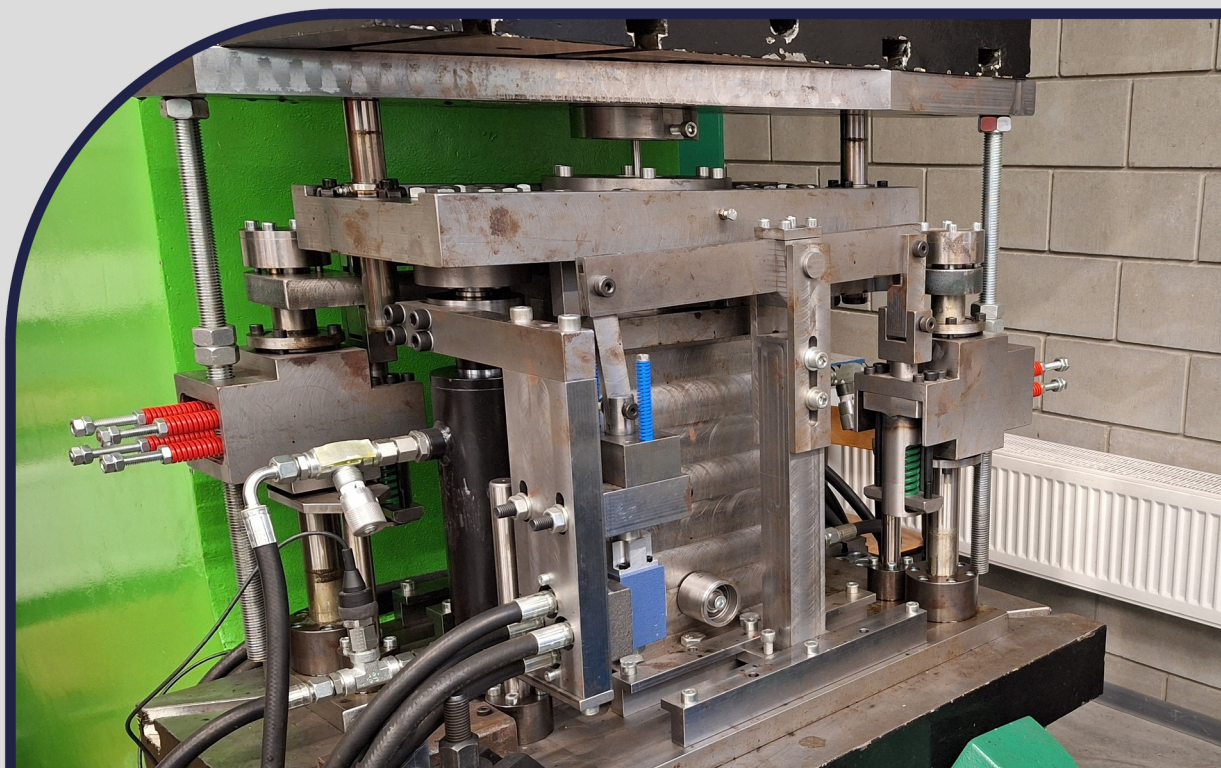


Studium procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

Grzegorz Winiarski



Studium procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:

Agnieszka Rzepka

Dyrektor CINT:

Katarzyna Weinper

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna Dudzińska

Małgorzata Franus

Arkadiusz Gola

Beata Kowalska

Grzegorz Komarzyniec

Jarosław Latański

Tomasz Lipecki

Zbigniew Łagodowski

Lucjan Pawłowski

Natalia Przesmycka

Halina Rarot

Magdalena Rzemieniak

Arkadiusz Syta

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena Chołojczyk

Karolina Famulska-Ciesielska

Katarzyna Pełka-Smętek

Studium procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

Grzegorz Winiarski



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Lublin 2025

Recenzenci:

dr hab. inż. **Piotr Szota**, prof. PCz, Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. **Eugeniusz Hadasik**, Politechnika Śląska

Autor:

dr inż. **Grzegorz Winiarski**, ORCID: 0000-0001-5286-6285
Politechnika Lubelska – ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Redaktor prowadzący: **Aleksandra Drozd**
Korekta językowa: **Filip Szałasek**
Skład i łamanie: **Katarzyna Pełka-Smętek**
Projekt graficzny serii: **Łukasz Maj**

Zdjęcie na okładce wykonane zostało przez autora.
O ile nie wskazano inaczej, rysunki stanowią opracowanie własne autora.

Publikacja wydana za zgodą **Rektora Politechniki Lubelskiej**

ISBN: 978-83-7947-659-6 (wersja drukowana)
ISBN: 978-83-7947-660-2 (wersja elektroniczna)
DOI: 10.35784/9788379476602
Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.wpl.pollub.pl
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

1. Wstęp	9
2. Przegląd metod plastycznego kształtowania wyrobów stopniowanych	13
2.1. Kształtowanie impulsem elektromagnetycznym	14
2.2. Kształtowanie hydromechaniczne	16
2.3. Kształtowanie z wykorzystaniem kowarek	19
2.4. Prasowanie obwiedniowe	21
2.5. Punktowe kształtowanie przyrostowe	23
2.6. Walcowanie kuźnicze	27
2.7. Wywijanie	33
2.8. Obciskanie	35
2.9. Zgniatanie obrotowe	38
2.10. Kształtowanie metodami kucia	42
2.11. Wyciskanie	44
2.12. Podsumowanie przeglądu literatury	49
3. Charakterystyka procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu	51
3.1. Spęczanie z wykorzystaniem wsadu w postaci pręta	51
3.2. Spęczanie z zastosowaniem wsadu w postaci rury	53
4. Badania wstępne	55
4.1. Wyznaczanie krzywej płynięcia stopu aluminium EN AW-6060	56
4.2. Określenie warunków tarcia	61
4.3. Analiza zjawiska wyboczenia wsadu w postaci pręta	65
4.4. Analiza zjawiska wyboczenia wsadu w postaci rury	69
5. Modelowanie numeryczne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu	73
5.1. Analiza numeryczna procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta	73
5.1.1. Metodyka badawcza	73
5.1.2. Wyniki analizy numerycznej	76
5.2. Analiza numeryczna procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci rury	104
5.2.1. Metodyka badawcza	104
5.2.2. Wyniki analizy numerycznej	107

6. Badania doświadczalne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu	131
6.1. Charakterystyka stanowiska badawczego	131
6.1.1. Analiza kinematyczna narzędzi	138
6.2. Badania doświadczalne procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta	144
6.3. Badania doświadczalne procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci rury	153
7. Przykład zastosowania technologii spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu	159
7.1. Kształtowanie odkuwki wału przeniesienia napędu	159
7.2. Kształtowanie odkuwki tulei obrotowej	164
8. Podsumowanie i wnioski	171
Literatura	173

Studium procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych dotyczących nowego procesu kształtowania wyrobów stopniowanych metodą spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Dokonano analizy stanu zagadnienia obejmującej przegląd metod wytwarzania odkuwek stopniowanych. Zaliczono do nich różne technologie realizowane z wykorzystaniem specjalistycznych lub uniwersalnych maszyn kuźniczych, w których jako wsad stosuje się odcinki prętów lub rur. Na podstawie wniosków wyciągniętych z przeglądu literatury opracowano nową metodę plastycznego kształtowania, która umożliwia wytwarzanie wyrobów pełnych i drążonych o zróżnicowanym przekroju poprzecznym na długości. Proces polega na spęczaniu, w trakcie którego strefa odkształcenia materiału zmienia swoje położenie dzięki odpowiedniej kinematyce narzędzi. Technologia realizowana jest z wykorzystaniem uniwersalnej prasy kuźniczej, w której montowany jest specjalistyczny przyrząd. Badania procesu rozpoczęto od analizy teoretycznej w oparciu o obliczenia wykonane metodą elementów skończonych. Na potrzeby budowy modelu numerycznego analizowanej metody wykonano badania wstępne, w których określono krzywą płynięcia materiału odkształcanego, wyznaczono warunki tarcia pomiędzy tym materiałem a narzędziami oraz przeanalizowano zjawisko wyboczenia wsadu w postaci odcinka pręta oraz rury, do jakiego może dojść w początkowej fazie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych dały podstawę do wykonania analizy teoretycznej procesu, którą ukierunkowano na określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych na przebieg procesu i jakość wyrobu. Na jej podstawie zaprojektowano i wykonano specjalistyczny przyrząd, dzięki któremu zrealizowano badania doświadczalne technologii. Wybrane podzespoły oprzyrządowania napędzane są za pomocą suwaka uniwersalnej prasy kuźniczej, podczas gdy pozostałe przemieszczają się wskutek sił generowanych przez siłowniki hydrauliczne, w które wyposażony jest przyrząd. Przeprowadzone badania doświadczalne, podobnie jak wspomniane obliczenia numeryczne, wykazały słuszność przyjętej koncepcji kształtowania odkuwek stopniowanych pełnych i drążonych. Możliwości aplikacyjne opracowanej technologii, poza elementarnymi odkuwkami, zostały przedstawione na przykładzie złożonych geometrycznie wyrobów, które wymagają formowania plastycznego rozłożonego na kilka etapów. Zrealizowane prace zostały podsumowane stosownymi wnioskami.

Słowa kluczowe: obróbka plastyczna, spęczanie, wyciskanie, kształtowanie wałów stopniowanych.

Study of a new upsetting process conducted with varying position of the deformation zone

Abstract

This monograph presents the numerical and experimental results of a study investing a new upsetting process for stepped parts that is conducted with varying position of the deformation zone. In the beginning, a state of the art of the problem is given, with a review of manufacturing methods for stepped parts, including various techniques that use sections of rods or tubes as starting material and are conducted on specialized or universal forging machines. Based on the conclusions drawn from the literature review, a new forming method is developed, which makes it possible to produce solid and hollow parts that have a variable cross section over their length. The new method is based on upsetting in which the deformation zone changes its position as a result of tool kinematics. The process is carried out on a universal forging press in which a specially designed instrument is mounted. First, a theoretical analysis is performed based on calculations made by the finite element method. The preliminary calculations are performed in order to design a numerical model of the proposed method. The following are determined: the flow curve of the deformed material and friction conditions between the workpiece and the tools. In addition, the buckling of the workpiece (both a rod and a tube) that can occur at an early stage of the upsetting process conducted with the position-changing deformation zone is analyzed. Obtained numerical results are then used to determine the impact of selected technological parameters on the course of the upsetting process and product quality. In effect, a specialized instrument is designed and constructed for carrying out experiments to validate the proposed technique. Some components of the instrument are driven by a universal forging press slide, whereas others are driven by forces that are generated by hydraulic cylinders of this instrument. Similarly to the numerical results, experimental findings have shown that the proposed method can be used for forming both solid and hollow stepped parts. After that, potential applications of the developed technique are demonstrated, showing that the new method can also be used for manufacturing geometrically complex products that are formed in several stages. Finally, relevant conclusions are presented.

Keywords: metal forming, upsetting, extrusion, forming stepped shafts.

1. Wstęp

Metody plastycznego kształtowania odkuwek wyrobów stopniowanych umożliwiają wytwarzanie szerokiego asortymentu części znajdujących zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Przykładowymi obszarami aplikacji tego typu odkuwek są przemysł lotniczy, górniczy, maszynowy, rolniczy, motoryzacyjny. Stopniowane wyroby drażone oraz pełne wykorzystywane są m.in. jako wały przekładni mechanicznych, półosie napędowe, tuleje centrujące, wałki rozrządu, sworznie kuliste, tuleje obrotowe itp. Różnorodność stosowanych produktów wymaga unikalnego podejścia w projektowaniu technologii ich wytwarzania. Typowymi metodami plastycznego kształtowania tego typu części są m.in. kucie, walcowanie kuźnicze, wyciskanie, prasowanie obwie-dniowe itp. Poszczególne metody umożliwiają produkcję określonych typów odkuwek, dzięki czemu znajdują one określone zastosowanie. Każda z technik wytwarzania wymaga zastosowania narzędzi o ściśle określonej budowie oraz maszyn o stosownej charakterystyce i kinematyce pracy. Budowa oprzyrządowania jest nieodłącznie związana z geometrią wyrobu oraz metodą, jaką został ukształtowany. Stosowane narzędzia to najczęściej różnego rodzaju matryce, stemple, pojemniki, walce, płyty itp. Montowane są one w specjalistycznych bądź uniwersalnych maszynach (prasy mechaniczne, prasy hydrauliczne, młoty matrycowe, walcarki, kuźniarki, kowarki, agregaty specjalistyczne itp.). Wypo-sażenie zakładu produkcyjnego w odpowiednie zaplecze narzędziowe i maszy-nowe związane jest ze stosunkowo dużymi kosztami wynikającymi z zakupu

tych komponentów. W określonych przypadkach konieczne jest wytworzenie wyrobu trudnego do wykonania dostępnymi technologiami, w związku z czym ww. nakłady niejednokrotnie intensyfikują się z uwagi na konieczne do przeprowadzenia prace projektowe oprzyrządowania, niekiedy unikalnych maszyn czy przyrządów. Z tego względu poszczególne konwencjonalne metody często poddawane są różnym modyfikacjom mającym na celu zwiększenie zakresu ich stosowalności, eliminację zjawisk ograniczających, poprawę jakości wyrobu czy też zmniejszenie materiałochłonności lub energochłonności procesu. W związku z powyższym, zarówno ośrodki naukowe, jak i zakłady przemysłowe dążą do poszukiwania nowych i coraz bardziej uniwersalnych technologii, dzięki którym zwiększa się możliwości wykorzystania technik obróbki plastycznej w procesach produkcyjnych, a tym samym minimalizuje koszty związane z uruchomieniem produkcji danej części. Istotnym aspektem w tym zakresie jest również elastyczność, dzięki której w krótkim czasie i przy niewielkich kosztach możliwe jest uruchomienie produkcji nowych wyrobów.

Mając na uwadze aktualne trendy badawcze i oczekiwania przemysłu, w niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych dotyczących nowej, autorskiej metody kształtowania odkuwek stopniowanych. Polega ona na spęczaniu ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Proces realizowany jest w specjalistycznym przyrządzie montowanym w uniwersalnej prasie kuźniczej. Jego modułowa konstrukcja, zapewniająca odpowiednią kinematykę narzędzi, umożliwia kształtowanie wyrobów drażonych i pełnych o zróżnicowanym przekroju poprzecznym. Zmiana geometrii odkuwki możliwa jest dzięki wymianie pojedynczych elementów przyrządu, co nie wymaga dużych nakładów finansowych, dzięki czemu technologia jest dość uniwersalna.

