm. Następnie obliczono powierzchnię przekroju poprzecznego owalu S_{ow} stosując zależność przybliżoną:

$$S_{ow} = \frac{\pi}{4} h_{ow} b_{ow}, \quad (10.21)$$

z której otrzymano $S_{ow} = 447,7$ mm².

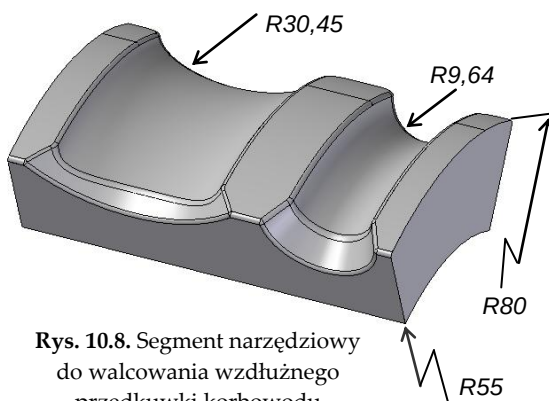
Następnie korzystając z zasady stałej objętości wyznaczono długość części odkuwki walcowanej w wykroju owalnym, która wynosi $l_{ow} = 40,0$ mm. Długość części roboczej wykroju obliczona z zależności (10.10), po przyjęciu wyprzedzenia $s_w = 4\%$, wyniosła $l_{w1} = 38,46$ mm.



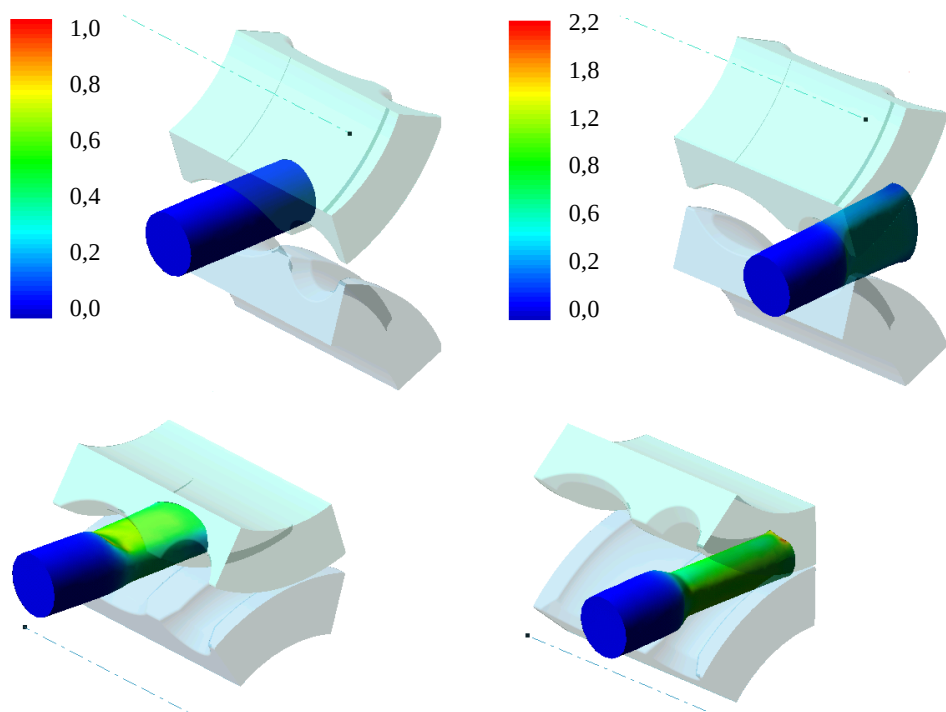
Rys. 10.7. Konstrukcja przedkuwki walcowanej: a) odkuwka, b) wykres przekrojów, c) przedkuwka walcowana

Wymiary wykroju kołowego narzucone zostały przez rysunek przedkuwki walcowanej. Długość wykroju obliczona podobnie jak w przypadku wykroju owalnego wyniosła $l_{w2} = 67,3$ mm.

Uwzględniając obliczone wymiary wykroju (skorygowane o wartość skurczu cieplnego w wysokości 1,5%) zaprojektowano segment dla walcarki o średnicy walców $\varnothing 110$ mm, który pokazano na rys. 10.8. Proces walcowania przedkuwki korbowodu zamodelowano numerycznie, korzystając z metody elementów skończonych. Wyznaczone w ten sposób kolejne etapy walcowania wzdłużnego przedkuwki pokazano na rys. 10.9. Przebieg kucia wypływowego korbowodu z przedkuwki walcowanej przedstawiony na

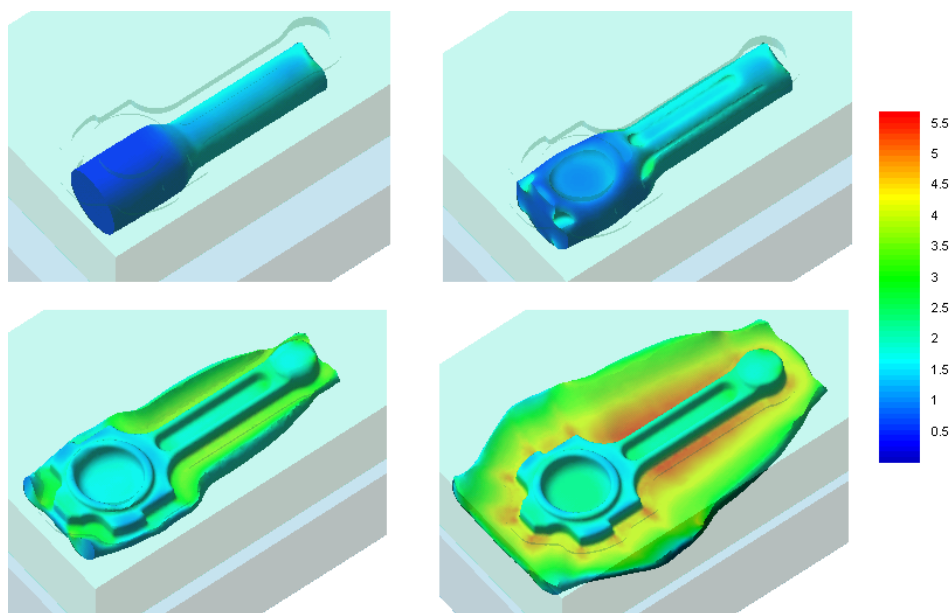


Rys. 10.8. Segment narzędziowy do walcowania wzdłużnego przedkuwki korbowodu



Rys. 10.9. Walcowanie przedkuwki w wykroju owalnym (kolumna lewa) i kołowym (kolumna) prawa, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

rys. 10.10, potwierdza jednoznacznie prawidłowość przyjętego rozwiązania. Ponadto, analiza kształtu odkuwki z wypływką wykazuje, że możliwe jest dalsze doskonalenie kucia przez zmniejszenie wypłytki.



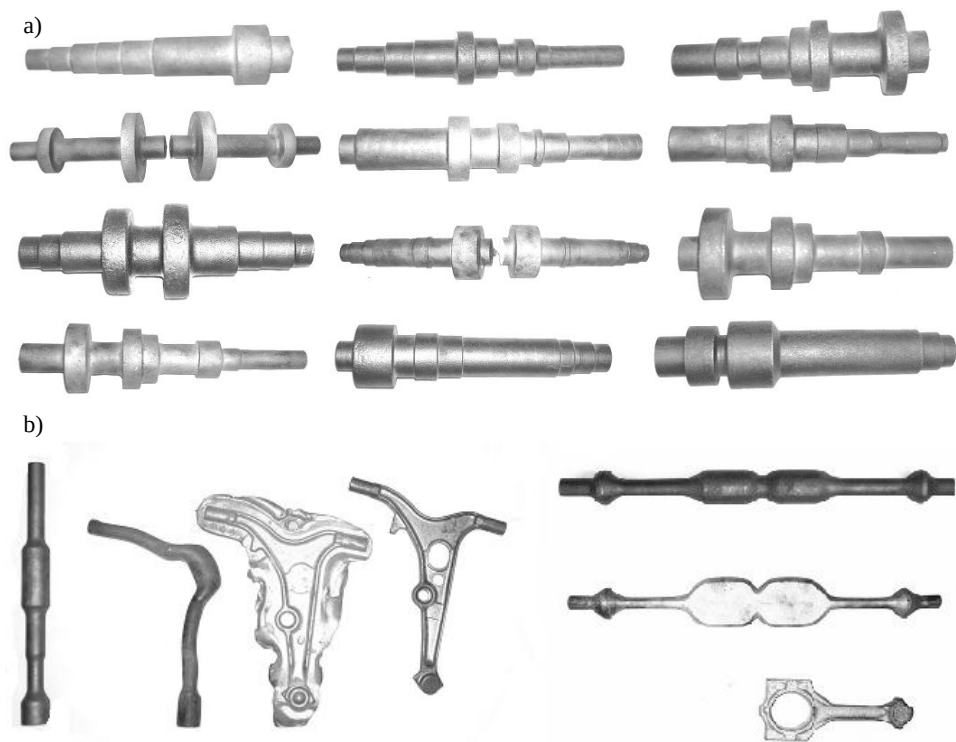
Rys. 10.10. Przebieg kucia matrycowego odkuwki z przedkuwki walcowanej, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

10.2. Walcowanie poprzeczno-klinowe

Walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) polega na plastycznym kształtowaniu wyrobów osiowo-symetrycznych za pomocą narzędzi w kształcie klinów. Narzędzia te mocuje się do walców lub płaskich płyt walcarek. Proces walcowania najczęściej realizowany jest na gorąco [55, 58]. Metoda WPK znajduje zastosowanie przede wszystkim w produkcji seryjnej i masowej:

- ❑ walcowanych na gotowo stopniowanych osi o wałów, wykorzystywanych głównie w przemyśle motoryzacyjnym;
- ❑ rdzeni izolatorów wysokiego napięcia, walcowanych na gotowo;
- ❑ odkuwek części stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, np. czopy układów zawieszenia, czopy mechanizmów kierowniczych;
- ❑ wkrętów szynowych;
- ❑ przedkuwek wykorzystywanych w kuciu matrycowym wyrobów takich jak: klucze maszynowe, korbowody, dźwignie, widełki, itd.

Przykłady wyrobów otrzymywanych przy udziale technologii WPK pokazano na rys. 10.11.



Rys. 10.11. Przykłady wyrobów wytwarzanych z udziałem WPK: a) odkuwki stopniowanych wałków i osi, b) przedkuwki walcowane wraz z odkuwkami wykonanymi na ich bazie

10.2.1. Parametry charakteryzujące proces WPK

Za główne parametry walcowania poprzeczno - klinowego przyjmuje się (zgodnie z rys. 10.12) kąt kształtujący α , kąt rozwarcia klina β , średnicę wsadu d_0 i odkuwki po walcowaniu d oraz długość odcinka walcowanego l .

W narzędziach stosowanych do WPK wyróżnia się następujące strefy: wcinania, kształtowania i kalibrowania. W strefie wcinania narzędzie zagłębia się w materiał na głębokość Δr , redukując jego średnicę do zakładanej wartości d . W strefie kształtowania dzięki oddziaływaniu bocznych ścian klina następuje redukcja średnicy na wymaganej długości l . W trakcie kalibrowania materiał poddawany jest obciskaniu, w czasie którego usuwane są powstałe w poprzednich fazach procesu niepożądane krzywizny i inne nieregularności kształtu wyrobu walcowanego. Bardzo często za strefą kalibrowania umieszcza się noże odcinające, których zadaniem jest oddzielenie zniekształconych końców wyrobu. W przypadku jednoczesnego kształtowania dwóch lub więcej części na końcu narzędzia umieszcza się noże rozdzielające wyroby walcowane. Dla ułatwienia obracania się odkuwki w trakcie walcowania, na powierzchniach bocznych

klinów wykonuje się specjalne nacięcia technologiczne. W podobny sposób nacina się ścieżki prowadzące (umieszczane na początku klina), które mają stabilizować położenie materiału podczas inicjowania procesu WPK.

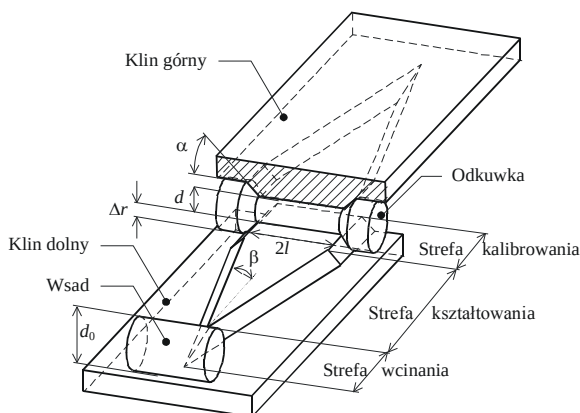
Do określania odkształcenia plastycznego w wyrobach kształtowanych przez WPK stosowane są następujące miary:

- stopień gniotu określony zależnością:

$$\delta = \frac{d_0}{d}, \quad (10.22)$$

- redukcja przekroju poprzecznego:

$$R_p = \left(1 - \frac{d^2}{d_0^2}\right) \cdot 100\%. \quad (10.23)$$

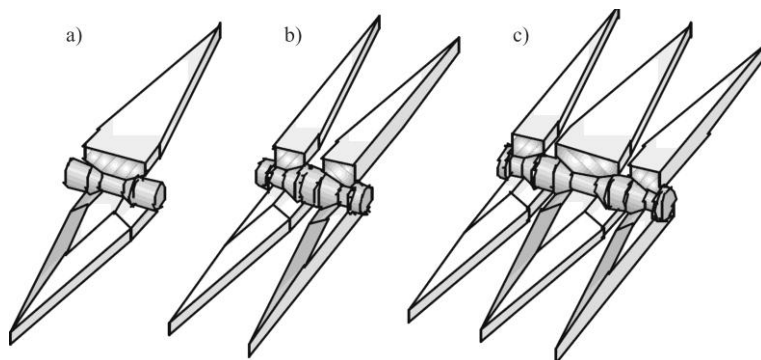


Rys. 10.12. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego narzędziami płaskimi

10.2.2. Metody WPK

W zależności od przebiegu procesu WPK wyróżnia się następujące metody (rys. 10.13):

- Walcowanie poprzeczno-klinowe metodą redukcji średnic (zwykłe) – rys. 10.13a. W procesie tym średnica pręta redukowana jest w kierunku od środka ku końcom. Redukcji przekroju poprzecznego towarzyszy swobodne wydłużenie odkuwki w kierunku osiowym.
- Wsteczne walcowanie poprzeczno-klinowe (ze ściskaniem) – rys. 10.13b. W tym przypadku średnica pręta redukowana jest z dwóch stron, począwszy od końców odkuwki ku jej środkowi. W rezultacie centralna część wyrobu podlega działaniu osiowych sił ściskających. Wtedy, gdy wartość naprężeń (wywołanych działaniem tych sił) osiągnie granicę plastyczności, to środkowa część odkuwki ulegnie spęczeniu. Tą metodą WPK można kształtować stopnie odkuwki, których średnica jest większa (nawet o 25%) od średnicy zastosowanego wsadu.
- Równoległe walcowanie poprzeczno-klinowe (rys. 10.13c). W tej metodzie wyrób jest kształtowany jednocześnie przez kilka par klinów, przy czym poszczególne jego stopnie mogą być walcowane metodą zwykłą lub

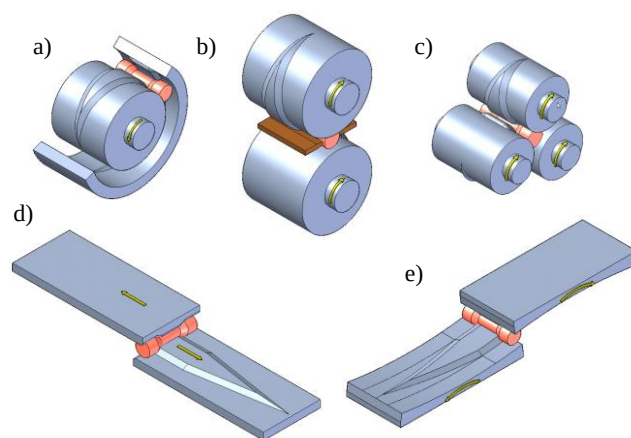


Rys. 10.13. Podział metod WPK ze względu na przebieg procesu: a) walcowanie poprzeczno-klinowe metodą redukcji średnic (zwykłe); b) wsteczne walcowanie poprzeczno-klinowe (ze spęszaniem); c) równoległe walcowanie poprzeczno-klinowe

wstępną. Zastosowanie równoległego WPK pozwala skrócić nawet 3-krotnie długość narzędzia klinowego, czemu towarzyszy jednakże zwiększenie siły kształtowania.