Uzyskane rezultaty badań zostały przedstawione w ośmiu ponumerowanych rozdziałach niniejszej monografii. Po krótkim wstępie stanowiącym pierwszy rozdział dokonano przeglądu metod plastycznego kształtowania wyrobów stopniowanych. Opracowano go na podstawie analizy branżowej literatury specjalistycznej o zasięgu międzynarodowym. W trzecim rozdziale przedstawiono charakterystykę nowej, autorskiej koncepcji kształtowania wyrobów stopniowanych metodą spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, w której wykorzystuje się wsad w postaci odcinka pręta lub rury. Opracowane rozwiązania zostały zgłoszone jako wynalazki do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. W czwartym rozdziale przedstawiono wyniki własnych wstępnych badań doświadczalnych, których rezultaty wykorzystano do modelowania numerycznego (metodą elementów skończonych) analizowanej

technologii spęczania. W badaniach wstępnych wyznaczono krzywą płynięcia materiału odkształcanego, określono warunki tarcia oraz dokonano analizy zjawiska wyboczenia wsadu w postaci pręta i rury. W kolejnym, piątym rozdziale przedstawiono metodykę oraz wyniki modelowania numerycznego procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Rozdział ten podzielono na dwa podrozdziały, w których analizie poddano proces spęczania z zastosowaniem odpowiednio wsadu pełnego (w postaci pręta) oraz drążonego (w postaci rury). W ramach wyników przedstawiono geometrię odkuwek oraz wpływ wybranych parametrów technologicznych (tj. średnicy otworu kalibrującego matrycy, wartości kąta strefy stożkowej matrycy i wartości redukcji przekroju poprzecznego materiału) na przebieg procesu i jakość wyrobu. W rozdziale szóstym zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych analizowanej metody spęczania. Przedstawiono w nim budowę i zasadę działania specjalistycznego przyrządu umożliwiającego realizację procesu. Składa się on z części mechanicznej montowanej w przestrzeni roboczej uniwersalnej prasy hydraulicznej oraz agregatu hydraulicznego, który odpowiedzialny jest za napęd wybranych podzespołów przyrządu. Tak jak w przypadku obliczeń numerycznych, wyniki badań doświadczalnych przedstawiono w dwóch podrozdziałach dotyczących kształtowania odkuwek pełnych i drążonych. W rozdziale siódmym przedstawiono przykłady zastosowania technologii spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Wytypowano dwa wyroby – odkuwkę wału przeniesienia napędu oraz odkuwkę tulei obrotowej – jako przykłady części wytwarzanych ze wsadu pełnego i drążonego. W ósmym rozdziale przedstawiono podsumowanie i wnioski dotyczące całości zrealizowanych prac badawczych. Na końcu monografii zamieszczono nienumerowany rozdział zawierający wykaz literatury.

Przedstawione w niniejszym opracowaniu badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem środków przeznaczonych na wykonanie projektu *Nowa technologia plastycznego kształtowania wyrobów drążonych z kołnierzami z przeznaczeniem dla przemysłu górniczego*, nr: LIDER/1/0003/L-9/17/NCBR/2018, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER IX i realizowanego przez Politechnikę Lubelską.

Autor składa serdeczne podziękowania za pomoc i wsparcie wszystkim osobom, które przyczyniły się powstania niniejszej monografii. Szczególne wyrazy wdzięczności kierowane są do pracowników Katedry Obróbki Plastycznej Metali – jednostki organizacyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Osobne podziękowania należą się recenzentom pracy, których uwagi i spostrzeżenia wpłynęły na ostateczną postać opracowania.

2. Przegląd metod plastycznego kształtowania wyrobów stopniowanych

Wyroby stopniowane, tj. posiadające zmienny przekrój na swojej długości, znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Wykorzystywane są jako wały przeniesienia napędu, elementy przekładni mechanicznych, tuleje centrujące, osie bądź półosie pojazdów, elementy mocujące itp. Wytwarzane mogą być technikami zaliczanymi do czterech grup: odlewnictwa, obróbki ubytkowej, metalurgii proszków oraz obróbki plastycznej. Wybór odpowiedniej technologii uzależniony jest od wielu czynników, do których zaliczyć można m.in. wielkość produkcji, dokładność wykonania, czas i koszt wytwarzania, wymagane własności wyrobu itd.

Metody obróbki plastycznej często znajdują zastosowanie w produkcji wielkoseryjnej, gdzie zazwyczaj wymagane są niskie koszty wytwarzania, duża wydajność procesu oraz wysoka jakość produktów. Wyroby stopniowane mogą być wytwarzane ze wsadu zarówno w postaci pręta, jak i rury, w związku z czym poszczególne technologie są różnicowane pod względem geometrii i kinematyki narzędzi oraz możliwych do uzyskania produktów. Wśród metod plastycznego kształtowania wyrobów posiadających zmienny przekrój na swojej długości wyróżnić można:

- kształtowanie impulsem elektromagnetycznym,
- kształtowanie hydromechaniczne,
- kształtowanie z wykorzystaniem kowarek,
- prasowanie obwiedniowe,

- punktowe kształtowanie przyrostowe,
- walcowanie kuźnicze,
- wywijanie,
- obciskanie,
- zgniatanie obrotowe,
- kształtowanie metodami kucia,
- wyciskanie.

Powyższe metody posiadają określone obszary zastosowań, zalety oraz zjawiska ograniczające, dzięki czemu możliwe jest plastyczne kształtowanie szerokiego asortymentu produktów. Z tego względu w dalszej części rozdziału przedstawiono krótką charakterystykę wskazanych technologii, którą opracowano w oparciu o przegląd literatury specjalistycznej.

2.1. Kształtowanie impulsem elektromagnetycznym

Cechą charakterystyczną technologii kształtowania impulsem elektromagnetycznym są duże prędkości odkształcenia materiału poddawanego deformacji plastycznej. Zmiana kształtu uzyskiwana jest wskutek oddziaływania sił Lorentza wywierających ciśnienie na wybrane obszary rury lub blachy, które są materiałami predestynowanymi do odkształcania tą metodą [24].

Wśród zalet procesu kształtowania impulsem elektromagnetycznym można wyróżnić m.in.:

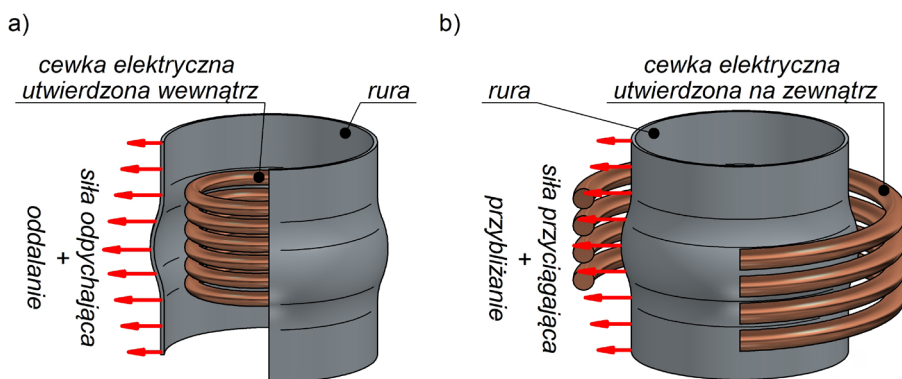
- możliwość kształtowania wsadu z naniesioną powłoką, która z uwagi na brak kontaktu z narzędziami nie zostanie uszkodzona podczas procesu,
- brak konieczności stosowania środków smarnych,
- powtarzalność procesu uzyskiwana dzięki odpowiedniej kalibracji oprzyrządowania,
- możliwość łączenia elementów wykonanych z różnych materiałów,
- niewielkie sprężynowanie materiału w porównaniu do statycznych metod kształtowania,
- polepszenie własności mechanicznych materiału (z uwagi na duże prędkości odkształcenia) w porównaniu do wyrobów wytwarzanych metodami zaliczanymi do statycznych [102].

Z kolei do wad procesu kształtowania impulsem elektromagnetycznym można zaliczyć m.in.:

- wymagania dotyczące bezpieczeństwa z uwagi na wysokie wartości napięcia i natężenia prądu stosowanego do realizacji procesu, który dodatkowo generuje silne pole magnetyczne,
- ograniczenie możliwości kształtowania do materiałów o dużej przewodności elektrycznej oraz posiadających niską wartość naprężenia uplastyczniającego,
- małą sprawność procesu – tylko niewielka część energii zostaje wykorzystana do odkształcenia plastycznego wsadu [102].

W odniesieniu do produkcji wyrobów stopniowanych kształtowanie elektromagnetyczne stosowane jest do wytwarzania elementów drążonych o zmiennej średnicy zewnętrznej bądź zróżnicowanym kształcie przekroju poprzecznego oraz zbliżonej grubości ścianki na całej długości wyrobu.

W pracy [152] autorzy zwracają uwagę, że zwiększanie średnicy wsadu rurowego najczęściej odbywa się wskutek umieszczenia cewki wewnątrz wsadu (ryc. 2.1a), niemniej jednak kształtowanie wyrobów o małych średnicach jest problematyczne z uwagi na niedostępność cewek o bardzo małych rozmiarach. Z tego względu zaproponowano nową metodę kształtowania impulsem elektromagnetycznym, w której cewka umieszczona jest na zewnątrz wsadu, a mimo to dochodzi do zwiększenia średnicy odkształcanej rury (ryc. 2.1b). Z przeprowadzonych badań wynika, że dla wsadu ze stopu aluminium EN W-1060 o średnicy wewnętrznej równej $\varnothing 28$ mm i grubości ścianki równej 1 mm w centralnej części wyrobu uzyskano odkształcenie o wartości ok. 15%.



Ryc. 2.1. Schemat kształtowania impulsem elektromagnetycznym z cewką umieszczoną:
a) wewnątrz rury, b) na zewnątrz rury (opracowanie własne na podstawie [152])

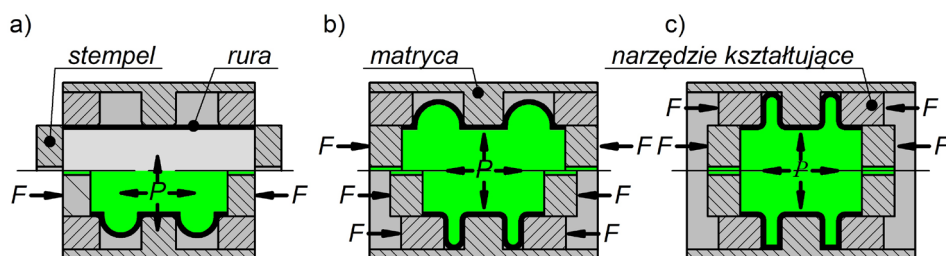
Kształtowanie impulsem elektromagnetycznym wyrobów drążonych o przekroju poprzecznym innym niż kołowy wymaga niekonwencjonalnego podejścia i zastosowania dodatkowego narzędzia w postaci matrycy. Przykładowe badania w tym zakresie przedstawiono w pracy [161], w której opublikowano wyniki analizy kształtowania wyrobu ze stopu aluminium 5A02 ze strefą posiadającą kwadratowy przekrój poprzeczny. Wykazano, że podczas kształtowania jednooperacyjnego płaska ścianka wyrobu nie przylega do matrycy z powodu uderzenia w nią z dużą prędkością i odbicia, co dodatkowo utrudnia wypełnienie naroży. Z tego względu konieczne jest kształtowanie w dwóch etapach. W pierwszym zwiększa się średnicę wsadu rurowego do wartości maksymalnej, po czym w drugim etapie uzyskuje się wypełnienie naroży i wyrób finalny. Dzięki takiej realizacji procesu można uniknąć wad związanych z procesem jednoetapowym i uzyskać mniejszy rozrzut wartości grubości ścianki w strefie naroży.

2.2. Kształtowanie hydromechaniczne

Kształtowanie hydromechaniczne jest metodą umożliwiającą wytwarzanie produktów o skomplikowanej geometrii, trudnych do wykonania innymi technikami. Technologia ta stosowana jest do wytwarzania wyrobów drążonych oraz produkcji komponentów z blach. Wyróżnia się dwie zasadnicze odmiany procesu: w pierwszej materiał odkształcany jest wskutek oddziaływania na niego ciśnienia cieczy (hydroforming), w drugiej kształtowanie wsadu odbywa się wskutek oddziaływania zarówno ciśnienia cieczy, jak i nacisku pochodzącego od przemieszczających się narzędzi (hydroforging). Kluczowymi parametrami procesu są ścisła korelacja wartości ciśnienia cieczy z gatunkiem odkształcanego materiału oraz wymiarami wsadu, a także synchronizacja przemieszczenia narzędzi i przyrostu ciśnienia cieczy z wartością odkształceń granicznych kształtowanego materiału [18].

Publikacje naukowe w zakresie kształtowania hydromechanicznego wyrobów drążonych skupiają się wokół trzech obszarów badawczych. Są to wyniki badań podstawowych dotyczące m.in. krzywej odkształceń granicznych [159, 160, 170], jak również prace rozwojowe, w których opisuje się technologię wytwarzania wyrobu [84], sposoby jej optymalizacji [48] czy nowe koncepcje przebiegu procesu [53], a w końcu także artykuły przeglądowe podsumowujące dotychczasowy stan wiedzy [9].

Przykładowe wyniki badań związanych z technologią wykonania wyrobu opublikowali Xu i inni [155]. Autorzy przedstawili proces kształtowania elementu pompy wody wykonanego ze stali nierdzewnej AISI 304. Jako wsad zastosowano odcinek rury o średnicy zewnętrznej równej $\phi 128$ mm i grubości ścianki wynoszącej 1,5 mm. Założono, że część będzie kształtowana w układzie podwójnym metodą wykorzystującą ciśnienie cieczy oraz siłę nacisku przemieszczających się narzędzi. Na rycinie 2.2a przedstawiono schematycznie pierwszy etap procesu. Polega on na wstępnym nadaniu wyrobowi kształtu poprzez oddziaływanie ciśnienia cieczy na wewnętrzną powierzchnię wsadu rurowego. W drugim etapie przedstawionym na rycinie 2.2b element przybiera kształt zbliżony do końcowego wskutek osiowego przemieszczania się narzędzi i oddziaływania ciśnienia cieczy. Końcowy etap polega na ostatecznym kalibrowaniu wyrobu i wypełnianiu naroży wykroju, co możliwe jest dzięki oddziaływaniu cieczy pod stosownym ciśnieniem na odpowiednie powierzchnie materiału odkształcanego przy unieruchomionych narzędziach (ryc. 2.2c).



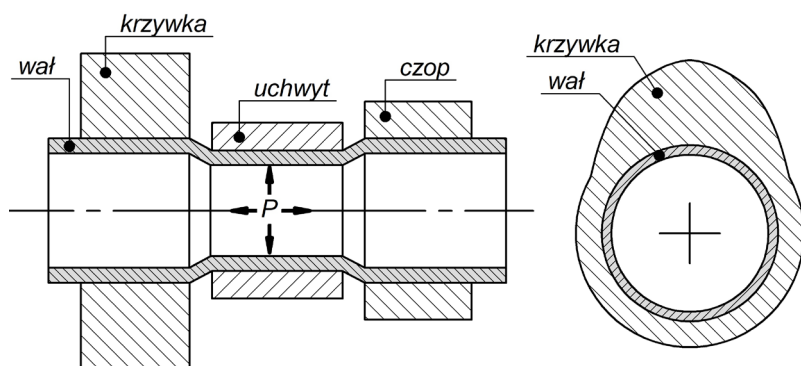
Ryc. 2.2. Etapy kształtowania elementu pompy wody, opis w tekście
(opracowanie własne na podstawie [155])

Z przeprowadzonych badań wynika, że kluczowym czynnikiem decydującym o jakości wyrobu jest wartość ciśnienia cieczy w funkcji osiowego przemieszczenia narzędzi. Przy zastosowaniu w drugim etapie procesu ciśnienia cieczy o stałej wartości równej 50 MPa uzyskuje się wyrób z pęknięciem. Z kolei zastosowanie w tym etapie ciśnienia cieczy o wartości rosnącej (proporcjonalnie do przemieszczenia narzędzi) w zakresie od 30 do 50 MPa, a następnie kalibracja wyrobu przy ciśnieniu wynoszącym 100 MPa prowadzi do uzyskania wyrobu prawidłowego.

Chu i inni [19] analizie poddali proces kształtowania hydromechanicznego, w którym przekrój poprzeczny wsadu rurowego jest spęczany w wykroju przy jednoczesnym oddziaływaniu ciśnienia cieczy na wewnętrzną powierzchnię wyrobu. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest uzyskanie części, której

obwód w wybranym przekroju poprzecznym jest mniejszy niż obwód wsadu. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że wymagane wartości ciśnienia cieczy są mniejsze niż w przypadku kształtowania bez przemieszczenia narzędzi. Ponadto wartość wymaganego ciśnienia rośnie wraz ze wzrostem wartości odkształcenia, jest zależna od krzywej umocnienia materiału, z kolei niezależna od grubości ścianki wsadu. Możliwości aplikacyjne omawianej metody przedstawiono na przykładzie słupka samochodu wykonanego ze stopu EN AW-6063. Najtrudniejszym aspektem kształtowania tej części jest fakt, iż minimalny promień zaokrąglenia wynosi 2 mm, co stanowi zaledwie 1,33 wartości początkowej grubości ścianki rury. W procesie zastosowano ciśnienie cieczy o wartości równej 14 MPa przy zastosowaniu wsadu rurowego o średnicy równej $\varnothing 51$ mm. W takim wypadku obwód wsadu jest równy największemu obwodowi przekroju poprzecznego słupka. Zgodnie z powyższym w miejscu, gdzie obwód przekroju poprzecznego wyrobu jest najmniejszy, uzyskano 6,3% redukcji obwodu wsadu, bez fałdowania ścianki.

Proces kształtowania hydromechanicznego można wykorzystać również do wytwarzania składanych wałków rozrządu stosowanych w silnikach spalinowych. Poszczególne komponenty, jak np. wał drążony i krzywki, wykonywane są oddzielnie, po czym dochodzi do połączenia poszczególnych elementów przy wykorzystaniu cieczy pod wysokim ciśnieniem (ryc. 2.3).

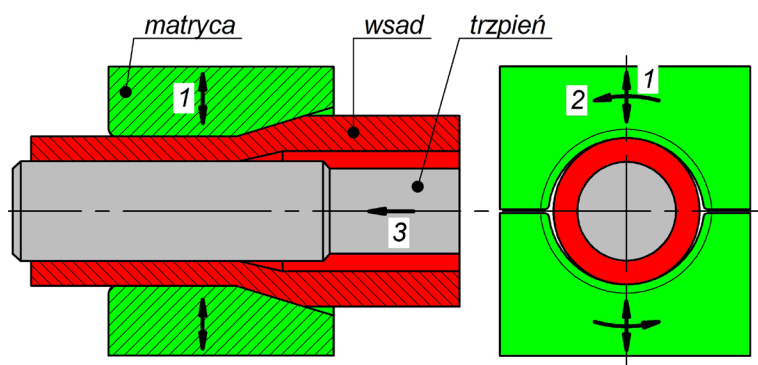


Ryc. 2.3. Schemat procesu montażu wałka rozrządu metodą kształtowania hydromechanicznego (opracowanie własne na podstawie [75])

W porównaniu do produkcji tradycyjnych monolitycznych wałków rozrządu podejście to umożliwia redukcję masy części, zastosowanie różnych materiałów do wykonania wału i krzywki, zapewnia też większą elastyczność produkcji [75].

2.3. Kształtowanie z wykorzystaniem kowarek

Kucie w kowarkach jest metodą obróbki plastycznej umożliwiającą kształtowanie odkuwek stopniowanych wałów wykonywanych z materiału wsadowego w postaci pręta bądź rury. Wyroby drążone mogą być produkowane z wykorzystaniem trzpienia lub bez. Użycie tego dodatkowego narzędzia zapewnia lepszą kontrolę grubości ścianki odkuwki, jak również umożliwia nadanie wymaganych cech wewnętrznej powierzchni wyrobu [43]. Schemat procesu kształtowania wyrobu drążonego z wykorzystaniem trzpienia przedstawiono na rycinie 2.4.



Ryc. 2.4. Schemat procesu kucia wyrobu drążonego w kowarce; opis w tekście
(opracowanie własne na podstawie [113])

Zamierzony kształt części uzyskiwany jest wskutek wielokrotnych uderzeń matryc w zewnętrzną powierzchnię wsadu. Matryce przemieszczają się ruchem posuwisto-zwrotnym w kierunku promieniowym 1 z dużą częstotliwością i wykonują ruch obrotowy 2 dookoła wsadu. W zależności od długości wyrobu wsad może się przemieszczać w kierunku osiowym 3, co zapewnia przyrost odkształcenia na jego długości. W przypadku krótkich odkuwek stosuje się matryce o długości odpowiadającej długości kształtowanego stopnia, a wyrobu nie przemieszcza się osiowo. W celu zapewnienia odpowiedniej kinematyki matryc montuje się je w głowicy narzędziowej [128].

Procesy kształtowania wyrobów z wykorzystaniem kowarek charakteryzują się dużą dokładnością, szerokim zakresem zastosowań, bardzo dobrą jakością odkuwek oraz dużą uniwersalnością. Dodatkowo umocnienie odkształceniowe materiału kształtowanego w warunkach obróbki plastycznej na zimno (w jakich często realizowany jest proces) zapewnia polepszenie własności mechanicznych produktu.

Poza nadaniem monolitycznej odkuwce odpowiedniego kształtu omawiana technologia znajduje swoje zastosowanie również w produkcji elementów bimetalowych. Tego typu części produkuje się wówczas, gdy wymagane są zróżnicowane własności odkuwki bądź jest to korzystne ze względów ekonomicznych (rdzeń i warstwa zewnętrzna wykonywane są z materiałów o różnych cenach i własnościach) [70, 113].

W aspekcie naukowym badania procesu kształtowania z wykorzystaniem kowarek ukierunkowane są bardzo często na analizę wybranych cech odkuwki uzyskanej przy określonych parametrach technologicznych procesu.

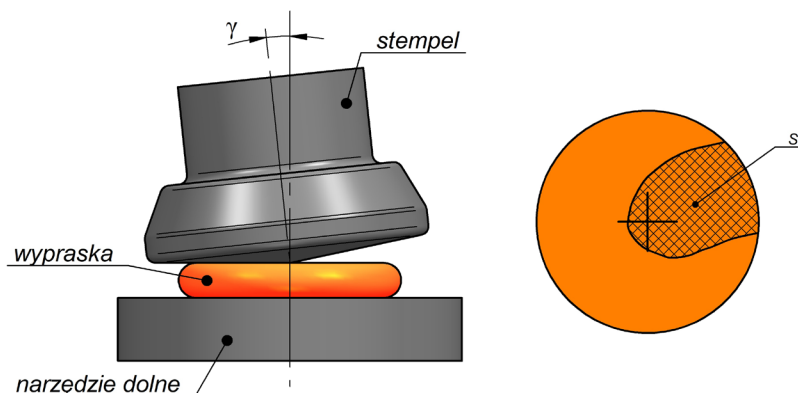
Przykładowe wyniki w tym zakresie przedstawili Tian i inni [127]. W badaniach wykorzystali pręt ze stali 42CrMo o średnicy $\varnothing 25$ mm, którą zredukowali w dziesięciu przejściach do wartości $\varnothing 15$ mm. Wykazano, że w próbie rozciągania granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie materiału wzrosły odpowiednio o 16,6 i 32,5%; w próbie skręcania parametry wytrzymałościowe wzrosły o 43,2 oraz o 19,3%; zaś średnia wartość twardości w przekroju poprzecznym pręta wzrosła o 8,57%.

W pracy [129] przedstawiono wyniki dotyczące procesu kucia w kuźniarce wewnętrznie stopniowanego wału silnika lotniczego. Jako materiał wsadu zastosowano nadstop GH4169, który kształtowano przy zastosowaniu trzech różnych matryc. Wykazano, że w zależności od geometrii narzędzi różnica pomiędzy odkształceniem średnim w warstwach zewnętrznych i wewnętrznych może wynieść od 4,23 do 58,21%. Dodatkowo obszar przejściowy matrycy ma większy wpływ na proces formowania odkuwki niż inne strefy tego narzędzia.

Z kolei Zhang i inni [163] w swoich badaniach przeanalizowali cztery metody kształtowania drążonego wyrobu z miedzi AISI C11000: kucie w kowarce z osiowym przemieszczeniem materiału z zastosowaniem i bez użycia trzpienia oraz kucie bez przemieszczenia osiowego wsadu również z zastosowaniem i bez użycia trzpienia. W przypadku kucia z przemieszczeniem wsadu i bez zastosowania trzpienia w strefie zgniatającej matrycy, materiał płynie głównie w kierunku promieniowym, zaś w strefie kalibrującej – w kierunku osiowym z małą prędkością. Zastosowanie trzpienia powoduje wzrost prędkości płynięcia materiału w kierunku osiowym. W przypadku kucia bez przemieszczenia osiowego materiału zasadniczą strefą odkształcenia jest obszar kucia, a materiał płynie z dużą prędkością głównie w kierunku promieniowym.

2.4. Prasowanie obwiedniowe

Prasowanie obwiedniowe jest metodą plastycznego kształtowania metali, w której chwilowa powierzchnia kontaktu S stempla z materiałem odkształcanym jest wielokrotnie mniejsza niż w przypadku klasycznego spęczania czy kucia. Taki efekt uzyskuje się dzięki odchyleniu stempla o kąt γ od osi wypraski i wprawieniu go w ruch obwiedniowy (zob. ryc. 2.5). Rozwiązanie takie powoduje, że maksymalne naciski jednostkowe są znacznie mniejsze niż przy tradycyjnym spęczaniu, wskutek czego siły kształtowania mogą być nawet kilkunastokrotnie mniejsze. Powyższe zalety procesu sprawiają, że realizuje się go głównie w warunkach obróbki plastycznej na zimno do wytwarzania wyrobów posiadających cienkościenne elementy – np. tarcze, kołnierze – bądź też do kształtowania wyprasek stożkowych kół zębatach [52, 106]. Technologia może być stosowana także do spęczania swobodnego, prasowania obrzeży, przesadzania, wyciskania współbieżnego i przeciwbieżnego, jak również prasowania pierścieni [107, 109].

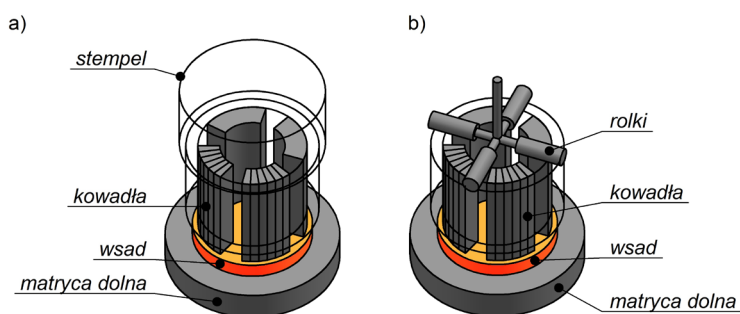


Ryc. 2.5. Schemat procesu prasowania obwiedniowego
(opracowanie własne na podstawie [110])

Istotnym parametrem procesu jest rodzaj ruchu wykonywanego przez stempel. Istnieje wiele odmian ruchu obwiedniowego, będącego szczególnym przypadkiem ruchu kulistego. Kinematykę stempla w sposób jednoznaczny można opisać przy zastosowaniu trzech kątów Eulera, do których zalicza się: kąt obrotu własnego narzędzia, kąt precesji oraz kąt nutacji. Na podstawie znajomości ww. kątów wyznacza się odpowiednie prędkości kątowe stempla jako pierwszą pochodną położenia kąтового względem czasu.