Inny podział metod WPK można przeprowadzić ze względu na kształt klinów oraz sposób ich mocowania w walcarkach poprzeczno-klinowych. Przy takim kryterium podziału wyróżnia się (rys. 10.14):

- WPK w układzie segment – walec (rys. 10.14a). Odkuwka kształtowana jest między napędzanym walcem z klinem wypukłym, a nieruchomym



Rys. 10.14. Schematy procesów WPK realizowanych w układzie: a) walec – segment wklęsły, b) dwóch walców, c) trzech walców, d) dwóch klinów płaskich, e) dwóch klinów wklęsłych

segmentem, do którego zamocowany jest klin wklęsły. Podczas walcowania odkuwka, wykonując ruch obrotowy wokół swej osi, przewalcowywana jest po nieruchomym segmencie. Ten schemat WPK odznacza się prostotą konstrukcji i zwartością kształtu oraz dużą wydajnością. Jednakże wykonanie i przygotowanie do pracy nieruchomego wklęsłego klina jest utrudnione.

- ❑ WPK w układzie dwóch lub trzech walców klinowych (rys. 10.14b, c). Wsad umieszczany jest równolegle do osi obracających się w tym samym kierunku walców. Metoda dwuwalcowa wymaga stosowania dodatkowych listew prowadzących zabezpieczających odkuwkę przed jej wypadnięciem ze strefy roboczej walców. W przypadku zastosowania trzech walców oprócz eliminacji prowadzenia odkuwki zmniejsza się prawdopodobieństwo pęknięcia metalu w strefie osiowej. Równocześnie ze względu na ograniczenia geometryczne mniejsza jest długość klinów kształtujących. Zaletą tych schematów WPK jest możliwość ciągłego walcowania z pręta, co predysponuje je do wykonywania odkuwek krótkich.
- ❑ Walcowanie poprzeczne klinowymi narzędziami płaskimi (rys. 10.14d). Segmenty narzędziowe walcarek płaskoklinowych są proste w wykonaniu co czyni walcowanie wg tego schematu opłacalnym już w warunkach produkcji średnioseryjnej. Wadą kształtowania tą metodą jest występowanie biegu jałowego narzędzi, zajmującego około 40% czasu jednego cyklu roboczego i obniżającego wydajność procesu.
- ❑ Walcowanie poprzeczne w układzie dwóch segmentów wklęsłych (rys. 10.14e). Metoda ta polega na kształtowaniu wyrobu między dwoma, poruszającymi się mimośrodowo wklęsłymi segmentami klinowymi. Z powodu złożoności narzędzi ten sposób kształtowania jak dotąd nie znalazł szerszego zastosowania w praktyce.

10.2.3. Ograniczenia procesu WPK

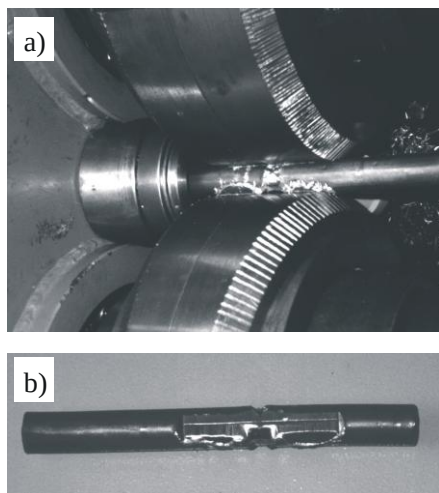
Głównym czynnikiem zakłócającym przebieg procesu WPK jest niekontrolowany poślizg pomiędzy odkuwką kształtowaną a narzędziami. Ponadto, podczas WPK może wystąpić przewężenie (zerwanie) odkuwki, bądź też mogą powstać pęknięcia wewnątrz metalu.

Niekontrolowany poślizg pomiędzy wyrobem kształtowanym a narzędziem

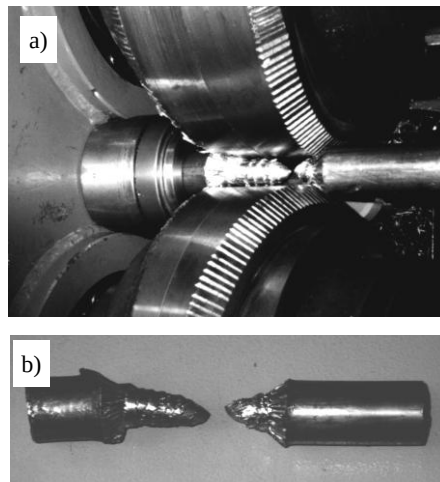
Niekontrolowany poślizg występuje wówczas, gdy suma momentów sił sprzyjających obrotowi odkuwki kształtowanej jest mniejsza od sumy momentów sił przeciwnych temu obrotowi. W takim przypadku przemieszczające się w kierunku przeciwnym segmenty narzędziowe zdzierają warstwy wierzchnie materiału odkuwki (rys. 10.15). Powszechnie stosowanym środkiem zapobiegającym wystąpieniu niekontrolowanego poślizgu, jest wykonywanie na powierzchniach bocznych klinów nacięć technologicznych o głębokości 0,5÷1,5 mm, w odległości 3÷5 mm jedno od drugiego. Warunkiem stabilnego przebiegu procesu WPK bez poślizgu jest spełnienie następującej nierówności:

$$(0,25 + 0,0038\alpha)\beta^{0,925} \leq 1,93, \quad (10.24)$$

w której kąty kształtujący α i rozwarcia klina β wyrażone są w stopniach.



Rys. 10.15. Zaburzenie WPK w efekcie niekontrolowanego poślizgu: a) widok procesu, b) wyrób wadliwy



Rys. 10.16. Przewężenie (zerwanie) odkuwki w procesie WPK: a) widok procesu; b) zdeformowany wyrób

Przewężenie odkuwki walcowanej

Przewężenie odkuwki kształtowanej metodą WPK występuje wówczas, gdy naprężenia rozciągające (wywołane działaniem składowej osiowej siły walcowania) osiągną wartość granicy plastyczności. Następuje wtedy gwałtowne płynięcie metalu w kierunku osiowym, któremu towarzyszy przewężenie odkuwki (tworzy się typowa szyjka jak w próbie rozciągania), aż do jej zerwania – rys. 10.16. Przewężenie występuje najczęściej przy stosowaniu klinów z dużymi kątami α i β . Według Tsukamoto [83] ograniczenie to nie wystąpi wówczas, gdy spełniona będzie następująca nierówność:

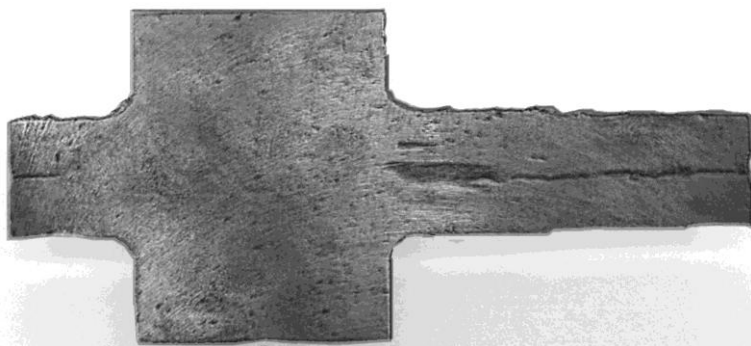
$$\frac{\sqrt{2\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}}{\pi}\left(1+\sqrt{\frac{1}{\delta}}\right)(\delta-1)\leq 0,2, \quad (10.25)$$

gdzie: α – kąt kształtujący, β – kąt rozwarcia klina, δ – stopień gniotu.

Pęknięcie odkuwek kształtowanych metodą WPK

Często występującym ograniczeniem w procesie WPK jest powstawanie pęknięć wewnętrznych w odkuwkach walcowanych, nazywane efektem Mannesmanna. Kształt tych pęknięć zależy od zastosowanej metody WPK. I tak podczas kształtowania dwoma narzędziami tworzone są pęknięcia w kształcie osiowych (rys. 10.17), a w przypadku stosowania trzech walców – pierścieniowych, wzdłużnych szczelin.

Mechanizm powstawania pęknięć jest złożony i przypisywany niskocyklowemu zmęczeniu metalu. W większości przypadków WPK warstwy materiału



Rys. 10.17. Pęknięcie utworzone w strefie osiowej odkuwki kształtowanej metodą WPK

(w strefie centralnej odkuwki) podlegają ścisnaniu w kierunku normalnym do powierzchni narzędzi, natomiast w kierunku prostopadłym do kierunku normalnego – rozciąganiu. Po wykonaniu $\frac{1}{4}$ obrotu warstwy rozciągane podlegają ścisnaniu, a ścisrane rozciąganiu. Występowanie w metalu takiego schematu naprężeń doprowadza z czasem do powstania pęknięcia zmęczeniowego. Warunek stabilnego przebiegu WPK, bez pęknięcia metalu, zdefiniowany został przez Hayamę [28] jako:

$$(0,15 + 0,0038\alpha) \beta^{0,325} \geq M, \quad (10.26)$$

w powyższej zależności kąty α i β wyrażone są w stopniach, a M oznacza stałą materiałową, której wartość należy dobierać z przedziału $0,35 \div 0,4$.

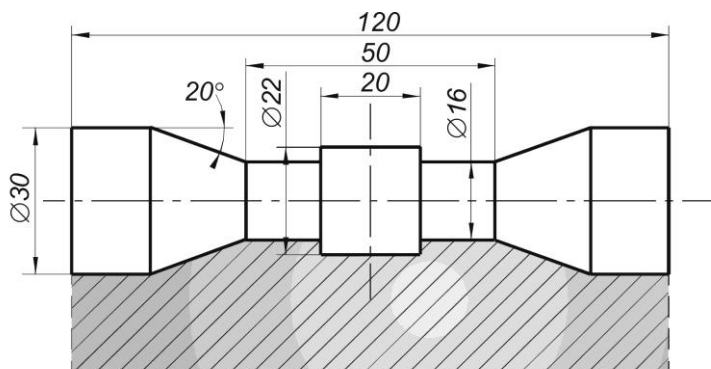
10.2.4. Projektowanie narzędzi klinowych

Ze względu na podobny mechanizm odkształcenia oraz duże gabaryty klinów (montowanych na walcach) w stosunku do wymiarów wsadu, narzędzia klinowe projektuje się w sposób jednakowy dla wszystkich metod WPK. W zasadzie proces doboru geometrii narzędzi sprowadza się do określenia kątów kształtującego α i rozwarcia klina β , na podstawie których (po uwzględnieniu wymiarów odkuwki w stanie gorącym) projektowane są pozostałe wymiary narzędzi. Do obliczenia kąta rozwarcia klina β można zastosować następującą zależność:

$$\sin \beta = 0,009 \cdot \frac{\mu}{\sin \alpha}, \quad (10.27)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia dobierany z przedziału $0,4 \div 0,5$, α – przyjęty kąt kształtujący (zwykle $15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$). Należy przy tym pamiętać, by dobrane wartości kątów α i β spełniały warunki stabilnego walcowania, zdefiniowane zależnościami (10.24)÷(10.26).

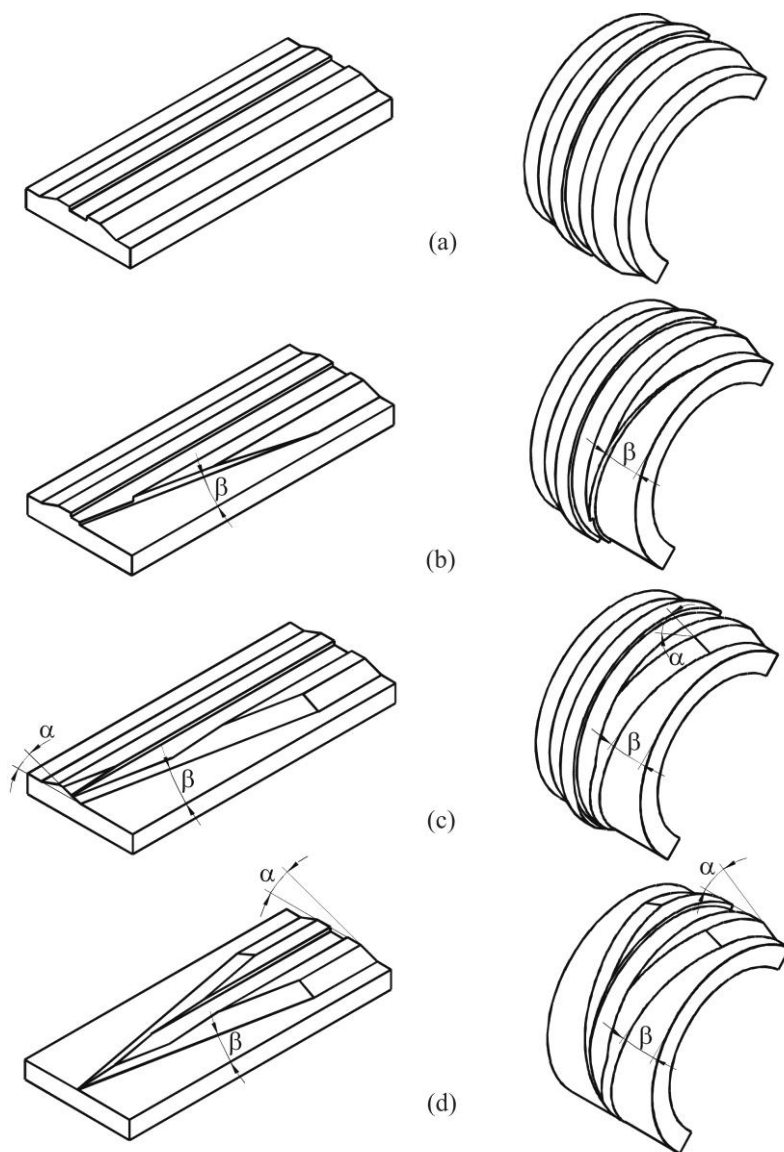
Znajomość kątów α i β umożliwia wykonanie projektu narzędzi. Omówienie kolejności prac związanych z konstrukcją segmentów klinowych przedstawiono na przykładzie odkuwki pokazanej na rys. 10.18. Podana metodyka postępowania bazuje na wykorzystaniu systemu przestrzennego komputerowo wspomaganego projektowania (CAD 3D). W pierwszej kolejności projektuje się bryłę o przekroju poprzecznym odpowiadającym zarysowi odkuwki (obszar zakreskowany na rys. 10.18). Bryłę tę wykonuje się przez wyciągnięcie (dla klinów płaskich) lub obrót wokół osi (kliny umieszczane na walcach) przekroju poprzecznego narzędzia – rys. 10.19a. Następnie startując ze środka segmentu odcina się pod kątem β jego część płaszczyzną prostopadłą do powierzchni podstawy narzędzia. W przypadku klina umieszczonego na walcu powierzchnia tnąca jest wycinkiem powierzchni śrubowej (rys. 10.19b). Kolejny etap prac stanowi sfazowanie pod kątem α (od podstawy) powierzchni otrzymanej w operacji poprzedniej. W wyniku wykonanych w ten sposób zabiegów uzyskuje się powierzchnię boczną klina, charakteryzowaną przez kąty α i β – rys. 10.19c. Dalsze prace projektowe dotyczą wykonania (w sposób analogiczny do przedstawionego) powierzchni kształtującej na drugiej połowie narzędzia (rys. 10.19d). Konstrukcję klina dopełnia wprowadzenie promieni zaokrąglenia krawędzi roboczych oraz dodanie strefy wyjściowej, umieszczonej bezpośrednio za strefą kalibrowaną.