Głównymi zjawiskami ograniczającymi, które występują w procesie prasowania obwiedniowego są wady kształtu spowodowane wyboczeniem wsadu, skrócenie wypraski oraz utrata spójności materiału. Wady kształtu są najczęściej skutkiem nieprawidłowego umieszczenia prefabrykatu w przestrzeni roboczej narzędzi, zbyt dużej smukłości wsadu bądź nieodpowiednio dobranych parametrów procesu. Kąt skrócenia wypraski zależy przede wszystkim od rodzaju ruchu wykonywanego przez stempel, jak również od wartości odkształcenia i nacisków, a także od warunków tarcia pomiędzy stemplem a wsadem. Z kolei do pęknięcia wypraski dochodzi w wyniku oddziaływania niekorzystnego stanu naprężenia i przekroczenia wartości odkształcenia granicznego. Z uwagi na fakt, że proces zazwyczaj realizowany jest na zimno, kluczowym aspektem jest również stan obróbki cieplnej materiału wsadowego [108, 111].

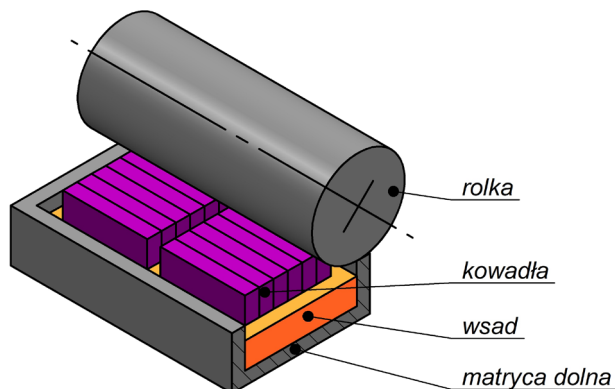
W literaturze dostępne są również wyniki badań dotyczące nowych procesów, które ideowo zbliżone są do prasowania obwiedniowego [124]. Na rycinie 2.6 przedstawiono dwa schematy inkrementalnego kształtowania wypraski ze wsadu osiowosymetrycznego. W procesie wykorzystuje się dodatkowe kowadła, które cyklicznie kontaktują się z odkształcanym materiałem. Napędzane są wskutek nacisku wywieranego przez stempel (ryc 2.6a). W innej odmianie tej technologii rolę stempla pełni kilka rolek, które obracają się wokół dwóch osi (ryc 2.6b). Metoda ta może zostać zaimplementowana również do wytwarzania elementów ze wsadu, który nie jest osiowosymetryczny. W takim wypadku kowadła umieszczane są szeregowo w miejscach wymagających odkształcenia plastycznego i napędzane poprzez rolękę wykonującą ruch obrotowy i postępowy (ryc 2.7).



Ryc. 2.6. Odmiany procesu kształtowania inkrementalnego wsadu osiowosymetrycznego zbliżone do prasowania obwiedniowego (opracowanie własne na podstawie [124])

Powyższa technologia została opracowana m.in. z myślą o wytwarzaniu uźebrowanych elementów o małych grubościach, które znajdują zastosowanie

np. w przemyśle lotniczym. Ograniczenia procesu mogą wynikać z powstawania ewentualnej wypłytki w szczelinach pomiędzy kowadłami – może ona zostać wprasowana w wyrób, co negatywnie wpływa na jakość wypraski.



Ryc. 2.7. Schemat procesu inkrementalnego kształtowania z zastosowaniem wsadu prostopadłościennego (opracowanie własne na podstawie [124])

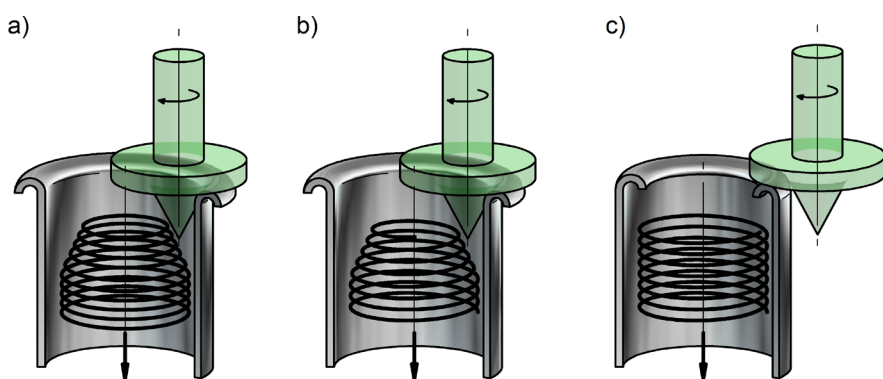
Odmianą technologii prasowania obwiedniowego jest również metoda, w której stempel wykonuje ruch drgający z dużą częstotliwością i niewielką amplitudą [100, 101]. Badania tego procesu dotyczą możliwości kształtowania części o bardzo małych rozmiarach, rzędu jednego mm. W wypadku tej metody mechanizm odkształcenia jest zasadniczo odmienny od występującego w standardowych procesach prasowania obwiedniowego. Główna różnica polega na wykorzystaniu efektów dynamicznych, takich jak efekt żyroskopowy. Materiał płynie warstwowo z różnymi prędkościami, co jest spowodowane wytwarzaniem ciepła na styku wsadu z narzędziem w rezultacie intensywnego odkształcenia plastycznego i poślizgu krawędzi obracającej się próbki po powierzchni stempla. W związku z powyższym tylko górna i dolna część wsadu jest odkształcana, natomiast środkowa część próbki pozostaje nieodkształcona.

2.5. Punktowe kształtowanie przyrostowe

Punktowe kształtowanie przyrostowe jest metodą, w której materiał odkształcany poddawany jest miejscowemu (punktowemu) naciskowi narzędzia przemieszczającego się po odpowiedniej trajektorii. Najczęściej przybiera ono kształt trzpienia, którego część robocza jest zakończona w sposób odpowiedni do realizowanej operacji (np. półkula lub końcówka walcowa z zaokrągloną

krawędzią roboczą). Wymaganą trajektorię przemieszczania się narzędzia uzyskuje się dzięki maszynie – zwykle sterowanej numerycznie – wyposażonej w uchwyt, w którym montowane jest narzędzie robocze. Do realizacji procesu wykorzystywane mogą być frezarki lub roboty przemysłowe. Zaletami procesu są małe siły kształtowania, możliwość zastosowania konwencjonalnych maszyn numerycznych, duża elastyczność i uniwersalność oraz prosta budowa oprzyrządowania. Wśród wad wyróżnić należy przede wszystkim długi czas kształtowania wyrobu oraz niewielką dokładność w miejscach o małych promieniach zaokrąglenia [25]. W odniesieniu do kształtowania wyrobów drażonych, które obok elementów z blach [3, 123] są typowymi materiałami wsadowymi w technologii punktowego kształtowania przyrostowego, kluczowe operacje obejmują formowanie końca rury, wywijanie obrzeża wokół wyciętego otworu, czy też zmianę kształtu przekroju poprzecznego wsadu na odpowiedniej długości [20, 33, 80, 141].

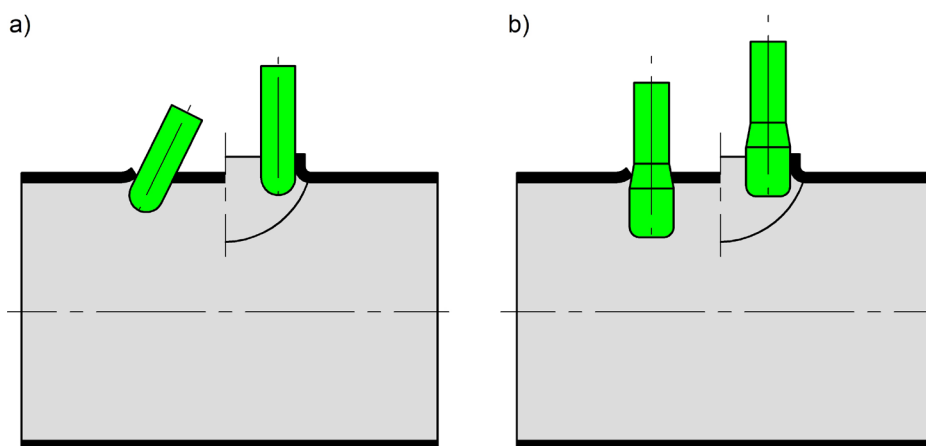
Przykładowe wyniki badań dotyczące wywijania końca rury metodą jednopunktowego kształtowania przyrostowego przedstawili Wen i inni [142]. Analizie poddano wpływ kluczowych parametrów procesu, tj. geometrię narzędzia oraz trajektorię jego ruchu na przebieg procesu i jakość wyrobu. Jako materiał wsadu zastosowano rurę ze stopu aluminium EN AW 6061 o średnicy zewnętrznej równej $\varnothing 38$ mm i grubości ścianki wynoszącej 1 mm. Obrzeże wywijano na zewnątrz i do wewnątrz zgodnie ze schematem przedstawionym na rycinie 2.8, przy czym zastosowano dwie trajektorie ruchu narzędzia – spiralną i kołową. Przyjęto różne wartości promienia zaokrąglenia krawędzi roboczej narzędzia oraz dwie wartości kąta definiującego pochylenie jego strefy stożkowej.



Ryc. 2.8. Metody wywijania obrzeża rury technologią jednopunktowego kształtowania przyrostowego: a) kołowa trajektoria narzędzia przy wywijaniu zewnętrznym, b) spiralna trajektoria narzędzia przy wywijaniu zewnętrznym, c) spiralna trajektoria narzędzia przy wywijaniu wewnętrznym (opracowanie własne na podstawie [142])

Do głównych zjawisk ograniczających zaliczono fałdowanie i pękanie materiału, wskazując jednocześnie, że przy mniejszych wartościach parametrów definiujących posuw narzędzia zarazem zmniejsza się tendencja do powstawania wad wyrobu, jak również maleją parametry siłowe procesu. Ponadto spiralna trajektoria ruchu narzędzia jest korzystniejsza od kołowej z uwagi na zachowaną płynność odkształcenia ścianki wsadu. W porównaniu do tradycyjnego wywijania z wykorzystaniem odpowiednich matryc analizowane jednopunktowe kształtowanie przyrostowe charakteryzuje mniejsza wartość siły osiowej, niemniej jednak niesymetryczne wywieranie nacisków na wsad powoduje jego większą skłonność do powstawania wad wyrobu [142].

Jednopunktowe kształtowanie przyrostowe może być stosowane do wywijania obrzeża otworu wykonanego w rurze. Celem takiej operacji jest wykonanie kołnierza o niewielkiej wysokości, który może zostać wykorzystany np. w celu przyłączenia innej rury bez konieczności stosowania trójnika. Schemat takiego procesu został przedstawiony na rycinie 2.9.

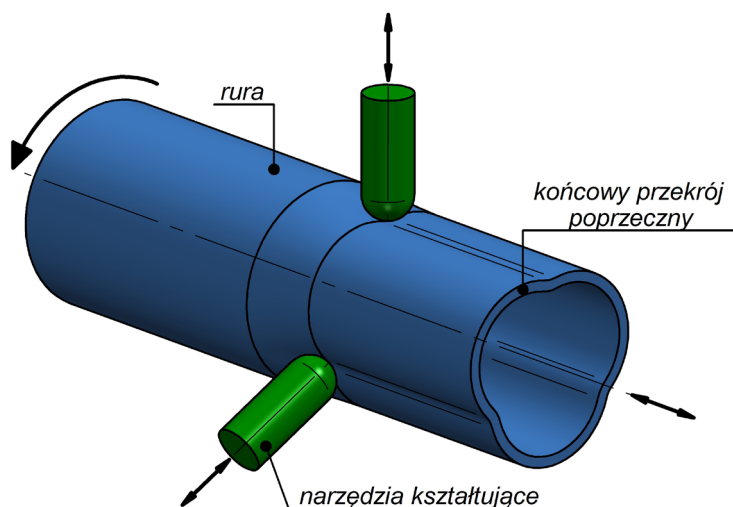


Ryc. 2.9. Schemat procesu przyrostowego wywijania obrzeża rury z wyciętym otworem: a) wywijanie z zastosowaniem trzpienia jednostopniowego, b) wywijanie z użyciem trzpienia wielostopniowego (opracowanie własne na podstawie [156])

Realizowany jest on wg dwóch koncepcji. W pierwszej wykorzystuje się narzędzie w postaci jednostopniowego trzpienia, którego oś symetrii w początkowej fazie procesu musi być odchylona od osi prostopadłej do osi wsadu rurowego. Zabieg ten ma na celu prawidłowe zainicjowanie procesu wywijania. Po tym etapie oś trzpienia ponownie staje się prostopadła do osi wsadu, co ma miejsce w zasadniczej fazie kształtowania, kiedy to zwiększa się wysokość

obrzeża (ryc. 2.9a). W drugiej koncepcji narzędzie ma kształt wielostopniowego trzpienia o charakterystycznej strefie stożkowej (ryc. 2.9b). Jej zadaniem jest zapoczątkowanie procesu wywijania bez konieczności odchylenia osi trzpienia od kierunku prostopadłego do osi rury. Zastosowanie tak zmodyfikowanego narzędzia upraszcza realizację procesu w odniesieniu do ww. koncepcji pierwszej [156].

Z badań prowadzonych przez Yang i innych [156] wynika, że ograniczenia procesu wywijania obrzeża otworu wykonanego w rurze to pocienienie ścianki, lokalne wyboczenie materiału, błędy okrągłości, pęknięcia i nierówna krawędź kołnierza, niemniej jednak odpowiedni dobór parametrów procesu umożliwia wykonanie wyrobu o zakładanej geometrii. Ponadto analizowana metoda jest dość uniwersalna, co potwierdza fakt, że przy wykorzystaniu tego samego narzędzia możliwe jest formowanie zarówno obrzeża okrągłego, jak i owalnego.