Rys. 10.18. Przykład odkuwki symetrycznej kształtowanej metodą WPK

10.2.5. Przykład zastosowania technologii WPK w produkcji wałka pośredniego

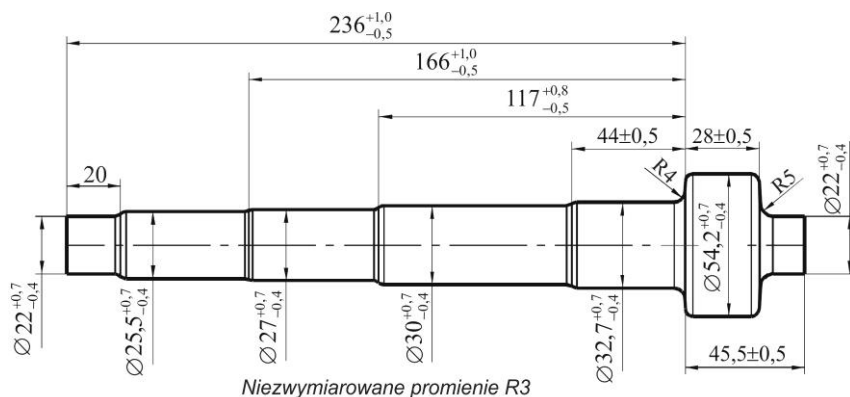
Jako przykład zastosowania technologii WPK przedstawia się proces kształtowania odkuwki wałka pośredniego (rys. 10.20) w walcu ULS 70, wyposażonej w walce o średnicy 700 mm. Ze względu na fakt, że skrajne stopnie



Rys. 10.19. Schemat przedstawiający kolejne etapy konstruowania narzędzia klinowego, przeznaczonego do kształtowania odkuwki pokazanej na rys. 10.18 (opis w tekście)

odkuwki kształtowane są przy stopniach gniołu $\delta = 2,45$ przyjęto, że proces walcowania przebiegać będzie w dwóch operacjach.

Na rys. 10.21 przedstawiono segment narzędziowy (w rozwinięciu) zabezpieczający realizację kształtowania odkuwki wałka pośredniego. Na rysunku tym podano również wymiary wsadu, niektóre wymiary odkuwki po pierwszej

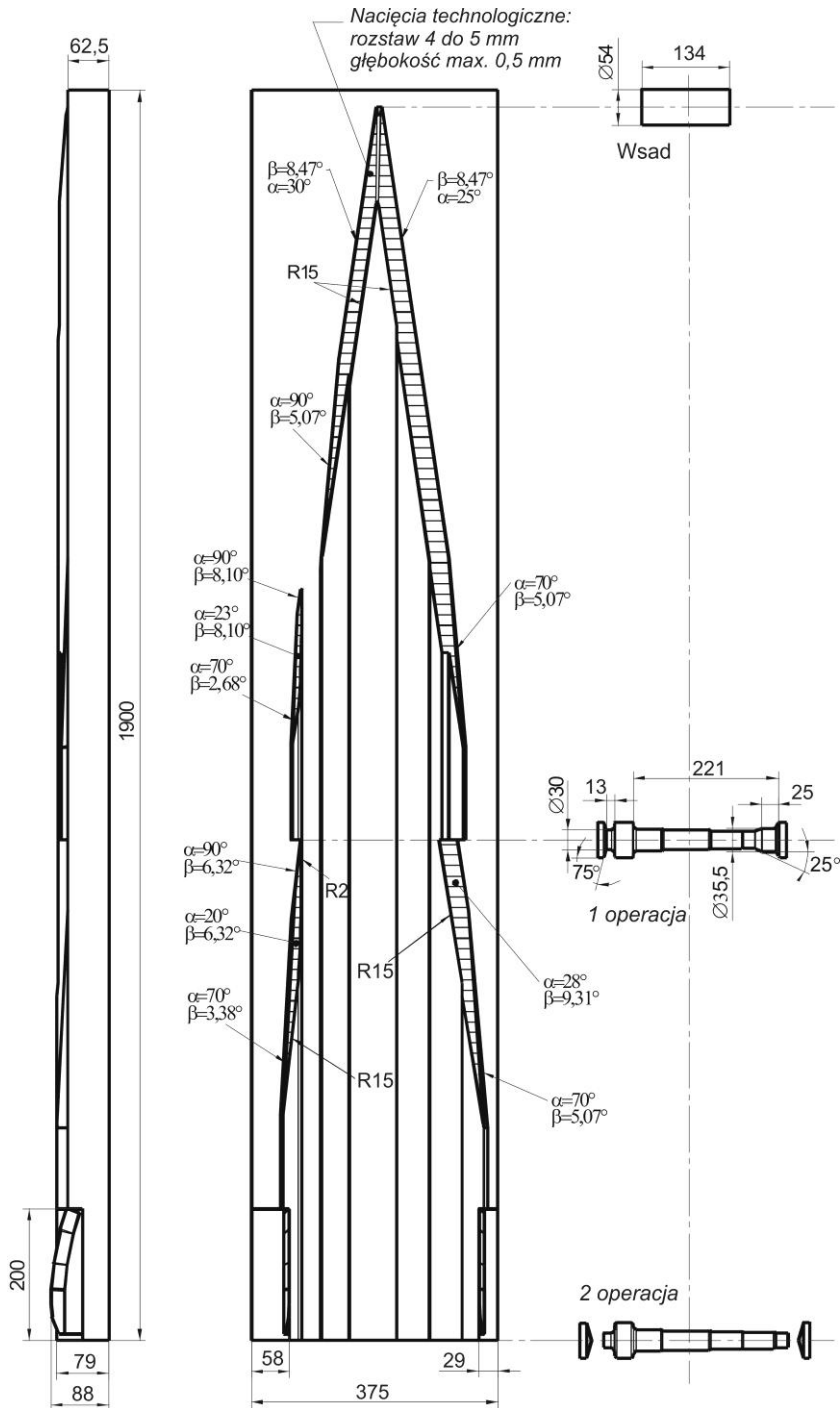


Rys. 10.20. Odkuwka wałka pośredniego w wersji walcowanej

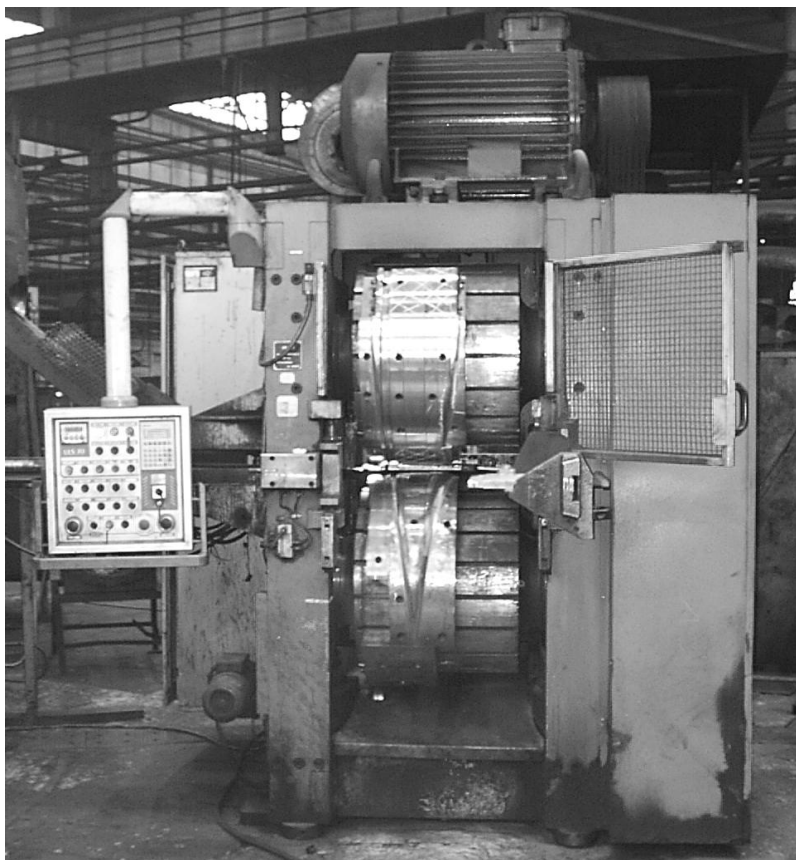
operacji oraz wartości parametrów kątowych opisujących geometrię powierzchni kształtujących i pomocniczych klinów. Ze względu na kształt odkuwki konieczne było zastosowanie schematu walcowania z odcinaniem odpadów końcowych, w których ukształtowane były leje czołowe. Odpady te z względu na położenie na końcach odkuwki oraz wielkość średnicy (równiej średnicy wsadu) spełniają w trakcie walcowania również rolę stabilizacyjną, zabezpieczając odkuwkę przed przekoszeniem.

Próby przemysłowe wykonane w walcierce ULS 70 wykazały poprawność przyjętego rozwiązania. Otrzymana w wyniku walcowania odkuwka wałka pośredniego (rys. 10.22) miała wymiary mieszczące się w tolerancjach wykonawczych.

W celu poznania jak przebiega proces WPK odkuwki wałka pośredniego, wykonano jego symulację numeryczną za pomocą metody elementów skończonych. Na rys. 10.23 pokazano zmiany kształtu odkuwki w czasie walcowania. W początkowej fazie procesu narzędzia klinowe wcinają się w środkowej części wsadu i redukują jego średnicę. Po ukształtowaniu trzech stopni wałka, leżących na prawo od jego głowy, rozpoczyna się walcowanie na średnicę pośrednią Ø30 mm, stopnia odkuwki znajdującego się po jej lewej stronie (dla $t \approx 2,0$ s). Po upływie czasu 2,6 s kończy się pierwsza operacja i odkuwka poddawana jest kalibrowaniu na krótkim odcinku narzędzi (dla $t \approx 2,5 \div 2,8$ s). Następnie rozpoczyna się kształtowanie (w ramach drugiej operacji) skrajnych stopni odkuwki wałka, o średnicach Ø22 mm. Proces ten kończy się po upływie czasu $t \approx 3,8$ s, po czym odkuwka poddawana jest kolejnemu kalibrowaniu ($t \approx 3,8 \div 4,2$ s) mającemu na celu usunięcie błędów kształtu powstałych we wcześniejszych fazach walcowania. W końcowej fazie procesu WPK ($t > 4,2$ s) ma miejsce odcięcie odpadów końcowych.



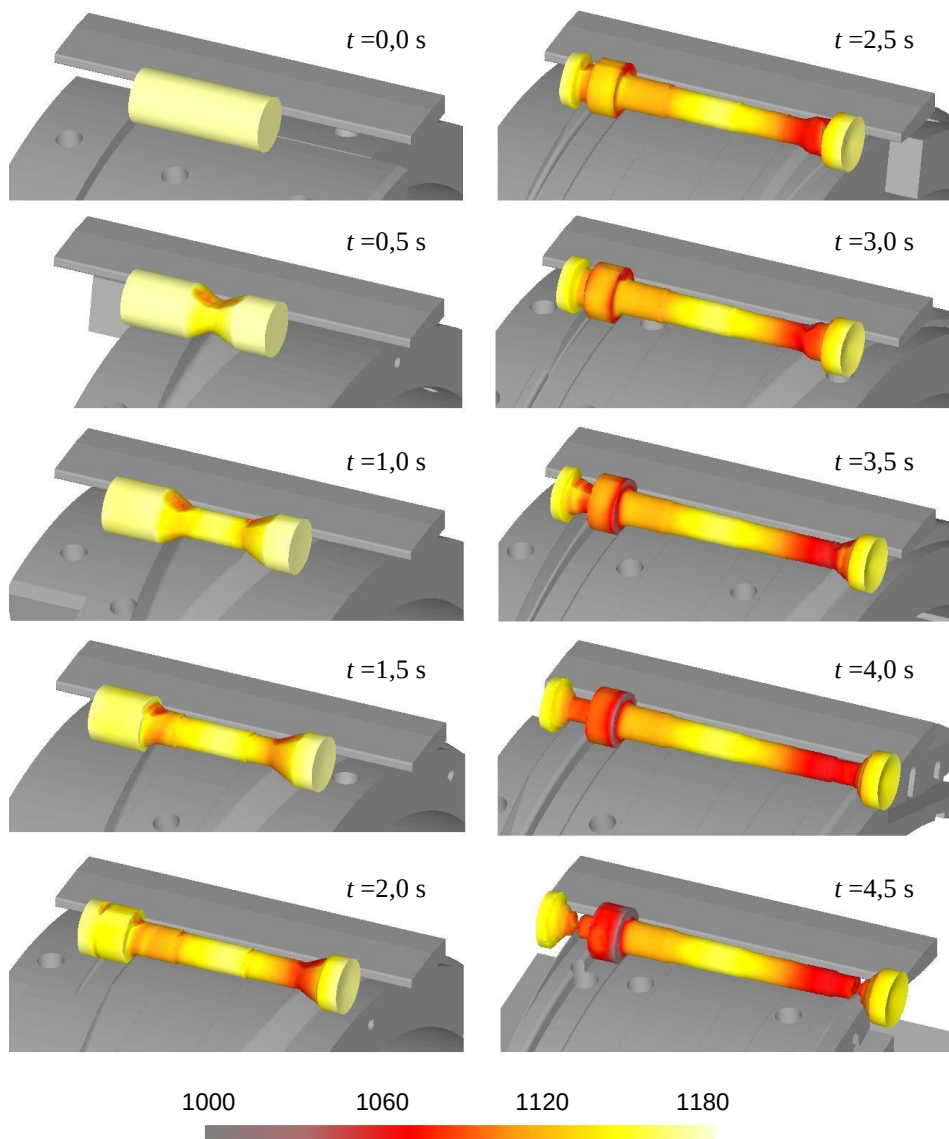
Rys. 10.21. Segment klinowy do walcowania odkuwki wałka pośredniego
(w rozwinięciu)



Rys. 10.22. Walcarka ULS-70, z walcami klinowymi do walcowania odkuwki wałka pośredniego, oraz odkuwka wałka z odpadami końcowymi

Rysunek 10.23 dodatkowo ilustruje jak zmienia się temperatura metalu (wsad nagrany był do temperatury $T=1170^{\circ}\text{C}$) w trakcie procesu WPK. Pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania ($t \approx 4,5$ s), w którym odkuwka styka się z narzędziami o znacznie niższej temperaturze (założono $T=250^{\circ}\text{C}$) nie zaobserwowano spadku temperatury metalu poniżej dolnej granicy temperatury kucia. Najmniejsza temperatura metalu występuje w głowie wałka, która obtaczając się swobodnie po powierzchniach walców oddaje im ciepło. Natomiast w stopniach kształtowanych nie odnotowano istotnego spadku temperatury. Jest to efektem rekompensowania ciepła odprowadzanego do

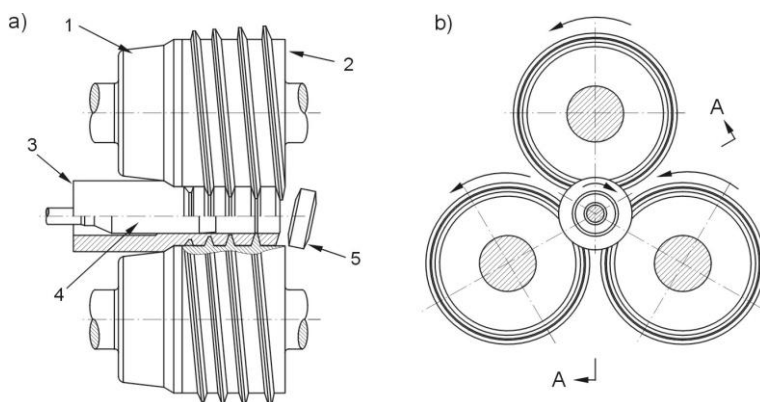
narzędzi ciepłem powstającym w efekcie zamiany pracy odkształcenia plastycznego oraz pracy tarcia.