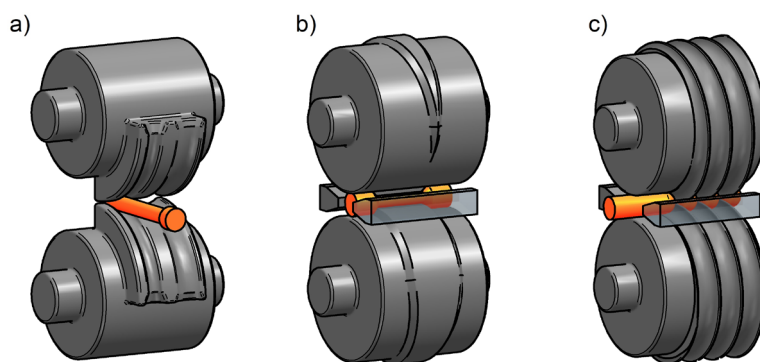
Ryc. 2.10. Schemat procesu inkrementalnego kształtowania profili
(opracowanie własne na podstawie [34])

Formowanie przyrostowe może być również stosowane do wytwarzania profili drążonych o różnorodnych przekrojach poprzecznych. Grzanic i inni [32, 34] przedstawili opis procesu kształtowania wielopunktowego i maszynę realizującą tego typu operacje. Według przedstawionej koncepcji (ryc. 2.10) kształtowanie wsadu rurowego odbywa się za pomocą kilku narzędzi rozmieszczonych dokoła wsadu. Ich liczba może być różna i zależy od kształtu przekroju poprzecznego oczekiwanego wyrobu. Narzędzia mogą przemieszczać się

wzdłuż własnej osi, tj. w kierunku promieniowym dla wsadu, powodując jego miejscowe odkształcenie. Dodatkowo narzędzia zamontowane są w głowicy, która może wykonywać ruch obrotowy dookoła osi wsadu, ten zaś może przemieszczać się wzdłuż własnej osi symetrii. Dzięki takiej kinematyce materiału odkształcanego i oprzyrządowania oraz wskutek odpowiedniej synchronizacji poszczególnych przemieszczeń linowych i kątowych możliwe jest wytwarzanie profili o różnych przekrojach poprzecznych i długościach.

2.6. Walcowanie kuźnicze

Walcowanie kuźnicze jest metodą umożliwiającą kształtowanie odkuwek stopniowanych wałów ze wsadu w postaci pręta i rury. Technologię można podzielić na trzy grupy: walcowanie wzdłużne, poprzeczne i skośne. W procesie walcowania wzdłużnego osie walców ustawione są równoległe, walce obracają się w przeciwnych kierunkach i wprawiają materiał odkształcany w ruch postępowy (ryc. 2.11a). Podczas walcowania poprzecznego osie walców również usytuowane są równoległe, lecz obracają się w tym samym kierunku i powodują, że materiał wykonuje ruch obrotowy (ryc. 2.11b). Z kolei w procesie walcowania skośnego osie walców są obrócone względem osi wsadu o pewien kąt, zaś walce wykonują ruch obrotowy w tym samym kierunku, powodując, że materiał przemieszcza się ruchem śrubowym (ryc. 2.11c) [30].

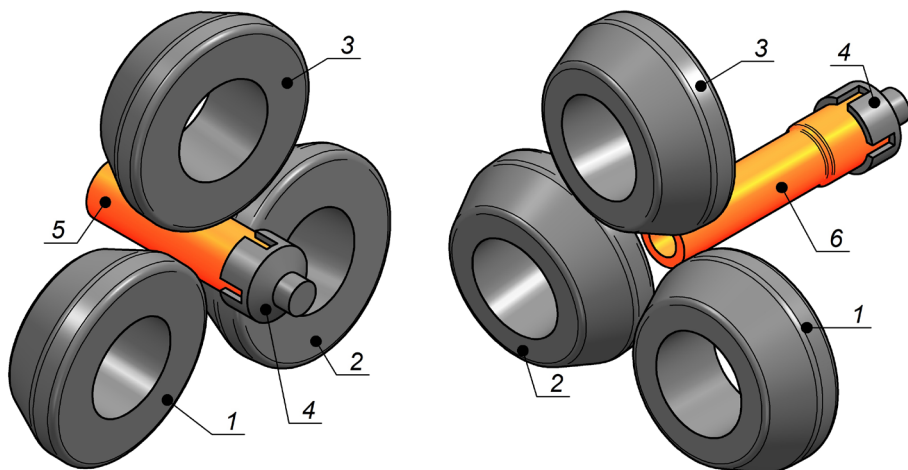


Ryc. 2.11. Schematy procesów walcowania kuźniczego: a) walcowanie wzdłużne, b) walcowanie poprzeczne, c) walcowanie skośne (opracowanie własne na podstawie [30])

W aspekcie kształtowania wyrobów stopniowanych na szczególną uwagę zasługują procesy walcowania poprzecznego i skośnego, które są przedmiotem wielu prac naukowych [12, 69, 119, 164].

W przypadku walcowania skośnego proces może być realizowany na kilka sposobów. Różnią się one przede wszystkim liczbą i geometrią walców roboczych ich kinematyką oraz sposobem podawania materiału do kotliny walcowniczej. Najczęściej wykorzystuje się dwa–trzy walce, które mogą powodować, że materiał jest przez nie samoczynnie wciągany do kotliny walcowniczej, dzięki występowaniu sił tarcia. W przeciwnym razie stosowane są dodatkowe narzędzia w postaci uchwytów, których rolą jest wprowadzanie materiału do przestrzeni roboczej walców. Realizacja procesu z zastosowaniem tylko dwóch walców wymaga użycia dodatkowych prowadnic, które pozycjonują wsad w kotlinie walcowniczej. Narzędzi tych nie stosuje się w procesach z wykorzystaniem trzech walców [31, 116, 139].

Podczas walcowania skośnego walce mogą wykonywać tylko jeden podstawowy ruch (obrotowy) albo posiadać więcej niż jeden stopień swobody. W pierwszym przypadku kształt wyrobu uzyskiwany jest dzięki odpowiedniej geometrii walców, co oznacza, że różne wyroby wymagają stosowania indywidualnych narzędzi. Procesy realizowane wg drugiej metody są bardziej uniwersalne, ponieważ przy pomocy jednego zestawu narzędzi możliwe jest wytwarzanie szerokiej gamy produktów. Obie metody są do siebie zbliżone, a zatem w dalszej części rozdziału procesy walcowania skośnego przedstawione zostaną na przykładzie bardziej złożonej kinematycznie technologii, w której walce mają więcej niż jeden stopień swobody [120, 121, 138].



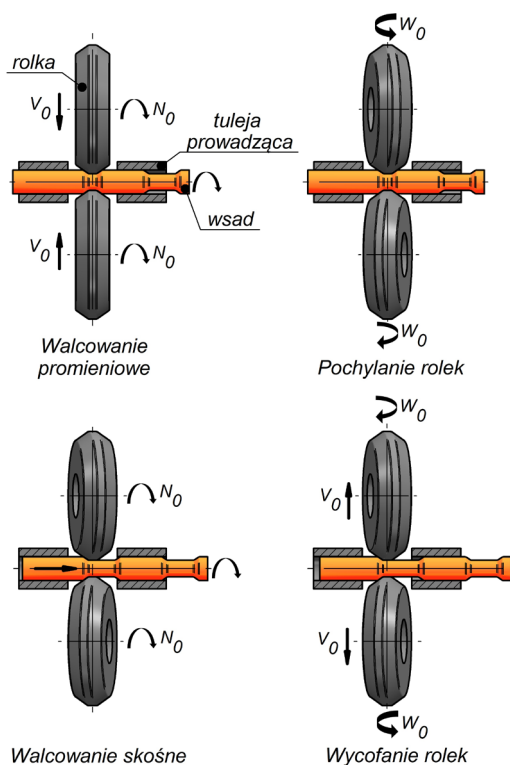
Ryc. 2.12. Schemat procesu walcowania skośnego trzema rolkami;
1, 2, 3 – rolki, 4 – uchwyt, 5 – wsad, 6 – odkuwka (opracowanie własne na podstawie [133])

Schemat procesu walcowania skośnego z zastosowaniem trzech rolek mających po trzy stopnie swobody przedstawiono na rycinie 2.12. Rolki rozmieszczone są dookoła wsadu w postaci pręta lub rury i mogą wykonywać trzy ruchy. Pierwszy i podstawowy to ruch obrotowy dookoła własnej osi symetrii. Drugi to ruch prostoliniowy w kierunku promieniowym, dzięki czemu rolki zbliżają się lub oddalają od osi symetrii walcowanego materiału. Natomiast trzeci stopień swobody to możliwość obrotu rolki wokół kierunku promieniowego. W trakcie walcowania rolka wykonuje tylko pierwsze dwa z wymienionych ruchów, natomiast ostatni, który zabezpiecza odpowiedni kąt skręcenia pomiędzy osią rolki a osią wsadu, wykonywany jest przed rozpoczęciem procesu kształtowania. Dodatkowo podczas walcowania stosowany jest uchwyt, w którym mocowany jest koniec wsadu. Dzięki jego przemieszczeniu wzdłuż osi wsadu i symultanicznemu przemieszczeniu rolek w kierunku promieniowym skorelowanym z ich ruchem obrotowym możliwe jest walcowanie wałów stopniowanych o zróżnicowanych długościach i średnicach stopni [97, 133]. Należy nadmienić, że w przypadku wytwarzania wyrobów drażonych proces walcowania skośnego może być realizowany z zastosowaniem trzpienia. Wprowadzenie tego dodatkowego narzędzia do otworu wsadu zapewni lepszą kontrolę grubości ścianki i średnicy wewnętrznej odkuwki [11, 95].

Przedstawiony proces walcowania skośnego może znaleźć zastosowanie również w kształtowaniu wałów bimetalowych. Dzięki odpowiednio dobranym parametrom procesu możliwe jest zgrzanie tą metodą rdzenia z warstwą zewnętrzną w postaci rury. Badania wskazują, że zgrzewanie jest znacznie łatwiejsze przy niższych wartościach redukcji przekroju poprzecznego. Z kolei przyjęcie dużych wartości redukcji przekroju poprzecznego i zastosowanie tulei zewnętrznych o małych względnych grubościach ścianek utrudnia walcowanie i może uniemożliwiać zgrzewanie materiałów. Ponadto łatwiejsze do połączenia są materiały o zbliżonych składach chemicznych [112, 134].

Proces walcowania skośnego zbliżony do opisanego powyżej może być realizowany z wykorzystaniem dwóch rolek, również posiadających po trzy stopnie swobody. Schemat przedstawiono na rycinie 2.13. Poza dwoma rolkami, zasadnicze oprzyrządowanie kontaktujące się z materiałem odkształcanym składa się z tulei prowadzących i ewentualnego trzpienia w przypadku wytwarzania wyrobów drażonych. Proces walcowania składa się z czterech etapów. Rozpoczyna się od zagłębiania się rolek w materiał wsadu wskutek ruchu obrotowego i postępowego rolek odpowiednio z prędkościami N_0 oraz V_0 . Następnie rolki wykonują tylko jeden ruch, podczas którego obracają się z prędkością W_0 , aby uzyskać odpowiedni kąt skręcenia ich osi względem osi wsadu. W trzecim

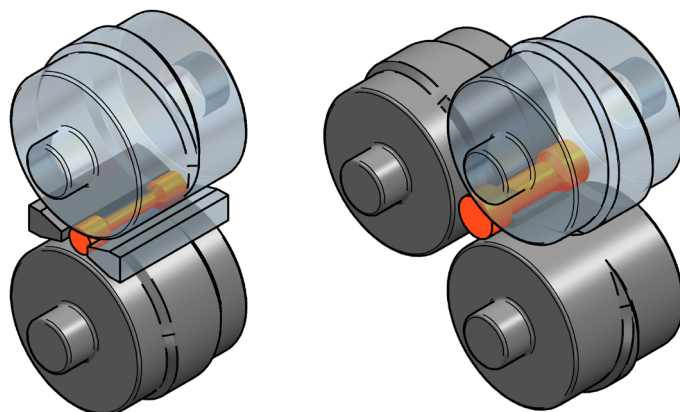
etapie rolki wykonują tylko ruch obrotowy wokół własnej osi symetrii z prędkością N_0 . W tym czasie odbywa się zasadniczy etap procesu – przyrost odkształcenia materiału na jego długości. W ostatnim etapie rolki przemieszczają się z prędkościami W_0 i V_0 w celu powrotu do pozycji początkowej i zakończenia procesu. Przedstawiona metoda jest równie uniwersalna jak walcowanie trzema rolkami, przy czym nie wymaga stosowania uchwytu odpowiedzialnego za osiowe przemieszczenie materiału, bowiem dochodzi do niego samoczynnie wskutek kontaktu rolek z wsadem [13, 67].



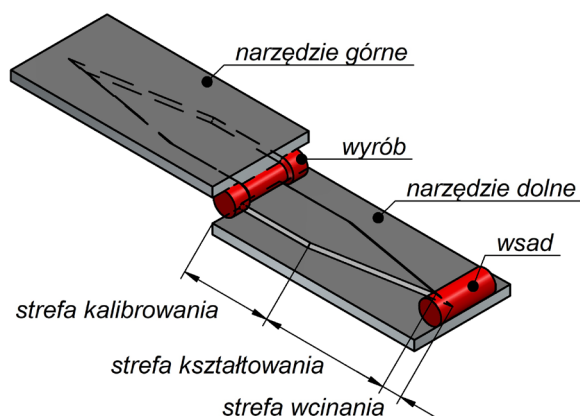
Ryc. 2.13. Schemat procesu walcowania skośnego dwoma rolkami
(opracowanie własne na podstawie [67])

Procesy walcowania poprzeczno-klinowego prowadzone są z wykorzystaniem narzędzi w postaci klinów umiejscowionych na powierzchni walców, płyt lub tulei. Najczęściej proces realizowany jest z zastosowaniem dwóch lub trzech walców (ryc. 2.14) bądź dwóch płyt (ryc. 2.15). Typowe narzędzie składa się z trzech zasadniczych stref: wcinania, kształtowania oraz kalibrowania. Podstawowymi parametrami procesu są kąty kształtowania i rozwarcia klina oraz wartości odkształcenia. Technologia została opracowana z myślą o wytwarzaniu

wyrobów osiowosymetrycznych z wsadów w postaci pręta lub rury [10, 46, 91, 157]. Wyroby drażone kształtowane są jednak rzadziej z uwagi na zjawiska ograniczające, do których zalicza się m.in. niepożądane zniekształcenie przekroju poprzecznego rury, poślizg odkuwki, owalizację przekroju, pocienienie ścianki [47, 92, 117].



Ryc. 2.14. Schematy procesów walcowania poprzeczno-klinowego z zastosowaniem dwóch i trzech walców (opracowanie własne na podstawie [88])



Ryc. 2.15. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego z zastosowaniem dwóch płyt (opracowanie własne na podstawie [93])

Publikacje naukowe dotyczące procesu walcowania poprzeczno-klinowego skupiają się głównie wokół zagadnień związanych z wpływem wybranych parametrów na przebieg procesu i jakość wyrobu, modelowaniem numerycznym i teorią oraz weryfikacją możliwości zastosowania technologii do wytwarzania ściśle określonych wyrobów [45, 90, 114].

Yang i inni [157] opublikowali wyniki badań dotyczących procesu walcowania poprzeczno-klinowego dwoma walcami odkuwki drążonej, w której wartości średnic poszczególnych stopni maleją w jednym kierunku. Oznacza to, że wyrób nie jest symetryczny względem płaszczyzny zawierającej jego przekrój poprzeczny. Wskazano, że podczas walcowania odkuwka przemieszcza się w kierunku osiowym, a tendencja do obwodowego płynięcia materiału powoduje, że wyrób zyskuje owalny kształt. Do prawidłowej realizacji procesu niezbędne jest zastosowanie wsadu o stożkowym zakończeniu oraz dodanie stopnia na końcu odkuwki, który zabezpieczy ją przed osiowym przemieszczeniem.

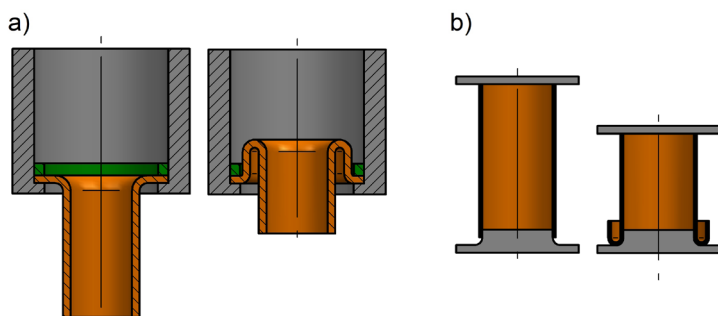
Shen i inni [115] analizie poddali proces kształtowania odkuwki drążonej o zmiennej wartości średnicy otworu. Zastosowano dzielony, stopniowany trzpień, zaś proces walcowania przeprowadzono metodą wykorzystującą dwa walce. Zrealizowane obliczenia numeryczne oraz weryfikacja doświadczalna wykazały, że stopnie trzpienia utrudniają osiowy przepływ materiału, co powoduje jego skręcanie. Obecność trzpienia wpływa na wzrost parametrów siłowych procesu, on sam zaś przenosi obciążenie osiowe i w przypadku walcowania części niesymetrycznych powinien zostać odpowiednio utwierdzony.

Pater i inni [96] przeprowadzili badania dotyczące wpływu geometrii narzędzi na przebieg walcowania poprzeczno-klinowego (z wykorzystaniem dwóch płaskich narzędzi) odkuwki stopniowanego wału pełnego. Zastosowano kliny o zmiennej geometrii i porównano je z typowym klinem o stałej wartości kąta rozwarcia i kształtowania. Stwierdzono, że stosowanie narzędzi o zmiennym kącie rozwarcia jest niekorzystne, ponieważ skutkuje zwiększonym obciążeniem promieniowym i stycznym, większym zużyciem energii, mniej jednorodnym odkształceniem i wyższym prawdopodobieństwem pęknięcia materiału w obszarze osiowym. Z kolei zmienny kąt kształtujący klina jest korzystny, gdyż prowadzi do spadku sił kształtowania, zmniejsza energochłonność procesu i pozytywnie oddziałuje na aspekt utraty spójności materiału.

W innych pracach ww. autorów przedstawiono możliwość aplikacji procesu walcowania poprzeczno-klinowego do kształtowania odkuwki osi kolejowej [94]. Ograniczeniem w stosowaniu tej technologii są duże wymiary osi, których walcowanie wymagałoby użycia walcarek o nieistniejących gabarytach. Z tego powodu zaproponowano nową metodę dwuetapowego kształtowania tymi samymi narzędziami, dzięki której znacząco zmniejsza się rozmiar wymaganej maszyny kuźniczej. Przeprowadzone w tym zakresie badania teoretyczne i doświadczalne wykazały, że metoda jest skuteczna i zapewnia uzyskanie prawidłowego wyrobu, do wykonania którego można zastosować największe dostępne na rynku walcarki.

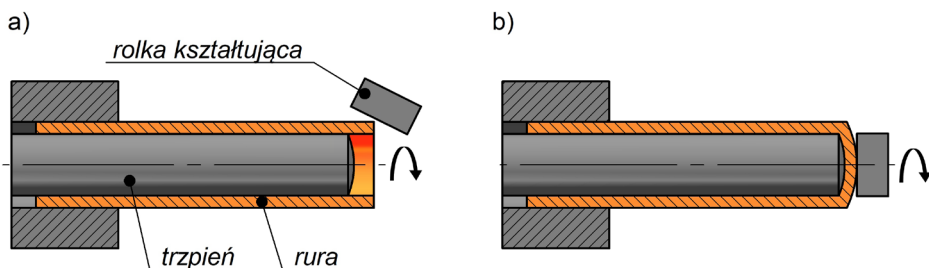
2.7. Wywijanie

Wywijanie jest procesem, w którym możliwe jest kształtowanie wyrobów drążonych posiadających na swoich końcach np. kołnierz, podwójną ściankę na określonej długości, dno itp. Przykładowe metody wywijania swobodnego oraz z zastosowaniem matrycy przedstawiono na rycinie 2.16. W pierwszej z wymienionych metod materiał nie kontaktuje się z narzędziami w strefie odkształcenia, dzięki czemu siły tarcia nie wpływają na przebieg procesu, jak ma to miejsce w drugiej z wymienionych technologii [14, 82, 105].



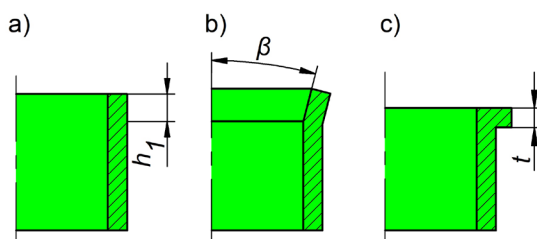
Ryc. 2.16. Schemat procesu wywijania: a) swobodnego; (opracowanie własne na podstawie [104]), b) z zastosowaniem matrycy (opracowanie własne na podstawie [76])

Kształtowanie końca rury możliwe jest również metodą zbliżoną do wyoblania, której schemat przedstawiono na rycinie 2.17. W wykonanych przykładowych badaniach [98] technologię wykorzystano do kształtowania rur amortyzatorów, w których kluczowym parametrem jest szczelność dna. Duży wpływ w tym zakresie ma czas kontaktu rolki kształtującej z materiałem w końcowym etapie procesu. Jego skrócenie powoduje mniejsze spadki temperatury wsadu i uzyskanie wyrobu o zakładanych parametrach.



Ryc. 2.17. Schemat kształtowania końca rury metodą wyoblania na gorąco: a) początek procesu, b) koniec procesu (opracowanie własne na podstawie [98])

Inną metodą kształtowania stopnia na końcu wsadu rurowego jest wywijanie połączone z procesem spęczania. W pierwszym etapie swobodny koniec rury o długości h_1 wywija się pod kątem β (ryc. 2.18b), po czym w drugim etapie spęca się go na końcową grubość t (ryc. 2.18c). Kołnierz może być kształtowany swobodnie bądź w wykroju zamkniętym. Badania dotyczące tej technologii wskazują, że dzięki wstępnemu wywinięciu ogranicza się możliwość powstawania zakucia w środkowej strefie kołnierza. Wskutek tego możliwe jest wytwarzanie większych kołnierzy. Dodatkowo w omawianej metodzie występują mniejsze siły spęczania niż w modelu klasycznym [35, 68].

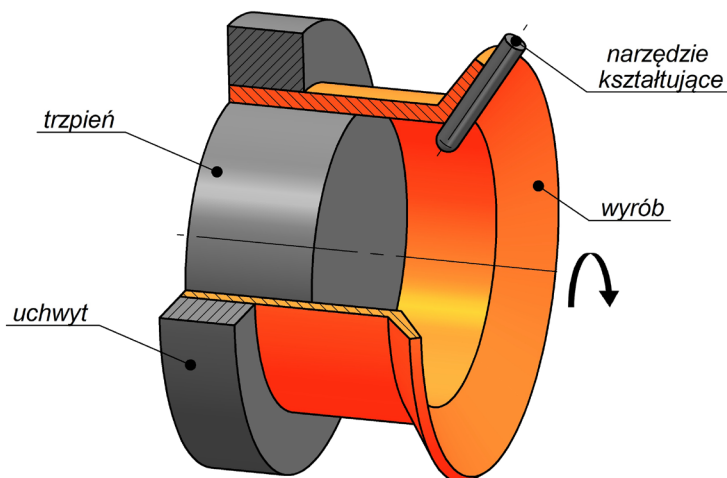


Ryc. 2.18. Schemat dwuetapowego kształtowania kołnierza: a) wsad drążony, b) wywijanie, c) spęczanie (opracowanie własne na podstawie [35])

Kolejną metodą wywijania kołnierza rury jest kształtowanie inkrementalne. Jego zaletą jest duża uniwersalność z uwagi na możliwość zastosowania jednego oprzyrządowania do wytwarzania wielu typów wyrobów. Jest to niewątpliwą korzyścią w porównaniu do procesów wywijania z zastosowaniem matryc. Metoda jest zbliżona do procesów punktowego kształtowania przyrostowego przedstawionych we wcześniejszym podrozdziale.

Schemat wywijania inkrementalnego przedstawiono na rycinie 2.19. Kołnierz kształtowany jest za pomocą narzędzia w postaci trzpienia o kulistym zakończeniu. Proces realizuje się w kilku etapach polegających na wywijaniu narzędziem usytuowanym pod odpowiednim kątem do osi wsadu wykonującego ruch obrotowy. W kolejnych przejściach zwiększa się wartość wspomnianego kąta o kilka stopni i realizuje kolejne przejścia. Ostatni etap polega na ustawieniu osi narzędzia równoległe do osi wsadu i przemieszczeniu tegoż narzędzia w kierunku promieniowym, dzięki czemu czołowa powierzchnia wywiniętego kołnierza zajmuje pozycję prostopadłą do osi wyrobu. Badania dotyczące tej technologii wskazują, że wartości siły promieniowej i osiowej są związane z bieżącym kątem nachylenia narzędzia i przyrostem tego kąta w każdym przejściu. Im większy przyrost wartości kąta, tym większe odkształcenie

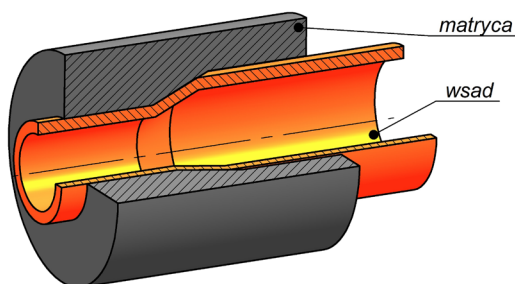
rury i tym większe siły promieniowe i osiowe. Wraz ze zmianą kąta od 0° do około 45° siła promieniowa przyłożona do narzędzia stopniowo wzrasta, natomiast gdy kąt kołnierza staje się coraz większy, siła promieniowa stopniowo maleje, a dominować zaczyna siła osiowa [41].



Ryc. 2.19. Schemat inkrementalnego wywijania kołnierza rury
(opracowanie własne na podstawie [41])

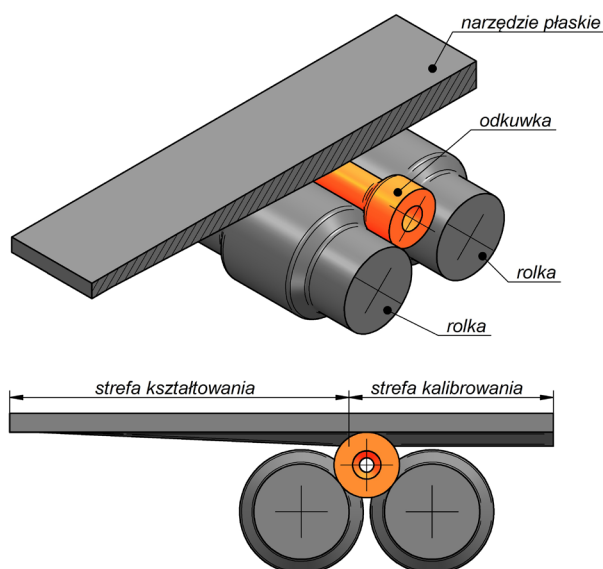
2.8. Obciskanie

Obciskanie jest technologią umożliwiającą wytwarzanie stopniowanych wyrobów drążonych, w ramach której kształtowanie poszczególnych stopni odkuwki odbywa się głównie wskutek redukcji średnicy zewnętrznej wsadu. Metoda może być realizowana wg dwóch zasadniczych koncepcji, w których wsad może wykonywać ruch obrotowy bądź też nie.



Ryc. 2.20. Schemat procesu obciskania z zastosowaniem matrycy
(opracowanie własne na podstawie [153])

Schemat procesu obciskania, w którym wsad nie wykonuje ruchu obrotowego przedstawiono na rycinie 2.20. Kształtowanie stopnia odbywa się wskutek nacisku narzędzia posiadającego stopniowany otwór. Matryca przemieszcza się wzdłuż osi wsadu powodując redukcję jego średnicy zewnętrznej. Kluczowymi parametrami procesu są kąt strefy stożkowej narzędzia, warunki tarcia, prędkość narzędzia, wartość odkształcenia, jak również parametry termiczne. Przykładowe badania w tym zakresie wskazują, że proces może być realizowany przy zastosowaniu stałej lub zmiennej temperatury wsadu na długości strefy odkształcaniej. Zróżnicowana wartość temperatury (którą uzyskuje się wskutek odpowiedniego nagrzewu) korzystnie wpływa na przebieg obciskania [153].