Rys. 10.23. Progresja kształtu odkuwki wałka pośredniego z zaznaczonym rozkładem temperatury T metalu (w $^{\circ}\text{C}$), w funkcji czasu walcowania t (dla poprawy czytelności ukryto wałek górny i jedną z listew prowadzących)

10.3. Walcowanie skośne

Proces walcowania skośnego zostanie przybliżony na przykładzie kształtowania pierścienia – rys. 10.24. Technologia ta jest powszechnie stosowana w zakładach łożyskowych w Rosji oraz w firmie Timken w USA. W porównaniu do kucia matrycowego odznacza się ona szeregiem zalet. Są to przede wszystkim: mniejsze zużycie metalu w wyniku braku denka, co daje uzysk całkowity na poziomie 92÷94%; znacznie większa wydajność wynosząca od 100 do 280 szt./godz., mniejsza ilość narzędzi i krótszy czas ustawiania walcarki.

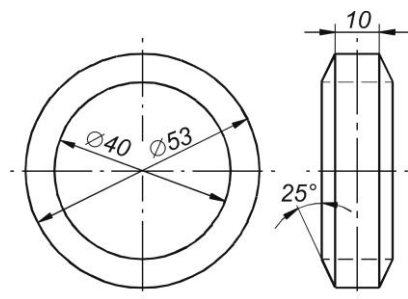


Rys. 10.24. Schemat walcowania pierścieni w trójwalcowej walcarce skośnej: a) przekrój wzdłuż obszaru odkształcenia; b) widok od strony wejściowej; oznaczenia: 1 – stożek wejściowy do walcowania wstępnego, 2 – wałek kształtujący pierścień, 3 – tuleja rurowa, 4 – trzpień, 5 – pierścień gotowy

10.3.1. Kalibrowanie walca

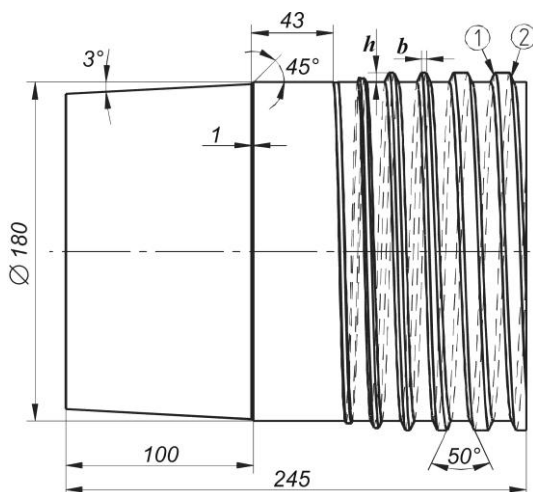
Walec (rys. 10.24) stosowany w procesie walcowania skośnego pierścieni składa się z części wstępnej (stożkowej) i kształtującej (z wykrojem śrubowym). Część wstępna jest istotna by nadać początkową prędkość osiową (w efekcie ustawienia skośnych walców pod kątem ok. 3° w stosunku do osi wsadu) i obwodową tulei walcowanej na trzpieniu cylindrycznym. Zachodzi wówczas redukcja średnicy tulei (grubości ścianki) dzięki czemu uzyskuje się dobrą jakość powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej. Część kształtująca walca projektowana jest z występm na powierzchni, aby umożliwić wytwarzanie wyrobów o specyficznym kształcie.

Projekt kalibrowania walców skośnych jest bardzo złożony i trudny do realizacji. Podczas projektowania wykroju obowiązuje zasada stałej objętości metalu ($V_\Theta = V_{\Theta + 360^\circ}$ – gdzie: Θ – kąt obrotu walca). Można w tym celu zastosować nowoczesne programy komputerowo wspomaganego projektowania (CAD).



Rys. 10.25. Pierścień walcowany w walcarce skośnej

Mianowicie zakładając z pewnym uproszczeniem, że wyrób w czasie całego procesu kształtowania jest bryłą osiowo-symetryczną należy tak zmieniać jego wymiary (w funkcji kąta obrotu walca Θ), by jego objętość była zachowana (stała).



Rys. 10.26. Schemat walca zastosowanego w procesie walcowania pierścieni wraz z ważniejszymi parametrami: b – szerokość zwoju; h – wysokość zwoju; 1 i 2 – oznaczenia powierzchni śrubowych

Na rys. 10.25 pokazano pierścień, który jest kształtowany w procesie walcowania skośnego trzema walcami o wymiarach pokazanych na rys. 10.26 [32]. Parametry ulegające zmianie w trakcie walcowania (wysokość zwoju h , szerokość wierzchołka zwoju b , skok powierzchni śrubowej 1 i 2) zestawiono w funkcji kąta obrotu walca Θ w tabeli 10.1.

Tabela 10.1.

Parametry opisujące kształt zwojów śrubowych, wykonanych na walcu pokazanym na rys. 10.26, w funkcji kąta obrotu walca θ , liczonego od momentu zainicjowania zwoju.

Kąt obrotu walca θ , °	Szerokość zwoju b , mm	Wysokość zwoju h , mm	Skok powierzchni śrubowej 1, mm	Skok powierzchni śrubowej 2, mm
0 ÷ 360	2,50	0,00 → 2,50	14,03	14,03
360 ÷ 540	2,50	2,50 → 3,75	15,29	15,29
540 ÷ 630	2,50	3,75 → 4,37	16,00	16,00
630 ÷ 720	2,50	4,37 → 5,00	16,75	16,75
720 ÷ 1080	2,50	5,00	17,16	17,16
1080 ÷ 1440	2,50 → 7,50	5,00	17,16	17,16 → 27,16
powyżej 1440	7,50	5,00	22,13	22,13

Zastosowanie tych walców powoduje, że kształtowanie bruzdy (w efekcie zwiększającej się wysokości zwoju h) następuje w czasie dwóch obrotów walców ($\Theta = 0^\circ \div 720^\circ$). Następnie w trakcie kolejnego obrotu ($\Theta = 720^\circ \div 1080^\circ$), przy zachowaniu parametrów zwoju, realizowane jest kalibrowanie pierścienia, w trakcie którego powinien on uzyskać pożądany kształt. W czasie czwartego obrotu walców ($\Theta = 1080^\circ \div 1440^\circ$) trzykrotnie zwiększa się szerokość zwoju, w efekcie czego powinno dojść do zerwania mostka łączącego poszczególne pierścienie. W dalszej części kształtującej walca (tj. dla $\Theta > 1440^\circ$) parametry zwoju nie ulegają zmianie, tamże oddzielony od tulei pierścień wyprowadzany jest z przestrzeni międzywalcowej.

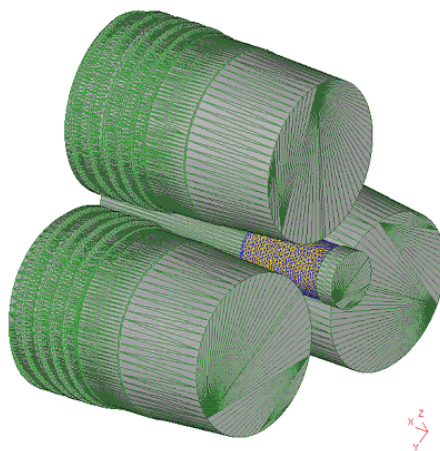
10.3.2. Przebieg kształtowania

Przebieg procesu kształtowania pierścieni w trójwalcowej walcarce skośnej zamodelowany został za pomocą MES. Na rys. 10.27 pokazano przyjęty w obliczeniach numerycznych model – na który składają się: trzy walce (rys. 10.26), trzpień stały o średnicy zewnętrznej $\varnothing 40$ mm, wsad i popychacz (niezbędny do wprowadzenia tulei w przestrzeń międzywalcową). Wsadem do walcowania jest tuleja grubościenna o średnicy zewnętrznej $\varnothing 57,2$ mm, średnicy wewnętrznej $\varnothing 44,4$ mm, długości 100 mm, wykonana ze stali w gatunku 100Cr6. Walce rozmieszczone są co 120° na promieniu 116 mm, w stosunku do środka tulei. Oś główna walców skreślana jest w stosunku do osi wsadu o kąt 3° .

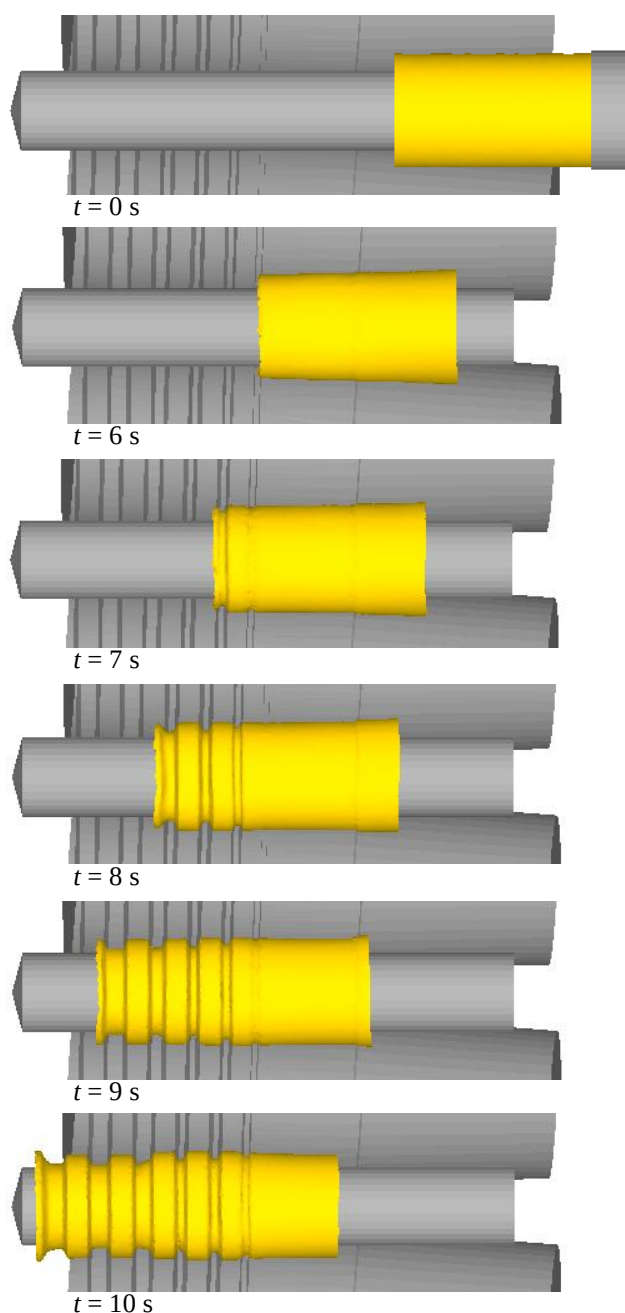
Dzięki zastosowaniu MES można prześledzić jak zmienia się kształt wyrobu w trakcie procesu walcowania pierścieni w trójwalcowej walcarce skośnej. Zmiany te pokazano na rys. 10.28.

Na początku procesu wsad chwytyany jest przez walce, które wprawiają go w ruch obrotowy i przemieszczają osiowo. Realizowany jest wówczas proces obrotowego obciskania trzema narzędziami, który trwa do momentu gdy w kontakt z metalem wchodzi trzpień stały. Wtedy rozpoczyna się redukcowanie grubości tulei, które jest najbardziej intensywne w momencie,

gdy metal kształtowany jest przez występ walców. W dalszej fazie walcowania w wyniku oddziaływania części cylindrycznej walca ma miejsce kalibrowanie tulei, która przyjmuje pożądany kształt pierścieniowy. Następnie w kontakt



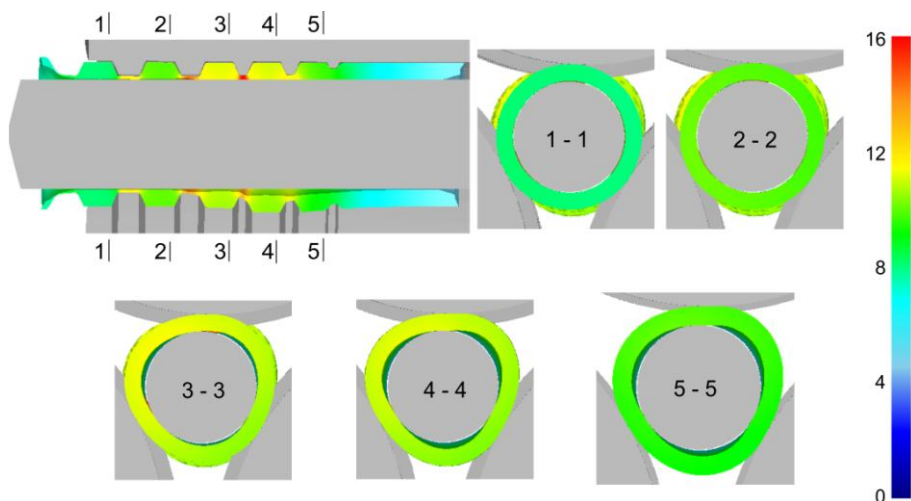
Rys. 10.27. Model geometryczny procesu walcowania skośnego pierścieni



Rys. 10.28. Zmiana kształtu tulei, w trakcie walcowania pierścieni w trójwalcowej walcarce skośnej (walec górny został ukryty), przy czasie t podanym na rysunku

z metalem wchodzą nawinięte śrubowo zwoje występu ($t=6\text{ s}$ –rys. 10.28). W efekcie wciskania występow w półwyrob dochodzi do ponownego zniekształcenia (trójkątowania) przekroju poprzecznego pręta. Efekt ten jest dobrze widoczny na rys. 10.29 (wykonanym dla czasu $t = 10\text{ s}$), gdzie pierścienie od strony stożkowej walca mają większą średnicę od pierścieni na wyjściu, w których trójkątowanie zostało skutecznie usunięte.

Na rys. 10.29 przedstawiono rozkłady odkształceń w płaszczyźnie wzdłużnej (przechodzącej przez oś walca górnego, oś wsadu oraz pomiędzy walcami dolnymi) i w płaszczyznach poprzecznych. Z rysunku wynika, że odkształcenia w pierścieniu mają względnie stałą wartość i nie zależą od współrzędnej promieniowej. Stosunkowo dużą wartość odkształceń w pierścieniu tłumaczy się intensywnym płynięciem metalu w niepożądanym kierunku stycznym. Oczywiście największe odkształcenia występują



Rys. 10.29. Strefa odkształcenia w fazie ustalonej ($t = 10$ s) procesu walcowania pierścieni w trójwalcowej walcarni skośnej, wraz z rozkładem intensywności odkształcenia

w mostkach łączących poszczególne pierścienie, gdzie metal jest intensywnie zgniatany i gdzie powinno mieć miejsce rozdzielenie materiału.