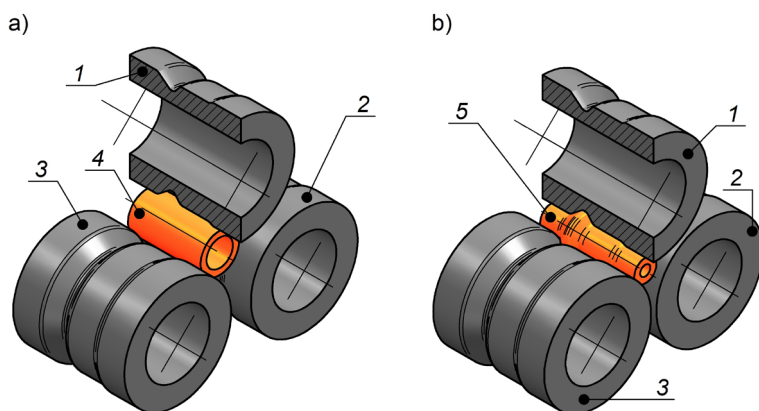


Ryc. 2.21. Schemat procesu obciskania z zastosowaniem rolek i narzędzia płaskiego (opracowanie własne na podstawie [131])

Schemat procesu obciskania, w którym odkawka wykonuje ruch obrotowy przedstawiono na rycinie 2.21. Wsad umieszczony jest pomiędzy dwoma rolkami wykonującymi ruch obrotowy oraz narzędziem płaskim wykonującym ruch postępowy. Na powierzchni tego ostatniego wykonany jest klin, który powoduje odkształcenie wsadu. Wskutek przemieszczenia strefa kształtowania narzędzia płaskiego wcina się w materiał, co prowadzi do redukcji jego średnicy zewnętrznej. Następnie odkawka wchodzi w kontakt ze strefą kalibrowania, w której uzyskuje się ostateczny kształt odkawki. Główne ograniczenia procesu wynikają z geometrii oraz kinematyki narzędzi. Zastosowanie narzędzia z klinem powoduje, że w celu uzyskania dużych redukcji przekroju

i przy zastosowaniu małego kąta pochylenia klina znacząco wydłuża się jego długość. Z kolei zwiększenie tego kąta może prowadzić do powstawania wad wyrobu np. zniekształcenia ścianki. Z tego powodu powyższa technologia może być stosowana do wytwarzania stosunkowo prostych geometrycznie odkuwek o niewielkich rozpiętościach wartości średnic poszczególnych stopni [131].

Znacznie większe możliwości kształtowania uzyskuje się w przypadku realizacji procesu obciskania z zastosowaniem trzech walców, którego schemat przedstawiono na rycinie 2.22. W procesie tym wykorzystywane są trzy identyczne walce, które poza ruchem obrotowym mogą przemieszczać się w kierunku promieniowym, zbliżając się tym samym do osi kształtowanej odkuwki. Dzięki stopniowemu zagłębianiu się rolek w materiał przeciwdziała się możliwości zniekształcenia ścianki wsadu, a duża redukcja średnicy wsadu nie wpływa istotnie na wymiary narzędzia, co czyni tę technologię bardziej uniwersalną niż obciskanie z zastosowaniem dwóch rolek i narzędzia płaskiego [132, 135, 136].



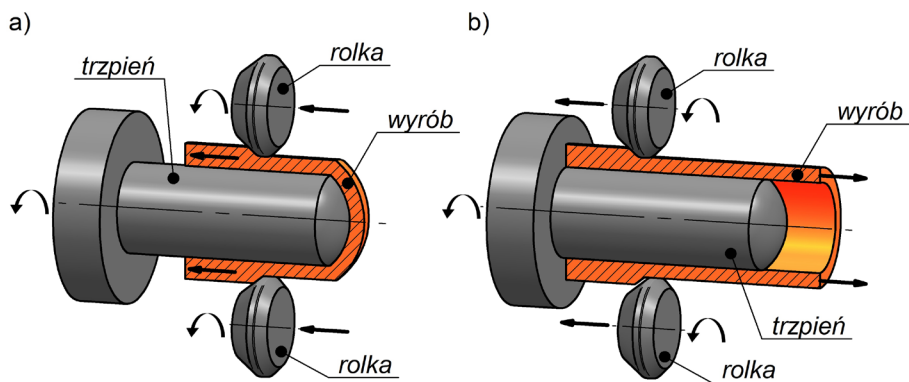
Ryc. 2.22. Schemat procesu obciskania obrotowego trzema walcami: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1, 2, 3 – walce, 4 – wsad, 5 – odkuwka (opracowanie własne na podstawie [89])

Specyfika realizacji procesu obciskania obrotowego trzema walcami wpływa na niejednorodność odkształcenia wyrobu i jego koncentrację przy warstwach powierzchniowych odkuwki. Ponadto w trakcie trwania procesu grubość ścianki materiału wzrasta, podobnie jak długości formowanych stopni. Dużą zaletą technologii jest możliwość kształtowania materiałów zarówno w warunkach obróbki plastycznej na gorąco jak i na zimno. W tym drugim przypadku należy mieć jednak na uwadze, że wartości granicznego odkształcenia są mniejsze niż podczas obciskania w wyższych temperaturach. Poza parametrami termicznymi kluczowy wpływ na proces mają również parametry

kinematyczne narzędzi, ich geometria oraz wymiary przekroju poprzecznego wsadu [131].

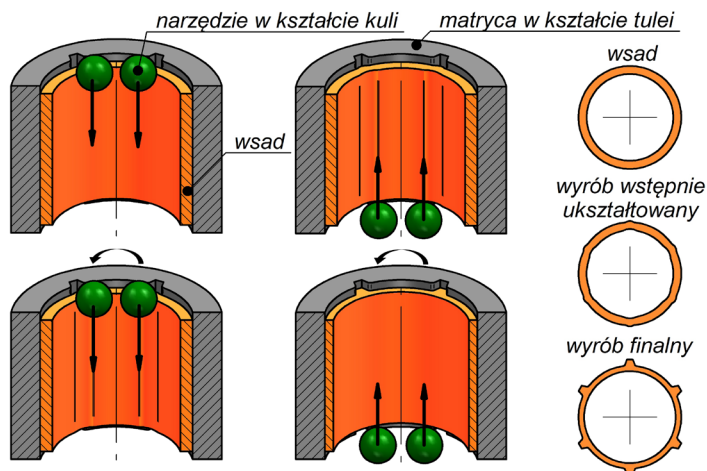
2.9. Zgniatanie obrotowe

Zgniatanie obrotowe jest technologią umożliwiającą kształtowanie wyrobów drażonych wskutek redukcji grubości ścianki wsadu wykonującego ruch obrotowy. Proces realizowany jest zazwyczaj z wykorzystaniem rolek (czasami zastępowanych kulami), które również wykonują ruch obrotowy i dodatkowo przemieszczają się w kierunku osiowym. Wyróżnia się dwie konwencjonalne odmiany zgniatania obrotowego – współbieżne i przeciwbieżne (ryc. 2.23).



Ryc. 2.23. Schemat procesu zgniatania obrotowego: a) współbieżnego, b) przeciwbieżnego (opracowanie własne na podstawie [137])

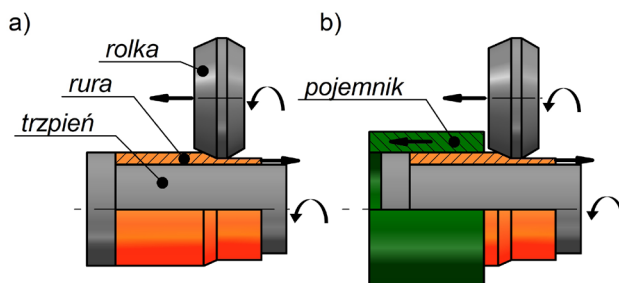
W pierwszym przypadku kierunek płynięcia materiału jest zgodny z kierunkiem przemieszczania się rolek, natomiast w drugim kierunki te są przeciwstawne. Liczne badania tej technologii koncentrują się wokół analizy wpływu parametrów procesu na jakość wyrobu oraz możliwości wytwarzania określonych części przy zastosowaniu różnych odmian procesu [50, 103, 143, 151, 154, 165]. Kluczowymi parametrami zgniatania obrotowego są prędkość obrotowa wsadu i posuw rolek, wartość odkształcenia oraz geometria trzpienia i rolek. Metoda może być stosowana do wytwarzania elementów zarówno osiowosymetrycznych, jak i posiadających na powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej występy nieosiowosymetryczne, np. spiralne żebra usztywniające. Wyroby tego rodzaju wykonuje się przy użyciu trzpieni kształtowych lub tulei z wykrojem umiejscowionym w otworze, wewnątrz którego znajduje się wsad [1, 26, 72, 77, 144, 162].



Ryc. 2.24. Schemat procesu dwuetapowego zgniatań obrotowego
(opracowanie własne na podstawie [21])

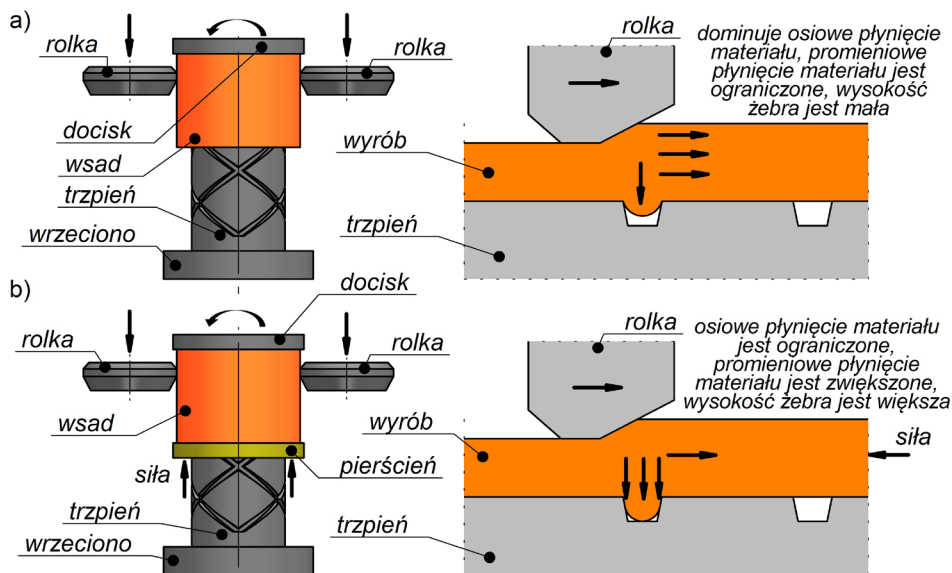
Na rycinie 2.24 przedstawiono schemat procesu dwuetapowego zgniatań obrotowego części posiadającej wzdłużne żebra zewnętrzne. Wsad rurowy umieszczony jest w tulei, której otwór (stanowiący wykrój) odpowiada zewnętrznemu zarysowi odkuwki. W pierwszym etapie narzędzia w kształcie kul przemieszczają się w kierunku osiowym powodując wstępne wypełnienie wykroju w strefie żeber. W drugim etapie odbywa się typowy proces zgniatań obrotowego, w którym to narzędzia kuliste przemieszczają się osiowo, a wsad wykonuje ruch obrotowy. Realizacja pierwszego etapu sprzyja promieniowemu płynięciu materiału, dzięki czemu uzyskana w ten sposób przedkuwka zapewnia lepsze wypełnienie wykroju w porównaniu do tych wyprodukowanych z zastosowaniem jednoetapowej realizacji procesu. Wewnętrzne rowki utworzone przez kule zmniejszają opory obwodowego płynięcia materiału ze stref bez żebra do stref uźebrowanych. W porównaniu do jednoetapowej realizacji procesu, naprężenia obwodowe są mniejsze, wzrastają zaś odkształcenie obwodowe i jego prędkość, co ułatwia płynięcie metalu do wykroju żebra. Parametry procesu, takie jak odkształcenie w pierwszym etapie oraz średnica kuli wywierają bezpośredni wpływ na jakość wyrobu. Duże odkształcenie w pierwszym etapie może poprawić jakość zewnętrznych żeber, ale jego wartość nie powinna przekraczać całkowitego odkształcenia, w przeciwnym bowiem razie na wewnętrznej ścianie wsadu mogą powstawać zakucia; z kolei zwiększenie średnicy kuli do określonego stopnia sprzyja formowaniu żeber, ale efekt ten maleje, gdy średnica kuli jest zbyt duża [21].

Na rycinie 2.25 przedstawiono schemat procesu przeciwbieżnego zgniatania obrotowego z zastosowaniem pojemnika. Do oprzyrządowania wykorzystanego w konwencjonalnym procesie przeciwbieżnego zgniatania obrotowego dodano pojemnik, w którym znajduje się wsad i który przemieszcza się w kierunku osiowym wraz z rolkami. Dzięki temu znajdująca się przed rolkami strefa wsadu znajduje się w wykroju zamkniętym, co uniemożliwia niepożądane zniekształcenie. W związku z powyższym w jednym przejściu możliwe są do uzyskania znacznie większe odkształcenia niż w procesie realizowanym bez pojemnika, wskutek czego możliwe jest wytwarzanie wyrobów o strukturze drobnoziarnistej [28].



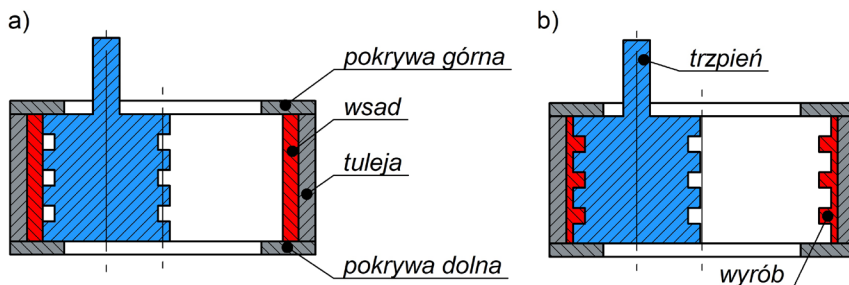
Ryc. 2.25. Schemat procesu zgniatania obrotowego: a) konwencjonalnego przeciwbieżnego, b) przeciwbieżnego z zastosowaniem pojemnika (opracowanie własne na podstawie [28])

Z kolei na rycinie 2.26 przedstawiono proces współbieżnego zgniatania obrotowego połączonego z wyciskaniem. Technologia ta jest szczególnie korzystna przy kształtowaniu wyrobów posiadających wewnętrzne uźebrowanie. Przy wytwarzaniu tego typu części metodą konwencjonalnego współbieżnego zgniatania obrotowego (ryc. 2.26a) wysokość żebra jest ograniczona. Wynika to z faktu, iż dominuje osiowe płynięcie materiału, co limituje możliwość płynięcia promieniowego i wypełniania wykroju [73, 74]. W związku z powyższym zwiększenie wysokości żebra możliwe jest dzięki zwiększeniu promieniowego płynięcia materiału. Efekt ten można uzyskać wskutek ograniczenia płynięcia osiowego poprzez przyłożenie do końca wsadu siły powodującej jego ściskanie (ryc. 2.26b). W warunkach rzeczywistych proces ów można przeprowadzić z zastosowaniem pierścienia, który dociskany jest do materiału za pomocą odpowiedniej liczby sprężyn o określonej charakterystyce. Z przeprowadzonych w tym zakresie badań wynika, że powyższa modyfikacja umożliwia wykonanie żebra o wysokości większej o 53% w porównaniu do konwencjonalnej metody współbieżnego zgniatania obrotowego [27].