Na podstawie rysunku 10.29 można również dokładnie prześledzić jak zmienia się przekrój poprzeczny pierścienia w fazie kształtowania. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że występujące zniekształcenie (trójkątowanie) jest skutecznie usuwane w fazie kalibrowania, gdzie pierścień uzyskuje pożądany kształt. Ponadto, w wyniku rozwałcowania pierścienia jego średnica wewnętrzna nieznacznie wzrasta. W efekcie pojawia się luz między pierścieniem a trzpieniem i nie ma problemów związanych z wyprowadzeniem półwyrobów z przestrzeni roboczej walców.

Walcowanie śrubowe wykorzystywane jest także w produkcji masowej kul stosowanych na mielniki do młynów kulowych. Problematyka tego procesu kształtowania plastycznego jest obszernie opisana w monografii [60].

11. Nagniatanie

W procesach nagniatania odkształceniu plastycznemu ulega wyłącznie warstwa zewnętrzna przedmiotu. Pozostała część wyrobu obrabianego pozostaje sztywna, bądź odkształca się sprężysto. W konsekwencji takiego stanu rzeczy wymiary gabarytowe przedmiotu praktycznie nie ulegają zmianie. W praktyce wyróżnia się dwie grupy procesów nagniatania. Do pierwszej z nich zalicza się procesy mające na celu polepszenie własności warstwy wierzchniej, które następuje w efekcie jej umocnienia i wygładzenia, jak również wytworzenia w wyrobie korzystnego stanu naprężeń własnych. Do drugiej grupy wchodzi zaś procesy prowadzące do zmiany kształtu warstwy wierzchniej, w wyniku wykonania w niej wzniesień i wgłębień o określonym kształcie, np. w postaci gwintów, wielokarbów, uzwojeń ślimaków, uzębień itp.

Zgodnie z definicją warstwą wierzchnią jest ta część materiału, która jest ograniczona z jednej strony rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, a z drugiej materiałem rdzenia. Warstwa wierzchnia składa się z kilku stref przechodzących płynnie jedna w drugą, o zróżnicowanych wymiarach i odmiennych cechach fizyko-mechanicznych (niekiedy również chemicznych) od cech rdzenia. Grubość warstwy wierzchniej może osiągać nawet kilka milimetrów, przy czym jest to uzależnione od zastosowanej obróbki (plastycznej, mechanicznej, cieplnej lub cieplno-chemicznej).

11.1. Wygładzanie powierzchni

Wygładzanie powierzchni następuje wskutek miejscowego odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej przedmiotu, będącego następstwem nacisku wywartego (przez odpowiednio ukształtowane narzędzie) na powierzchnię tegoż przedmiotu.

11.1.1. Metody wygładzania

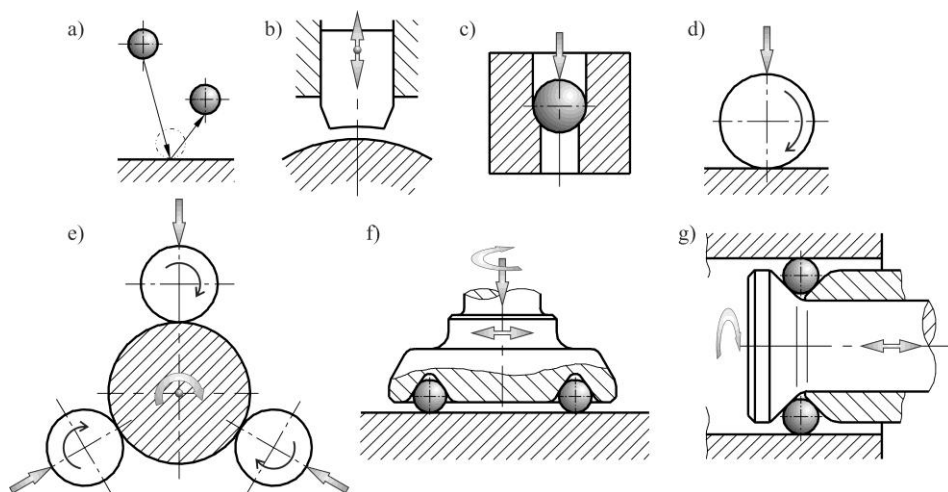
W praktyce wykorzystywane są dwie metody nagniatania, tj. dynamiczne oraz statyczne. Podczas nagniatania dynamicznego materiał jest odkształcany

poprzez następujące po sobie kolejne uderzenia narzędzi, które mogą się poruszać w sposób swobodny (np. w postaci strumienia kulek – rys. 11.1a) lub kierowany przez odpowiednio ukształtowane prowadnice (rys. 11.1b). Tą metodą można nagniać powierzchnie tak płaskie jak i cylindryczne, czemu towarzyszy jednak dość znaczny hałas, a uzyskana dokładność powierzchni jest niezbyt duża (szczególnie, gdy korzysta się ze strumienia kulek). Nagniatanie dynamiczne swobodne powoduje również nierównomierność umocnienia warstwy wierzchniej.

W procesie nagniatania statycznego odkształcenie plastyczne wywołane jest poprzez stały lub pulsacyjny nacisk narzędzia, które może się ślizgać lub toczyć po powierzchni przedmiotu obrabianego (rys. 11.1c, d). W praktyce przemysłowej najszersze zastosowanie znalazły metody tocznego nagniatania statycznego realizowanego narzędziami w kształcie kulki, rolki lub krążka. Schematy takich procesów pokazano na rys. 11.1d-g.

Nagniatanie toczne powierzchni zewnętrznych lub wewnętrznych realizowane jest często za pomocą głowic rolkowych (rys. 11.2). Pozwalają one wygładzać powierzchnie elementów ze stali, staliwa, żeliwa, stopów miedzi, stopów aluminium i innych materiałów o twardości wyjściowej <40 HRC oraz wydłużeniu względnym $A_5 > 6\%$. Proces ten odznacza się szeregiem zalet, do których zalicza się:

- dużą wydajność obróbki;
- możliwość uzyskania powierzchni o bardzo małej chropowatości, dla której $R_a = 0,32 \pm 0,04 \mu\text{m}$;



Rys. 11.1. Metody nagniatania prowadzonego celem wygładzenia powierzchni, realizowanego przez: a) i b) uderzenie, c) poślizg, d) - g) toczenie [16]



Rys. 11.2. Przykład wygładzania powierzchni zewnętrznej wałka (po lewej) oraz głowice rolkowe wykorzystywane w procesach nagniatania tocznego (po prawej) [94]

- ❑ brak pozostałości narzędzi obróbczych, ziaren ścierniwa, narostów, wiórów na powierzchni obrabianej;
- ❑ podwyższenie odporności na zużycie ścierne, zmęczenie powierzchniowe i korozję;
- ❑ dużą żywotność narzędzi – głowic nagniatających;
- ❑ możliwość stosowania głowic nagniatających w uniwersalnych obrabiarkach skrawających;
- ❑ ograniczenie pracochłonnych operacji obróbki wykańczającej (honowania, szlifowania, dogładzania, polerowania).

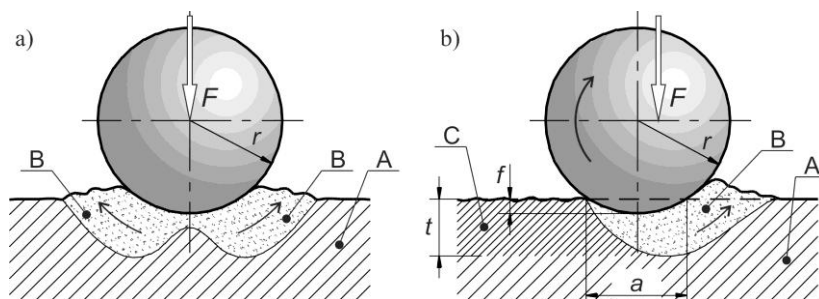
11.1.2. Odkształcenia warstwy wierzchniej

Charakterystyka ogólna procesu wygładzania

Przebieg odkształcania warstwy wierzchniej materiału podczas wgłębiania kulki uderzającej w powierzchnię przedmiotu pokazano na rys. 11.3 a. W efekcie oddziaływania kulki materiał jest wypychany na zewnątrz powstającego zagłębienia. Przemieszczenie materiału wywołuje jego odkształcenia, które są trwałe w obszarze B oraz sprężyste w strefie A. W przypadku, gdy kulka toczy się po powierzchni przedmiotu (rys. 11.3 b) wypiętrzenie uplastycznionego materiału (strefa B) następuje przed kulką. Płynięcie materiału jest w tym przypadku bardziej złożone i prowadzi do równomiernej zmiany struktury i własności warstwy wierzchniej na grubości t (obszar C).

Poddana wygładzaniu warstwa wierzchnia charakteryzowana jest przez następujące parametry:

- ❑ Grubość warstwy umocnionej t , która jest proporcjonalna do szerokości styku materiał-narzędzie a , która zależy od nacisku F wywartego przez kulkę. Natomiast wpływ krzywizny narzędzia (promienia r) na grubość tej warstwy jest mało istotny.

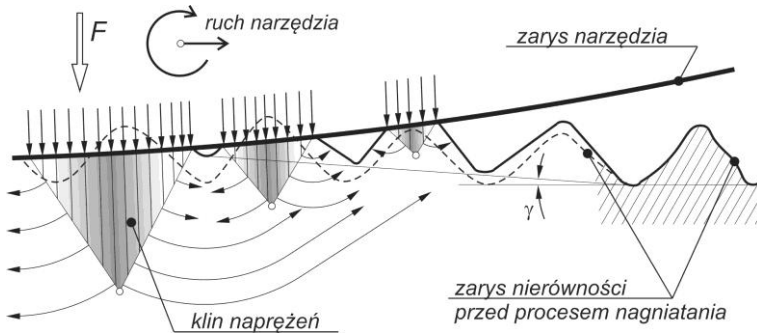


Rys. 11.3. Schematyczne przedstawienie odkształcenia warstwy wierzchniej materiału przy nagniataniu kulka: a) statycznym, b) tocznym [16]

- ❑ Gradient umocnienia. Umocnienie materiału w warstwie odkształconej zmienia się wzdłuż jej grubości. Przyjmuje ono największą wartość na powierzchni przedmiotu i najmniejszą na styku z warstwą nieumocnioną A. Wartość umocnienia jest silnie związana z odkształceniem materiału (zagłębieniem f), które zależne jest od krzywizny narzędzia. Zmniejszenie promienia kulki r (przy stałym nacisku F) powoduje wzrost gradientu umocnienia warstwy wierzchniej.
- ❑ Rozkład naprężeń własnych. W efekcie oddziaływania narzędzi (rolki, kulki) warstwa wierzchnia wykazuje tendencję do wydłużenia, któremu przeciwdziałają nieodkształcone plastycznie warstwy materiału. Taki stan rzeczy powoduje, iż w warstwie utwardzonej pojawiają się naprężenia ściskające równoważone przez naprężenia rozciągające, występujące w materiale nieodkształconym plastycznie. Największe naprężenia ściskające występują tuż przy powierzchni wyrobu.
- ❑ Rozkład mikropęknięć. Umocnienie materiału wywołane zgniotem warstwy wierzchniej powoduje także zwiększenie liczby i wielkości mikropęknięć, co jest niekorzystne ze względu na wytrzymałość zmęczeniową przedmiotu. Szczególnie niebezpieczna sytuacja występuje wtedy, gdy odkształcenie plastyczne przekroczy wartość krytyczną, np. wskutek zbyt dużego nacisku lub zbyt małego posuwu prowadzącego do wielokrotnego odkształcenia materiału. Wówczas na powierzchni obrabianej przedmiotu powstaje siatka mikropęknięć, a czasami dochodzi nawet do łuszczenia powierzchniowego.

Przebieg odkształcania nierówności podczas wygładzania tocznego

Podczas oddziaływania narzędzia nagniatającego na nierówności powierzchni materiału (rys. 11.4) następuje ich odkształcenie plastyczne, wywołujące przestrzenne (tj. w trzech kierunkach) płynięcie metalu w mikroobszarach. Odkształcenia te powstają tylko w warstwie wierzchniej materiału, a jednym



Rys. 11.4. Schemat rozmieszczenia sił wewnętrznych i przebieg odkształcania nierówności powierzchni materiału w procesie nagniatania tocznym krawężnikiem o dużym promieniu [66]

z tego powodów jest dużo większa twardość narzędzia od twardości wygładzanego materiału.

Narzędzie nagniatające, np. krawężnik (rys. 11.4), w chwili rozpoczęcia procesu wygładzania styka się z grzbietami nierówności powierzchni materiału początkowo na niewielkim odcinku wzdłuż swojej tworzącej. Długość tego odcinka styku wzrasta w czasie przemieszczania się narzędzia, zgodnie z kierunkiem posuwu, aż do częściowego bądź całkowitego odkształcenia nierówności. Siły tarcia powstające na powierzchni styku narzędzia z materiałem utrudniają odkształcenie nierówności w kierunku obwodowym. Powstałe wskutek tego naprężenia styczne mają największą wartość na powierzchniach styku, natomiast maleją w głąb materiału tworząc charakterystyczne dla ściskania kliny naprężeń. Wzrastające naciski na powierzchni styku narzędzie-nierówności powodują plastyczne płynięcie materiału przylegającego do boków tych klinów w kierunku swobodnej powierzchni wrębów nierówności. Wynikiem takiego układu sił oraz sposobu płynięcia materiału jest podnoszenie się wrębów nierówności o kąt γ , zgodnie z rys. 11.4 [66].

W procesie nagniatania tocznego można wyodrębnić trzy fazy odkształcania nierówności obrabianego materiału w strefie wygładzania:

- W początkowej fazie odkształcania nierówności w przekroju osiowym narzędzie wywiera duże naciski powierzchniowe na wierzchołki nierówności, w rezultacie czego tworzy się wewnętrzna siatka linii poślizgów, wywołujących odkształcenia plastyczne. Wraz ze wzrostem nacisku narzędzia nierówności są spęczane, aż do momentu całkowitego ich odkształcenia.
- W kolejnej fazie nagniatania, w wyniku dalszego wzrostu nacisków wywieranych na materiał, cząsteczki metalu przemieszczają się w kierunku najmniejszych oporów – tj. ku swobodnym powierzchniom wrębów nierówności. Prowadzi to do ich stopniowego podnoszenia (tzw. wypełniania) w kierunku płaszczyzny styku z narzędziem.

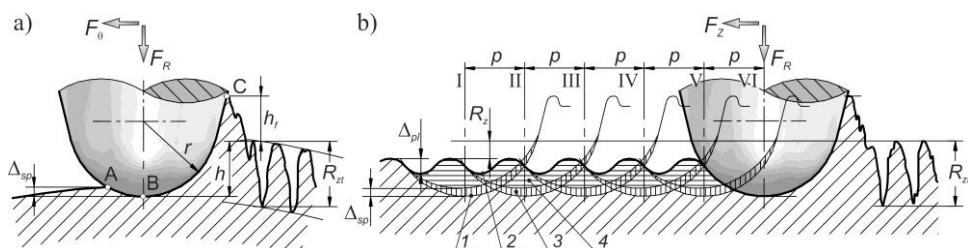
- ❑ W końcowej fazie nagniatania, kiedy wypełnione wręby znajdują się już w strefie największych nacisków, następuje poślizg wzdłuż powierzchni styku narzędzie-materiał i płynięcie metalu w kierunku posuwu oraz jednocześnie w kierunku ruchu obrotowego narzędzia. Przy dostatecznie dużych naciskach takie płynięcie materiału powoduje tworzenie się na powierzchni materiału spiętrzenia tuż przed narzędziem (rys. 11.3b).

Znaczny wpływ na odkształcenia nierówności w strefie nagniatania ma, poza parametrami technologicznymi procesu, także kształt i wielkość narzędzia. Stosując w tych samych warunkach technologicznych jako narzędzie krążki o różnych kształtach, osiąga się różny stopień odkształcenia nierówności [66]:

- ❑ częściowe odkształcenie nierówności, gdy narzędzie ma zbyt duży promień profilu i nie jest w stanie wytworzyć niezbędnych nacisków dla pełnego odkształcenia trwałego nierówności – celem takiego odkształcenia jest uzyskanie efektu gładkościowego;
- ❑ całkowite odkształcenie, gdy narzędzie wywiera dostatecznie duże naciski powierzchniowe w strefie wygładzania, co powoduje, że nierówności są całkowicie i trwale odkształcone, a na powierzchni materiału powstaje nowy profil nierówności o odstępach między tymi nierównościami równymi wartości posuwu narzędzia wygładzającego – celem odkształcenia całkowitego jest umocnienie warstwy wierzchniej powodujące wzrost jej twardości.

Przebieg odkształcania nierówności podczas wygładzania ślizgowego

Schemat odkształceń nierówności podczas wygładzania ślizgowego kulistym narzędziem dla przekroju poprzecznego i wzdłużnego (osiowego) przedstawiono na rys. 11.5 [66]. W chwili utraty kontaktu powierzchni materiału z narzędziem następuje jej sprężyste przemieszczenie Δ_{sp} w kierunku przeciwnym do siły nagniatania F_R . Kontakt materiał-narzędzie w płaszczyźnie poprzecznej (rys. 11.5a) istnieje wzdłuż linii ABC, która ma większą długość od strony natarcia ze względu na istnienie spiętrzenia h_f . Różnice obciążenia między częścią natarcia



Rys. 11.5. Schemat odkształceń nierówności podczas wygładzania ślizgowego narzędziem diamentowym: a) w przekroju poprzecznym, b) w przekroju wzdłużnym; I-VI – położenie narzędzia w kolejnych przejściach; R_{zt} , R_z – chropowatość powierzchni przed i po wygładzaniu; 1 – zarys śladu ruchu narzędzia, 2 – rzeczywisty zarys wygładzonej powierzchni, 3 – sprężyste przesunięcie Δ_{sp} powierzchni po przejściu narzędzia, 4 – nierówności odkształcone plastycznie [66]

(BC) i tylną (AB) narzędzia oraz siły adhezji i tarcia powodują powstanie siły stycznej F_θ . Chropowatość w rozpatrywanym przekroju jest bardzo mała i zależy głównie od chropowatości narzędzia.

Natomiast w przekroju wzdłużnym ruch narzędzia powoduje płynięcie metalu w obu kierunkach, co wskutek kolejnych kontaktów tej samej nierówności z narzędziem powoduje jej faliste ukształtowanie, gdzie odstęp falistości jest równy posuwowi osiowemu p . Kontakt materiał-narzędzie jest również różny po stronie prawej (natarcia) i lewej. Powoduje to zakłócenia równowagi sił działających w kierunku osiowym i powstanie siły F_z .

Wymiar przedmiotu wygładzonego zmniejsza się o wartość odkształcenia trwałego Δ_{pt} nierówności powierzchni. Chropowatość w tym przekroju zmniejsza się z R_{zt} do wartości R_z .

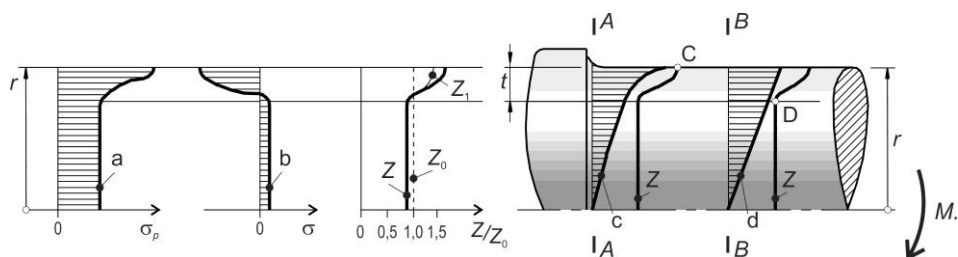
11.1.3. Własności wyrobów

W wyniku nagniatania powierzchni jej **gładkość ulega zwiększeniu**. Efekt ten jest dobrze widoczny na rys. 11.6, na którym przedstawiono profilogramy powierzchni toczzonej, nagniatanej jednokrotnie oraz dwukrotnie. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że w efekcie nagniatania chropowatość powierzchni toczzonej zmniejszyła się dziesięciokrotnie (z $20\ \mu\text{m}$ do $2\ \mu\text{m}$). Kolejne przeprowadzone nagniatanie powierzchni zmniejszyło chropowatość, aż do wartości $0,1\ \mu\text{m}$ (taki zabieg stosowany jest w przypadku powierzchni współpracujących z uszczelnieniami).

Nagniatanie powierzchni w sposób istotny wpływa także na **wytrzymałość zmęczeniową** wyrobów. Wpływ ten można prześledzić na przykładzie osi o powierzchni nagniatanej, która podczas pracy obciążona jest momentem zginającym M (rys. 11.7), wywołującym w materiale (po uwzględnieniu ruchu obrotowego osi) naprężenia cyklicznie zmienne. W efekcie przeprowadzonego nagniatania zmianie uległa granica plastyczności materiału oraz pojawiły się naprężenia własne. Rozkłady tych wielkości przedstawiono na rys. 11.7 za pomocą krzywych, oznaczonych odpowiednio przez a i b . Na rysunku tym zaznaczono także wytrzymałość zmęczeniową wałka przed nagniataniem (krzywa Z_0), wzrost tej wytrzymałości wywołany



Rys. 11.6. Profilogramy powierzchni: a) toczzonej, b) nagniatanej rolką, c) dwukrotnie nagniatanej rolką [16]



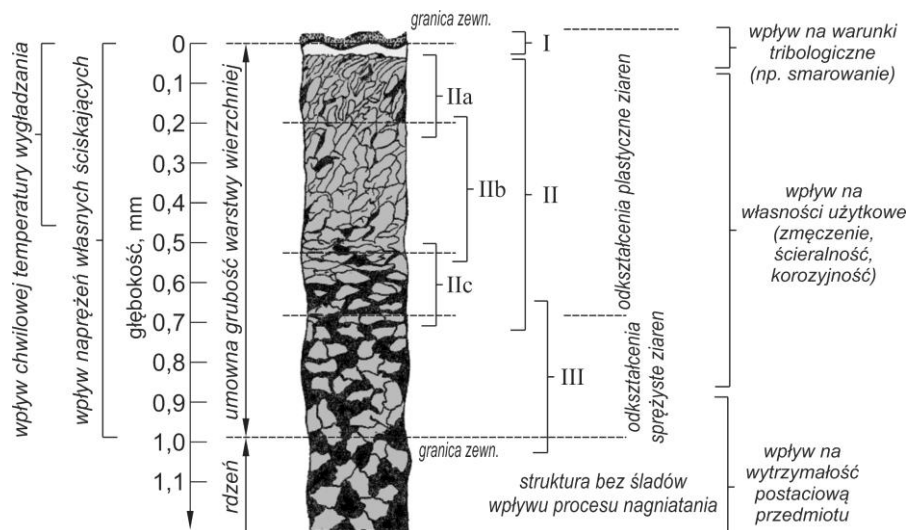
Rys. 11.7. Schemat wyjaśniający wzrost wytrzymałości zmęczeniowej osi, której powierzchnia została wygładzona przez nagniatanie [16]

umocnieniem materiału (krzywa Z_1) oraz rzeczywistą wytrzymałość zmęczeniową osi, uwzględniającą wpływ naprężeń własnych (krzywa Z). Uzyskana w efekcie nagniatania wytrzymałość zmęczeniowa warstwy wierzchniej jest większa niż warstwy centralnej, co jest korzystne ze względu na występujący rozkład naprężeń gnących (największych przy powierzchni i zmniejszających się do zera w osi gięcia), zilustrowanych krzywymi c (przekrój A-A przechodzący przez karb wywołany stopniowaniem osi) oraz d (przekrój B-B leżący poza karbem). Widoczne jest, iż krzywa c najbardziej zbliżona jest do krzywej Z na powierzchni osi, tam też należy oczekiwać pojawienia się pierwszych pęknięć zmęczeniowych. Natomiast największe zbliżenie krzywych d i Z następuje na głębokości t (grubość warstwy umocnionej). Oznacza to, że pęknięcia zmęczeniowe poza karbem będą inicjowane pod powierzchnią osi poddanej zginaniu.

Wynikiem procesu nagniatania są również istotne zmiany **strukturalne warstwy wierzchniej** [66]. Warstwa ta różni się od rdzenia mikrostrukturą, własnościami fizycznymi, a niekiedy także chemicznymi – np. po nagniataniu elektromechanicznym. Różnice te w sposób schematyczny pokazano na rys. 11.8.

W stosunku do rdzenia w warstwie wierzchniej jest inny przede wszystkim stopień zgniotu oraz stan końcowy naprężeń własnych. W zasadzie głębokość zalegania naprężeń własnych ściskających determinuje głębokość warstwy wierzchniej. Naprężenia te, jako skutek nagniatania, rozprzestrzeniają się na ogół na większych głębokościach h_σ , niż głębokość zgniotu h_{HV} , przy czym zależy to od rodzaju materiału oraz siły i sposobu nagniatania. Przykładowo, dla krążkowania stali C35 z siłą docisku $F = 1,47$ kN głębokość h_σ jest 1,4 razy większa od h_{HV} . Natomiast dla stali do ulepszania, poddanych nagniataniu po toczeniu, stosunek h_σ/h_{HV} wynosi ok. 1,6.

Cechą charakterystyczną mikrostruktury warstwy wierzchniej powstałej w wyniku nagniatania jest jej strefowa budowa, występująca szczególnie wyraźnie w stalach o strukturze ferrytyczno-perlitycznej (rys. 11.8). W warstwie wierzchniej można wyróżnić następujące strefy:



Rys. 11.8. Schemat struktury warstwy wierzchniej po procesie nagniatania oraz charakterystyczne strefy wpływające na własności fizyczne wyrobu: I – strefa rozdrobnienia, II – strefa odkształceń plastycznych ziaren, III – strefa odkształceń sprężystych ziaren [66]

- ❑ Rozdrobnienia (I), stanowiącą zewnętrzną strefę warstwy wierzchniej, która składa się z podstref: zewnętrznej, zawierającej dipolowe cząsteczki pochodzenia organicznego absorbowane przez powierzchnię metalu, co wpływa na polepszenie warunków smarowania; tlenków metali, stanowiącą ochronę antykorozyjną oraz warstwy Beilleby’ego, w której występują drobne i twarde cząsteczki amorficzne, powstałe wskutek rozdrobnienia ziaren (perlitu, austenitu szczątkowego lub martenzytu).
- ❑ Odkształceń plastycznych (II), będącą najgrubszą wymiarową warstwą, w której znajdują się najbardziej odkształcone plastycznie ziarna (krystality). Strefa ta składa się z trzech podstref: ukierunkowanej (IIa), powstałej w efekcie oddziaływania tarcia narzędzia o powierzchnię wyrobu; wykazującej teksturę (IIb), w której występują grupy krystalitów o jednakowo zorientowanych kierunkach krystalograficznych; nie wykazującej tekstury krystalitów (IIc).
- ❑ Odkształceń sprężystych (III), która jest warstwą pośrednią pomiędzy strefą zgniecioną a rdzeniem materiału wyrobu. W strefie tej występują naprężenia własne, spowodowane wzajemnym oddziaływaniem strefy plastycznej i rdzenia oraz wskutek ewentualnego wpływu chwilowej temperatury nagniatania.

Więcej informacji na temat teorii i technologii wygładzania powierzchni znaleźć można w monografii [66].

11.2. Kształtowanie warstwy zewnętrznej

Kształtowanie warstwy zewnętrznej (wgniatanie) wyrobu może być wykonywane tylko na małej jego części i na stosunkowo niewielkiej głębokości, jak również na prawie całej powierzchni i znacznej głębokości (rys. 11.9). Jako przedstawiciele wymienionych przypadków nagniatania można wymienić np. punktowanie oraz kształtowanie gwintów.



Rys. 11.9. Przykłady wyrobów, których powierzchnia zewnętrzna została ukształtowana przez nagniatanie [80]

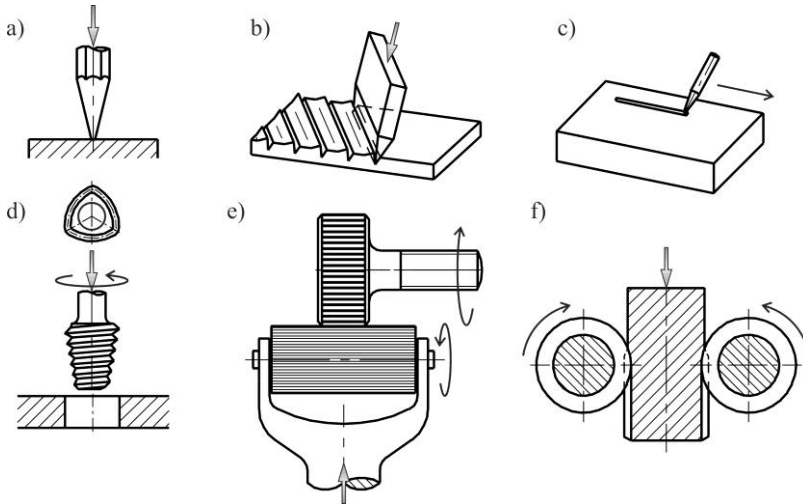
11.2.1. Przegląd metod kształtowania

Z uwagi na rodzaj ruchu wykonywanego przez narzędzie względem przedmiotu obrabianego wyróżnia się następujące metody kształtowania warstwy zewnętrznej:

- ❑ Narzędziami wykonującymi ruch posuwisto-zwrotny w kierunku prostopadłym lub skośnym do powierzchni obrabianej. Tego rodzaju ruch ma miejsce podczas punktowania (rys. 11.10a), wybijania różnego rodzaju znaków (cechowania) oraz wykonywania rowków (rys. 11.10b) – znajdujące szerokie zastosowanie przy produkcji pilników.
- ❑ Narzędziami ślizgającymi się po powierzchni obrabianej. Z tego rodzaju ruchem mamy do czynienia np. podczas trasowania (rys. 11.10c) lub wykonywania rowków śrubowych, jak w procesie nagniatania gwintu w otworze (rys. 11.10d).
- ❑ Narzędziami toczącymi się po powierzchni obrabianej. Tym sposobem wykonuje się radełkowanie powierzchni (rys. 11.10e), gwinty zewnętrzne, wieńce zębate oraz uzwojenia ślimaków. Uzębienia oraz wielokarby można wykonać także przez nagniatanie krążkami (o osiach prostopadłych do osi wyrobu), między którymi przepychany jest przedmiot obrabiany (rys. 11.10f)

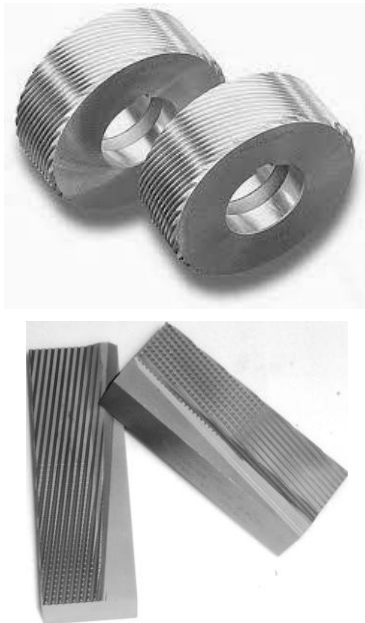
11.2.2. Kształtowanie gwintów

Gwinty zewnętrzne metodą nagniatania wykonuje się w procesach walcowania. Narzędzia służące do tego celu (najczęściej walce lub szczęki płaskie) mają



Rys. 11.10. Metody kształtowania warstwy zewnętrznej wyrobu: a) i b) narzędziami poruszającymi się ruchem posuwisto-zwrotnym, c) i d) narzędziami ślizgającymi się po powierzchni obrabianej, e) i f) narzędziami toczącymi się po powierzchni obrabianej [16]

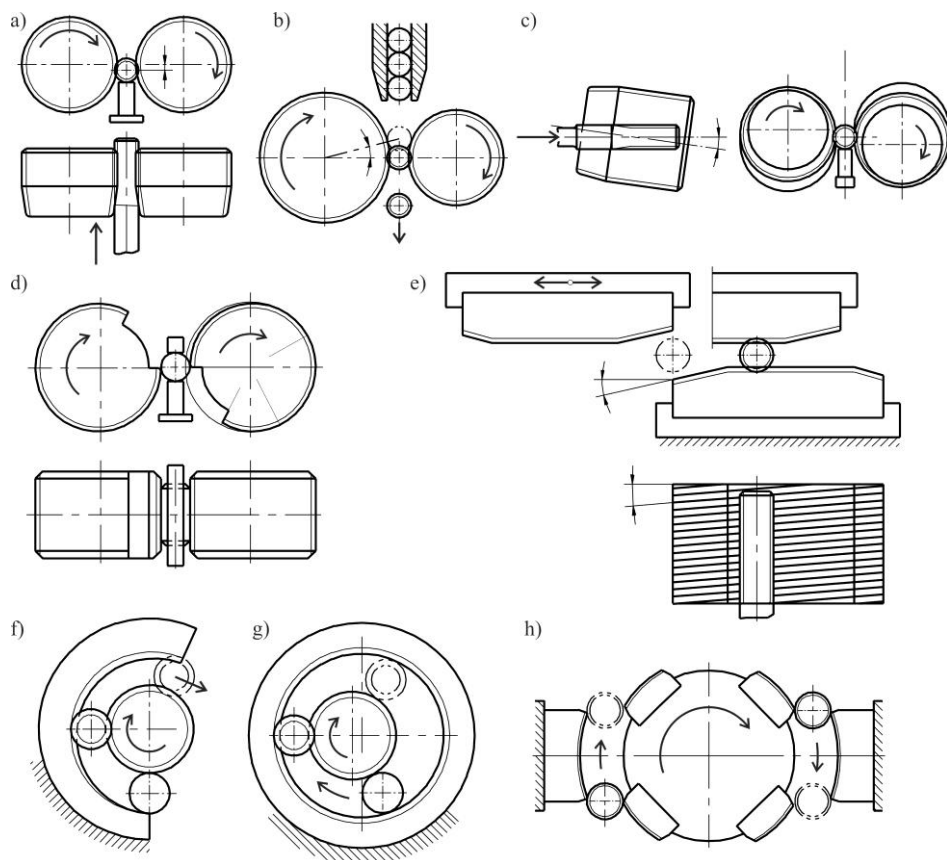
odpowiednio ukształtowaną (ponacinaną rowkami o przekroju poprzecznym odpowiadającym zarysowi gwintu) powierzchnię roboczą – rys. 11.11.



Rys. 11.11. Narzędzia stosowane do walcowania gwintu: rolki (powyżej) oraz segmenty płaskie (poniżej)

Kształtowanie gwintu można zrealizować za pomocą dwóch lub trzech walców (rolek). W praktyce przemysłowej dominuje metoda dwuwalcowa, realizowana na szereg sposobów, z których wybrane pokazano na rys. 11.12a-c. Ze względu na fakt, iż średnica walca jest znacznie większa od średnicy śruby gwint na narzędziach wykonywany jest jako wielozwojny, dzięki czemu kąt pochylenia linii śrubowej uzwojeń narzędzi i przedmiotu obrabianego jest jednakowy. W trakcie kształtowania zarówno walce, jak i przedmiot obrabiany obracają się, w efekcie czego materiał obtaczany jest po powierzchni roboczej narzędzi. Ukształtowanie gwintu w trakcie walcowania dwoma rolkami następuje w wyniku:

- zbliżania się jednego narzędzia do drugiego (rys. 11.12a);



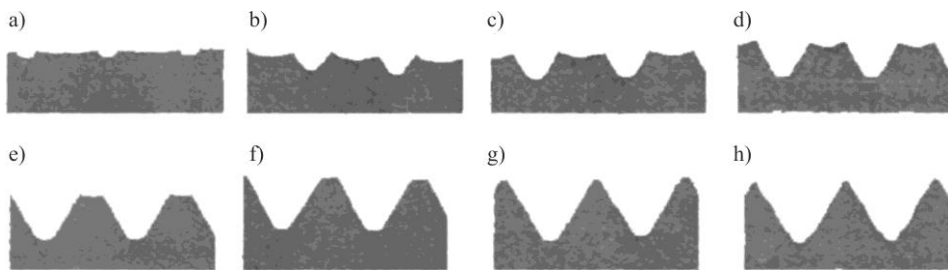
Rys. 11.12. Sposoby kształtowania (walcowania) gwintów zewnętrznych: a) dwoma rolekami o jednakowych średnicach, b) dwoma rolekami o różnych średnicach, c) dwoma rolekami o osiach skośnych, d) segmentami wypukłymi (mimośrodkowymi), e) segmentami płaskimi, f-h) segmentami o wklęsłej i wypukłej powierzchni roboczej (walcowanie planetarne)

- ❑ przemieszczania się śruby w kierunku pionowym wskutek różnic prędkości obwodowych rolek, mających różne średnice (rys. 11.12b);
- ❑ przesuwu osiowego materiału następującego w wyniku skośnego ustawienia rolek względem osi śruby (rys. 11.12c); w tym przypadku walcowania długość śruby może być dowolna i nie jest uzależniona od szerokości rolek, jak w poprzednio wymienionych procesach.

Gwinty zewnętrzne mogą być też ukształtowane w procesach walcowania segmentami, mającymi powierzchnie robocze wypukłe (rys. 11.12d), płaskie (rys. 11.12c) oraz wklęsłe (rys. 11.12f-h). Narzędzia te składają się z dwóch części, tj. kształtującej (charakteryzowanej przez stopniowy wzrost wysokości uzwojeń) oraz kalibrującej (o stałej wysokości uzwojeń). Walcowanie gwintu narzędziami segmentowymi jest wysokowydajne i dlatego jest stosowane

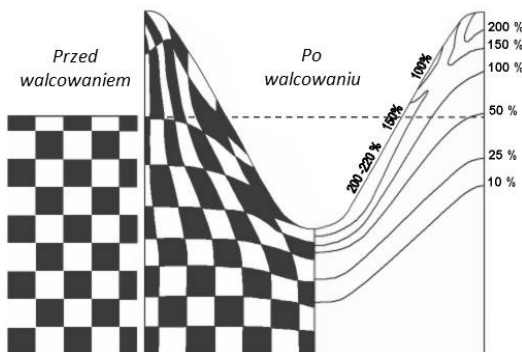
w produkcji masowej śrub i innych elementów gwintowanych (o małych gabarytach).

Niezależnie od rodzaju zastosowanych narzędzi walcowanie gwintu przebiega w sposób podobny. Można w nim wyróżnić dwa podstawowe etapy. W pierwszym z nich (kształtowanie) występy uzwojeń narzędzi zagłębiają się stopniowo w materiał (na ogół ze stałym posuwem), kształtując zagłębienia i przemieszczając materiał do występów gwintu. Kolejne fazy tego etapu pokazano na rys. 11.13a-f. W ostatniej fazie kształtowania posuw zmniejsza się do zera (w czasie odpowiadającym wykonaniu przez śrubę około $\frac{1}{2}$ obrotu) i zarys gwintu przyjmuje kształt pokazany na rys. 11.13g. W etapie drugim (kalibrowanie) celem nadania uzwojeniu ostatecznego kształtu i wymiarów śruba obtacza się pomiędzy narzędziami, które zachowują stałą odległość względem siebie (liczoną w kierunku normalnym do powierzchni roboczej użytych rolek lub segmentów). Pod koniec tego etapu gwint przyjmuje zakładany do uzyskania kształt, pokazany na rys. 11.13h.



Rys. 11.13. Kolejne fazy kształtowania gwintu w procesie walcowania (opis w tekście) [42]

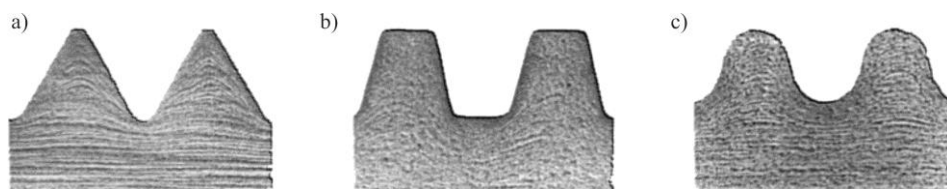
W procesie walcowania gwintu plastycznie odkształcany jest wyłącznie materiał w warstwach przypowierzchniowych, co prowadzi do jego umocnienia oraz silnego wydłużenia ziaren. Najbardziej materiał jest umocniony na powierzchniach bocznych występów oraz w pobliżu dna wrębów. Natomiast rdzeń śruby podlega wyłącznie odkształceniom sprężystym (rys. 11.14).



Rys. 11.14. Odształcenie plastyczne materiału w uzwojeniu gwintu otrzymanym metodą walcowania [48]

Warstwa wierzchnia materiału po walcowaniu gwintu ma zwiększoną twardość i charakteryzuje się obecnością ściskających naprężeń własnych. Podczas

walcowania otrzymuje się gwinty w klasie średniodokładnej i dokładnej (w zależności od użytej metody, dokładności narzędzi i średnicy śruby) o dużej gładkości powierzchni (parametr R_a mieści się w zakresie $0,08 \div 0,6 \mu\text{m}$), bardzo trudnej do uzyskania w procesach obróbki skrawaniem. Z wymienionych powodów oraz ze względu na korzystny ciągły układ włókien w obszarze ukształtowanego uzwojenia (rys. 11.15) gwinty walcowane mają znacząco większą wytrzymałość zmęczeniową w stosunku do otrzymywanych obróbką skrawaniem. Wadą tego procesu są ograniczenia w stosunku do wymogów stawianych materiałom przeznaczonych do walcowania gwintów. Muszą one cechować się wydłużeniem A_5 minimum 6%, a ich wytrzymałość na rozciąganie nie może przekraczać 1300 MPa. Nie nadają się materiały, które są kruche oraz miękkie (np. ołów).



Rys. 11.15. Rozkład włókien w gwintach zewnętrznych o zarysie: a) trójkątnym, b) trapezowym symetrycznym, c) okrągłym [42]

Za pomocą walcowania można także wytwarzać gwinty wewnętrzne, ale wówczas, gdy średnica otworu jest dostatecznie duża (powyżej M24). W tym celu wykorzystywane są specjalne głowice trójrolkowe. W przypadku otworów mniejszych (o średnicy powyżej 3 mm) gwinty wykonuje się za pomocą narzędzi zwanych gniotownikami (rys. 11.10d). Więcej informacji na temat wygniatania gwintów wewnętrznych znaleźć można w monografii [41].

11.2.3. Kształtowanie uzębień

Metodami obróbki plastycznej można także wytwarzać uzębienia wielowypustów, kół zębatych i ślimaków. W tym celu stosuje się następujące metody [57, 91]:

- ❑ kucie na gorąco,
- ❑ kucie na zimno i wyciskanie,
- ❑ przepychanie, wgniatanie i przeciąganie,
- ❑ zginięcie na kowarkach rotacyjnych,
- ❑ wykrawanie dokładne,
- ❑ walcowanie na zimno uzębień w przyrządach,
- ❑ walcowanie wgłębne,
- ❑ walcowanie na zimno w walcarkach dwurolkowych,
- ❑ walcowanie trzema rolkami napędzanymi,
- ❑ walcowanie na zimno z równoczesnym poosiowym ściskaniem,

- ❑ walcowanie uzębień ślimakami (metoda Maag),
- ❑ walcowanie zębatkami (metoda Roto-Flo),
- ❑ walcowanie na gorąco w walcarkach dwuwalcowych.

Spośród wyżej wymienionych metod największe znaczenie ma kucie i walcowanie, przy czym kształtowanie uzębienia stanowi na ogół oddzielną operację kuźniczą i wymaga stosowania specjalistycznych maszyn i urządzeń. Omówienie problematyki kucia kół zębatych, realizowanego na gorąco znaleźć można w literaturze specjalistycznej, np. [62, 85, 87].

Jedną z szerzej stosowanych metod wytwarzania uzębienia na zimno jest walcowanie poprzeczne. W metodzie tej przedmiot obrabiany (wałek, koło itp.) obtaczany jest po powierzchni uzębionej narzędzi. W efekcie nacisku wywieranego przez wierzchołki zębów narzędzi następuje miejscowe uplastycznienie zewnętrznej warstwy materiału, w której w sposób stopniowy powstają wypukłości i zagłębienia o pożądanym zarysie. Rozróżnia się przede wszystkim walcowanie poprzeczne za pomocą:

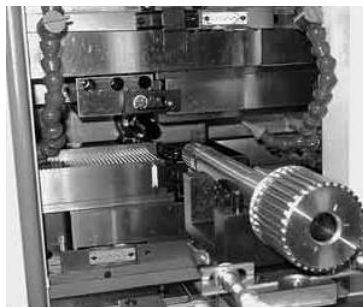
- ❑ dwóch obracających się w tę samą stronę walców o uzębieniu zewnętrznym, wykonujących także ruch posuwowy w kierunku osi wsadu (metoda wgłębna) – rys. 11.16;



Rys. 11.16. Walcowanie poprzeczne dwoma walcami (metoda wgłębna) koła zębatego o zębach skośnych [43]

- ❑ dwóch szczęk uzębionych wykonujących ruchy posuwisto-zwrotne (metoda Roto-Flo) – rys. 11.17.

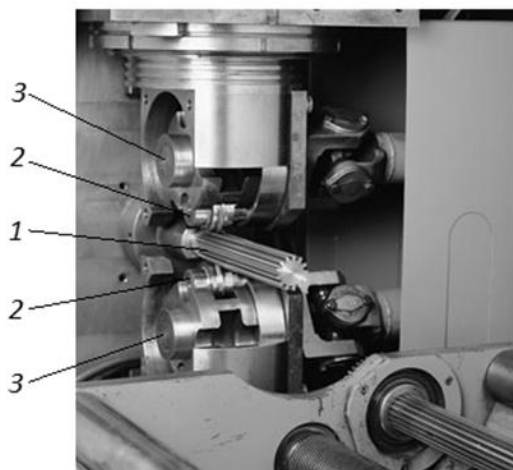
Znane i stosowane jest także walcowanie uzębienia metodą Groba (rys. 11.18). Kształtowanie uzębienia na wałku 1 następuje w efekcie kolejnych uderzeń dwóch



Rys. 11.17. Walcowanie uzębienia prostego metodą Roto-Flo (po lewej) oraz narzędzia wykorzystywane w tej metodzie kształtowania (po prawej) [89]

rolek 2, umieszczonych w obracających się przeciwnie walcach 3. Po każdym uderzeniu przedmiot obrabiany (wałek) 1 obracany jest wokół swej osi o jeden ząb w czasie, gdy walce 3 z umieszczonymi w nich rolkami 2 wykonują pozostałą część obrotu. Niezależnie od okresowego ruchu obrotowego przedmiot obrabiany przesuwa się powoli wzdłuż osi. Taka kinematyka ruchu narzędzi pozwala na kształtowanie uzębień na wałkach o dowolnej długości.

W przypadku kształtowania wielowypustów o niewielkiej liczbie zębów można zastosować metodę przepychania wałka pomiędzy umieszczonymi równomiernie na obwodzie rolkami (rys. 11.10f). Liczba rolek równa jest liczbie kształtowanych zębów, a ich zarys odpowiada zarysowi wrębu międzyzębnego. Podczas procesu przepychania w wyniku promieniowego nacisku rolek może dojść do osiowego wydłużenia materiału.



Rys. 11.18. Walcowanie uzębienia metodą Groba (opis w tekście) [13]

Literatura

1. Avitzur B. *Metal Forming. Processes and Analysis*. New York, Wyd. Mc Graw-Hill Book Co. 1968.
2. *Auto Tumbblast Series*, [W:] suite of C&J Machinery Co., Ltd., [dostęp październik 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.ycjixie.com/ProductShow.asp?ProBid=469>
3. Becker E. i in. *Metallurgical and mechanical analysis from thixoforging steel shape*. [W:] 11th ESAFORM2008 conference on material forming. Lyon, France. 23-25 April 2008.
4. Błaszowski K. i in. *Technologia materiałów. Obróbka bezwiórowa*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej 1987.
5. Boczarow J.A. *Prasy śrubowe*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1980.
6. Bochniak W., Korbel A., Błaż L., Brzostowicz A. *Wytwarzanie drobnoziarnistych wyrobów ze stopu aluminium 7075 w procesie wyciskania metodą KOBO*. Przegląd Mechaniczny, 2009 nr 10, s. 33-37.
7. Bochniak W., Korbel A. *Refinement and control of the metal structure elements by plastic deformation*. Scripta Materialia, 2004 vol. 8, s. 755-759.
8. Bosiacki K. *Kucie matrycowe na młotach*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Techniczne 1956.
9. Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A. *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Częstochowa, Wyd. Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej 2002.
10. Devjatov V., Dyja H., Stolubov V., Trusov P., Łabuda E. *Matematyczne modelowanie i optymalizacja procesów wyciskania*. Częstochowa, Wyd. Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej 2004.
11. Dobrucki W. *Zarys obróbki plastycznej metali*. Katowice, Wyd. Śląsk 1975.
12. Dobrzański L. *Metalowe materiały inżynierskie*. Warszawa, WNT 2004
13. Dyck S. Van, *The Case for Cold Rolling*, [W:] GEAR Solutions, [online], 2011 Nr 5 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6087/the-case-for-cold-rolling>

14. Dyja H., Banaszek G., Grynkevych V., Danchenko V. *Modelowanie procesów kucia swobodnego*. Częstochowa, Wyd. Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej 2004.
15. Erbel J. i in. *Encyklopedia technik wytwarzania stosowanych w przemyśle maszynowym*. Warszawa, OWPW 2001.
16. Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z. *Obróbka plastyczna*. Warszawa, Wyd. PWN 1981.
17. Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z. *Obróbka plastyczna na zimno*. Warszawa, Wyd. PWN 1977.
18. Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z. *Techniki wytwarzania. Obróbka plastyczna*. Warszawa, Wyd. PWN 1981.
19. Erbel S., Kuczyński K., Olejnik L. *Technologia obróbki plastycznej. Laboratorium*. Warszawa, OWPW 2003.
20. *Extrusion and Drawing of Metals [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-26 [dostęp lipiec 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch15.pdf
21. *Ferrous Metals and Alloys: Production, General Properties, and Applications [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-12 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch5.pdf
22. *Forging of Metals [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-26 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch14.pdf
23. *Furnace*, [W:] suite of Panapolytech Co., Ltd., [dostęp luty 2012]. Dostępny w World Wide Web: http://www.panapolytech.co.th/products/furnace_2.htm
24. *Głowice rolkowe do nagniatania*, [W:] strona Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.ios.krakow.pl/93,0,oferta.glowice-rolkowe-do-nagniatania.htm>
25. Golatowski T. *Projektowanie procesów tłoczenia i tłoczników. Wybrane zagadnienia*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej 1991.
26. Gołowin W.A., Mitkin A.N., Rieznikow A.G. *Wyciskanie metali na zimno*. Warszawa, Wyd. WNT 1973.
27. Gontarz A., Weroński W. *Kucie stopów aluminium. Aspekty technologiczne i teoretyczne procesu*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2001.
28. Hayama M. *Optimum working conditions in the cross rolling of stepped shaft*. Journal of Mechanical Working Technology, 1979 vol. 3, s. 31-46.
29. *Hot Forging Dies*, [W:] suite of Mechsoft Co., India, [dostęp maj 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.mechsoft.in/img/pbg7.JPG>

30. *Induction Heating Devices for High Frequency Induction Soldering, Brazing and Joining* [online], Wichary Technologies Sp. z o.o., luty: 2010, s. 1-12 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://wichary.eu/wichary/wp-content/files/wicharyPrzemysl/Wichary_-_grzanie_indukcyjne_EN.pdf
31. Kazanecki J. *Wytwarzanie rur bez szwu*. Kraków, Wyd. AGH 2003.
32. Kazanecki J., Pater Z. *Analiza termomechaniczna procesu walcowania pierścieni w trójwalcowej walcierce skośnej*. Rudy i Metale Nieżelazne, 2007 nr 11, s. 861- 866.
33. Kuzman K. *Metal working. Cold extrusion*, [W:] Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Wyd. Elsevier Science Ltd., 2001, s. 5495-5500.
34. Krzekotowski Z., Gałuszka M., Serwicki H. *Zarys kuźnictwa*. Katowice, Wyd. Górniczo – Hutnicze 1959.
35. Kwaśniewski B., Stankiewicz Z., Śpiewakowski J. *Obróbka plastyczna*. Bydgoszcz, Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno – Rolniczej 1986.
36. Laueand K., Stenger H. *Extrusion-Processes, Machinery, Tooling*. Ohio, American Society for Metals, Metals Park, 1981.
37. Leśniak D. *Analiza warunków zgrzewania podczas wyciskania stopów AlCuMg*. Seria Monografie nr 5/2012. Kraków, Wyd. Naukowe AKAPIT 2012.
38. Lipski T. *Kucie na kowarkach*. Warszawa, WNT 1979.
39. Lisowski J. *Walcowanie kuźnicze*. Warszawa, WNT 1974.
40. Liu J., Zhenshan C. *Hot forging process design and parameters determination of magnesium alloy AZ31B spur bevel gear*. Journal of Materials Processing Technology, 2009 vol. 209, s. 5871-5880.
41. Łyczko K. *Technologia narzędzi i wygniatania gwintów wewnętrznych*. Częstochowa, Wyd. Politechniki Częstochowskiej 1999.
42. Łyczko K. *Technologia walcowania gwintów zewnętrznych*. Warszawa, WNT 2010.
43. *Manufacturing Solutions for the Gear and Automotive Industries*, [W:] suite of the Great Lakes Gear Technologies, [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.greatlakesgeartech.com/rollingmachines.html>
44. Marciniak Z. *Mechanika procesów tłoczenia blach*. Warszawa, Państwowe Wyd. Naukowo – Techniczne 1961.
45. Marciniak Z. *Konstrukcja tłoczników*. Warszawa, Ośrodek Techniczny A. Marciniak Sp. z o.o. 2002.
46. Mądry Kazimierz. *Trawienie metali*, [W:] serwis Galwanizernie.pl, [dostęp październik 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.galwanizernie.pl/articles/41>

47. *MB Batch Type Tumbblast Machine*, [W:] suite of Wheelabrator , [dostęp październik 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www.wheelabratorgroup.com/pl/sites/wheelabrator/content/equipment/wheelblast/tumbblast_machines.aspx
48. *Metody plastyczne kształtowania gwintów*, [W:] Informacje techniczne, Grupa ASMET Sp. z o.o., [dostęp czerwiec 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://katalog.asmet.com.pl/info_all/1/gwintmp.html
49. Muller K. *Metal working. Extrusion*, [W:] Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Wyd. Elsevier Science Ltd., 2001, s. 5510-5515.
50. Muster A. *Kucie matrycowe. Projektowanie procesów technologicznych*. Warszawa, OWPW 2002.
51. *Nagrzewnice indukcyjne*, [W:] strona Wichary Technologies Sp. z o.o., [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://wichary.eu/wichary/wp-content/gallery/prz_linn_przetwornice-sredniej-czestotliwosci/thumbs/thumbs_grzanie-indukcyjne-teoria.jpg
52. *Nonferrous Metals and Alloys: Production, General Properties, and Applications [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-13 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch6.pdf
53. *Obróbka wibrościerna. Systemy ciągłe*, [W:] strona Euro-Solutions, [dostęp październik 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.obrobka-wibroscierna.pl/maszyny.php?show=ciaglepotokowe>
54. Okoniewski S. *Technologia maszyn*. Warszawa, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne 1998.
55. Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2009.
56. Pater Z. *Wybrane zagadnienia z historii techniki*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2011.
57. Pater Z., Gontarz A., Tomczak J. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o kształtach złożonych*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2011.
58. Pater Z., Gontarz A., Weroński W. *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno - klinowego*. Lublin, Wyd. LTN 2001.
59. Pater Z., Samołyk G. *Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2011.
60. Pater Z., Tomczak. *Walcowanie śrubowe kul do młynów kulowych*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2012.
61. Pater Z., Tomczak J. *Walcowanie poprzeczno-klinowe kul*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2012.
62. Pater Z., Tomczak J. *Analiza numeryczna procesu kucia stożkowego koła zębatego na prasie korbowej*. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2011 nr 2, s. 92-98.

63. Pawłowski J., Zgorzelski S. *Łocznictwo*. Warszawa, Wyd. PWSZ 1970.
64. *Piece przemysłowe wszelkich typów*, [W:] strona Przedsiębiorstwa Budowy Pieców Przemysłowych Piec-Bud Wrocław Sp. z o.o., [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www.piecbud.wroc.pl/pl/index.php?page=oferta_piece
65. Polański Z. *Wykrawanie. Podstawy teoretyczne i metody rozwojowe*. Warszawa, Wyd. WNT 1978.
66. Przybylski W. *Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie*. Warszawa, WNT 1979.
67. Przybyłowicz K. *Fizyczne podstawy odkształcania plastycznego metali*. Kraków, Wyd. AGH 1984.
68. *Rolling of Metals [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-26 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch13.pdf
69. Samołyk G. *Wybrane zagadnienia technologii i teorii prasowania obwiedniowego*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2012.
70. Samołyk G.: *Orbital Forging of a Sleeve-Type Part with a Simultaneous Flanging*. Steel Research International, 2012 Spec. Ed., s. 175-178.
71. Samołyk G.: *Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear*. Journal of Materials Processing Technology, 2013 vol. 213, s. 1692-1702.
72. Samołyk G., Pater Z. *Use of SLFET for design of flash gap with V-notched lands in a closed-die forging*. Journal of Materials Processing Technology, 2005 vols. 162-163, s. 558-563.
73. Samołyk G., Pater Z. *Rowek na wpływkę w kuciu matrycowym*. Lublin, Wyd. LTN 2005.
74. *Sheet-Metal Forming Processes [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-60 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch16.pdf
75. Sińczak J. i in. *Procesy przeróbki plastycznej*. Kraków, Wyd. Naukowe AKAPIT 2003.
76. Sińczak J. *Kucie dokładne*. Kraków, Wyd. AGH 2007.
77. Sleetx E., Kruth J.P. *Review of flash design rules for closed-die forgings*. Journal of Materials Processing Technology, 1992 vol. 31, s. 119-134.
78. Sobolewski J. i in. *Projektowanie technologii maszyn*. Warszawa, OWPW 2007.
79. Stadnik R. *Proces kształtowania elementów rurowych ciśnieniem cieczy*. Praca doktorska, AGH, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej 2008, maszynopis, przechowywany w Bibliotece AGH.

80. *Theading Machines*, [W:] suite of Complete Machine Tools Pty Ltd, [dostęp maj 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.completemachinetools.com.au/Product/thread-rolling>
81. *The pickling (passivation) of steel parts line*, [W:] suite of Modern Machine Shope, [dostęp październik 2013]. Dostępny w World Wide Web: www.mmsonline.com
82. *The Structure of Metals [online]*, University of Notre Dame, czerwiec: 2007, s. 1-21 [dostęp wrzesień 2013]. Dostępny w World Wide Web: http://www3.nd.edu/~manufact/MET%20pdf_files/MET_Ch1.pdf
83. Tsukamoto H., Morimoto K., Juge T., Takahashi K, *Application study on cross roll method for axi-symmetrical stepped shaft*. Advanced Technology of Plasticity, 1984 vol. 2, s. 936-941.
84. Tofil A. *Badania procesu mechanicznego dzielenia bezwiórowego metalowych prętów okrągłych*. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny 2007, maszynopis, przechowywany w Bibliotece Politechniki Lubelskiej.
85. Tomczak J. *Theoretical and experimental analysis of forming process of conical toothed wheels on a crank forging press*. Steel Research International, 2012 Spec. Ed., s. 151-154.
86. Tomczak J., Bartnicki J. *Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 2013.
87. Tomczak J., Łukasik K. *Numeryczna analiza obciążenia uzębionego wykroju narzędzia podczas kucia stożkowych kół*. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2011 nr 11, s. 920-925.
88. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. *Thermo-mechanical analysis of a lever preform forming from magnesium alloy AZ31*. Archives of Metallurgy and Materials, 2013 vol.57 Issue 4, s. 1211-1218
89. *Tooling*, [W:] suite of Roto-Flo, Detroit, [dostęp maj 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.roto-flo.com/tooling.html>
90. *Tumbling Barrel Products*, [W:] suite of USETEC, [dostęp październik 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://onlinecatalogue.usetec.com/en/maschinen.php?groupid=02001071&categorie=Tumbling%20Barrel>.
91. Turno A., Romanowski M., Olszewski M. *Obróbka plastyczna kół zębanych*. Warszawa, WNT 1973.
92. Wasiuńyk P. *Kucie matrycowe*. Warszawa, WNT 1980.
93. Wasiuńyk P. *Kucie na kuźniarkach*. Warszawa, WNT 1973.
94. Wasiuńyk P. *Walcownictwo i ciągarstwo*. Warszawa, WSiP 1981.
95. Wasiuńyk P., Jarocki J. *Kuźnictwo i prasownictwo*. Warszawa, Wyd. PWSZ 1969.

96. Wanga H., Gao L., Chen M. *Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid*. International Journal of Mechanical Sciences, 2011 vol. 53, s. 793-799
97. Weroński W., Schabowska K. *Technologia. Przeróbka plastyczna metali*. Cz. 2. Warszawa, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne 1989.
98. Weroński W. i in. *Obróbka plastyczna – Technologia*. Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej 1991.
99. Woźnica H. *Podstawy materiałoznawstwa*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2002.
100. *Wyciskanie części maszyn i wyrobów hutniczych [online]*, Politechnika Wrocławska, styczeń: 2008, s. 26-49 [dostęp czerwiec 2013]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.metalplast.pwr.wroc.pl/pliki/lab2.pdf>
101. Zhang S.H. i in. *Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures*. Journal of Materials Processing Technology, 2007 vol.185, s. 147-151.