Ryc. 2.26. Schemat procesu zgniatania obrotowego: a) konwencjonalnego współbieżnego, b) współbieżnego połączonego z wyciskaniem (opracowanie własne na podstawie [27])

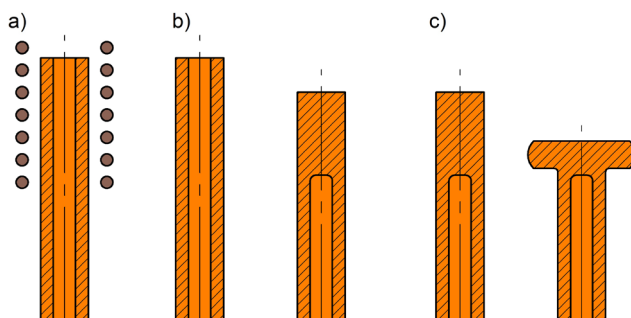
Technologią alternatywną do zgniatania obrotowego, umożliwiającą wytwarzanie wyrobów z wewnętrznym uźbrowaniem, jest metoda bazująca na walcowaniu (ryc. 2.27). Trzpień z odpowiednim wykresem wykonuje ruch obrotowy i przemieszcza w kierunku promieniowym, redukując grubość ścianki obracającego się wsadu umieszczonego w tulei. W tym przypadku kluczowymi parametrami procesu są wartości poszczególnych prędkości oraz geometria trzpienia [36].



Ryc. 2.27. Schemat procesu kształtowania pierścienia z wewnętrznym uźbrowaniem: a) początek procesu, b) koniec procesu (opracowanie własne na podstawie [36])

2.10. Kształtowanie metodami kucia

Kucie jest technologią umożliwiającą kształtowanie wyrobów stopniowanych ze wsadu w postaci pręta lub rury w warunkach obróbki plastycznej na zimno, na ciepło oraz na gorąco. Do typowych odmian procesu można zaliczyć kucie matrycowe w matrycach otwartych i zamkniętych, kucie swobodne oraz pół-swobodne. W zależności od stopnia skomplikowania odkuwki stosuje się jedną bądź więcej operacji, w których stopniowo odkształca się wsad. W takich wypadkach technologia kucia nie zawsze jest jedyną techniką wytwarzania wyrobu – niekiedy towarzyszą jej inne metody plastycznego kształtowania, np. wyciskanie. Narzędzia wykorzystywane w procesach kucia przyjmują bardziej złożony kształt i kinematykę niż typowe kostki matrycowe czy kowadła wykonujące ruch posuwisto-zwrotny. Z tego względu jako przykłady zastosowań technologii kucia do wytwarzania wyrobów stopniowanych w dalszej części rozdziału przedstawiono procesy składające się z kilku etapów kształtowania [37, 38, 65, 99, 149].

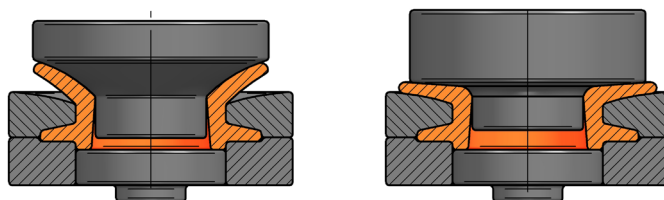


Ryc. 2.28. Schemat procesu nieizotermicznego kucia odkuwki wału drążonego:
a) miejscowe nagrzewanie indukcyjne wsadu drążonego, b), c) spękanie
(opracowanie własne na podstawie [85])

Pang i inni [85, 86, 87] przedstawili nowy proces nieizotermicznego kucia odkuwki wału drążonego (ryc. 2.28). Jako wsad zastosowano odcinek rury, której fragment nagrzewany jest indukcyjnie. Nagrzany koniec spęcza się w wykroju w taki sposób, aby materiał zwiększał grubość ścianki wskutek zmniejszania średnicy wewnętrznej. W nienagrzonej strefie wsadu materiał nie ulega znacznym odkształceniom z uwagi na wyższą wartość naprężeń uplastyczniających niż w strefie gorącej. Etap ten realizowany jest do momentu, w którym odkształcany fragment rury przyjmie postać zbliżoną do pręta. W kolejnej operacji uzyskaną przedkuwkę kształtuje się takimi samymi

metodami, jak przy kuciu prętów – spęcza się swobodnie lub w wykrojach stożkowych. Wyniki badań wskazują, że zmiana grubości ścianki w nienagrzonej strefie wsadu mieści się w zakresie 5%. Zwiększenie średnicy wewnętrznej wsadu jest korzystne z uwagi na zmniejszenie masy odkuwki, powoduje jednak wzrost intensywności odkształceń wyrobu, które to koncentrują się ponadto w kształtowanym kołnierzu.

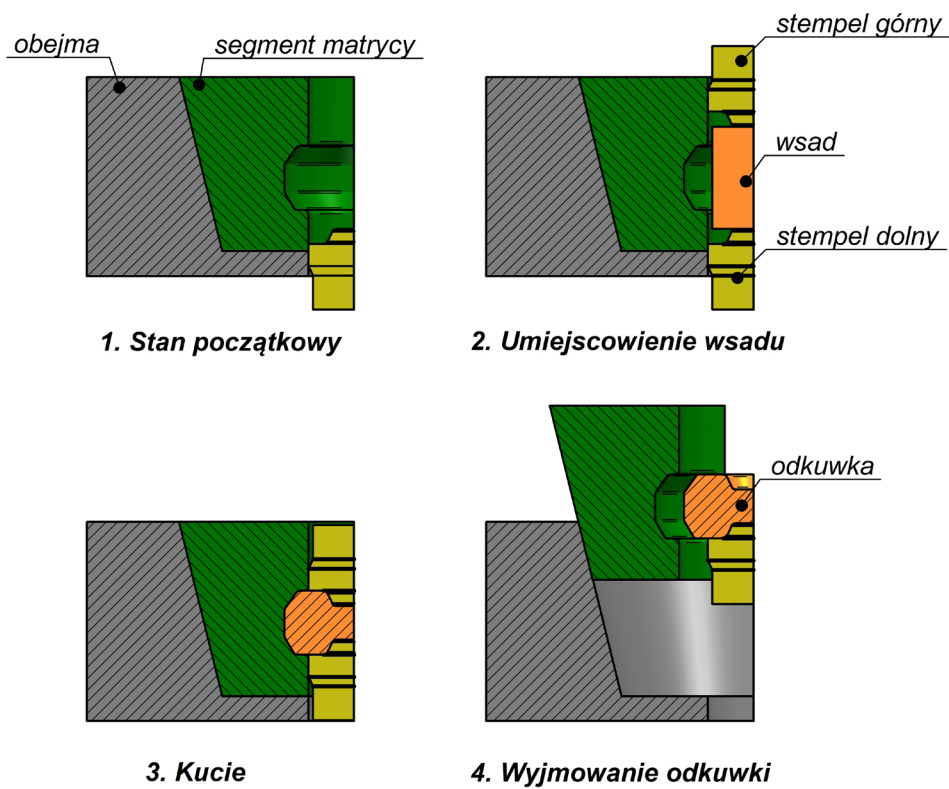
Hawryluk i inni [39] przedstawili wyniki badań dotyczących kucia odkuwki posiadającej dwa kołnierze. Tego typu wyroby mogą być produkowane jako składane lub monolityczne. Pierwsza z metod polega na łączeniu kołnierza z odkuwką piasty posiadającej jeden kołnierz bądź na łączeniu obu kołnierzy z piastą bez kołnierza. W celu zwiększenia efektywności procesu i jakości wyrobu zaproponowano nową technologię umożliwiającą wykonanie części monolitycznej. Proces polega na wieloetapowym kształtowaniu, którego kluczowymi operacjami są kucie przedkuwki posiadającej jeden kołnierz oraz dwuetapowe kształtowanie drugiego kołnierza. W pierwszym etapie drugi kołnierz jest wstępnie rozpychany stemplem stożkowym, aby w drugim możliwe było jego końcowe kucie (ryc. 2.29).



Ryc. 2.29. Wybrane etapy kształtowania odkuwki z dwustronnym kołnierzem
(opracowanie własne na podstawie [39])

Operacje te wykonywane są w matrycach dzielonych umożliwiającich wyjęcie wyrobu z odkuwki. Matryce takie stosowane są w przypadku kształtowania części o złożonej geometrii, których nie da się wykonać w konwencjonalnych matrycach posiadających jedną płaszczyznę podziału. Zaproponowana technologia kucia odkuwki z dwoma kołnierzami została zweryfikowana w warunkach przemysłowych, co potwierdziło jej skuteczność.

Innym przykładem zastosowania matryc dzielonych jest proces kucia na zimno bieżni wewnętrznej przegubu. W procesie wykorzystywanych jest sześć segmentów, które wraz ze stemplem górnym i dolnym kontaktują się z materiałem odkształcanym (ryc. 2.30). Po zakończeniu procesu kucia ruch stempla górnego powoduje rozsuwanie się segmentów, co umożliwia wyjęcie odkuwki z narzędzi [58, 60].



Ryc. 2.30. Schemat procesu kucia odkuwki bieżni wewnętrznej przegubu
(opracowanie własne na podstawie [58])

Kolejnym przykładem wyrobu kształtowanego w toku kilku operacji jest odkuwka bieżni zewnętrznej przegubu. Z badań realizowanych przez Ku i innych [59, 61] wynika, że możliwe jest zastąpienie kucia na ciepło kształtowaniem na zimno, w którym dodatkowo zmniejszono liczbę operacji. Innymi typowymi przykładami zastosowania kucia wielooperacyjnego są różnego rodzaju technologie kształtowania odkuwek elementów złącznych w rodzaju śrub, nakrętek [17, 158] jak również odkuwek wałów napędowych [56] i innych części o zbliżonej geometrii.

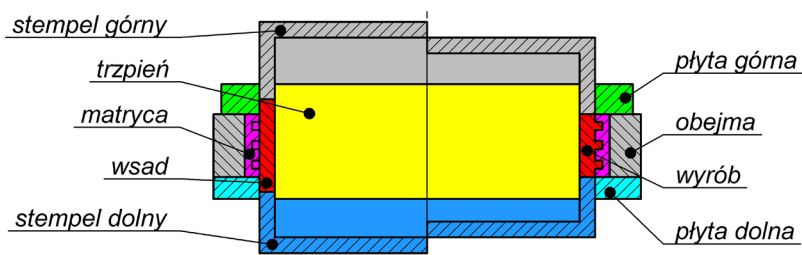
2.11. Wyciskanie

Procesy wyciskania mogą być realizowane różnymi metodami, dzięki którym uzyskuje się zróżnicowane wyroby – pręty, profile czy wypraski [40, 51, 54, 57, 62, 66, 79, 118, 168, 169]. Jednym z podstawowych kryteriów podziału

technologii jest kierunek płynięcia materiału w odniesieniu do kierunku ruchu stempla. W związku z powyższym wyróżnia się wyciskanie współbieżne, przeciwbieżne, boczne oraz złożone. Poza wymienionymi istnieje wiele innych odmian technologii, w których wprowadzono różnego rodzaju modyfikacje mające na celu zwiększenie zakresu stosowalności metody bądź uzyskanie wyrobu o określonej geometrii lub właściwościach. Wiele prac naukowych koncentruje się wokół analizy technologii kształtowania wyrobów o strukturze drobnoziarnistej i podwyższonych właściwościach mechanicznych. Stosuje się w tym celu m.in. procesy wyciskania w kanale kątowym [5], wyciskanie KoBo [6, 7, 8, 22, 23, 125, 150, 176, 177], wyciskanie współbieżne z odpowiednimi modyfikacjami [42, 83, 130, 166], wyciskanie przeciwbieżne z obrotowym narzędziem [15, 16, 122] czy też procesy kształtowania złożonego [2, 63, 64].

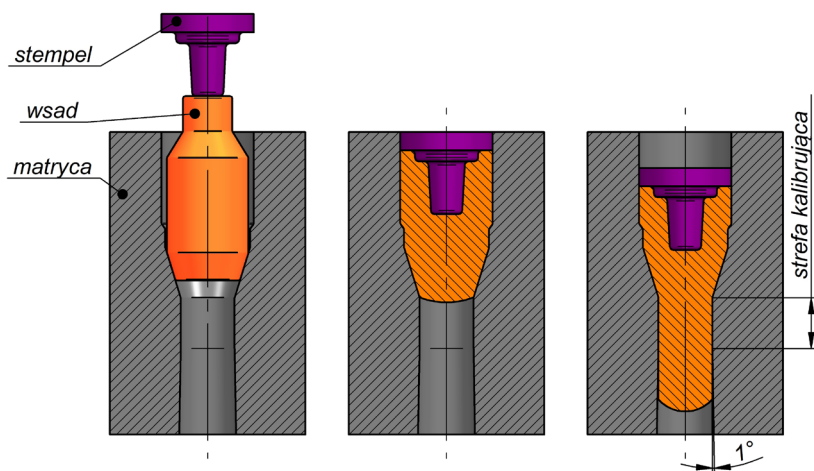
W odniesieniu do produkcji wyrobów stopniowanych często stosowane są metody wyciskania bocznego oraz procesy kombinowane. Umożliwiają one wytwarzanie części o zmiennej średnicy bądź posiadających występy na powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej wyrobu [44, 49, 55, 78, 81, 140, 167].

Tian i inni [126] poddali analizie nową technologię wyciskania w wykroju zamkniętym posiadającego zewnętrzne uźebrowanie. Proces może być realizowany z zastosowaniem jednego lub dwóch ruchomych stempli, które przemieszczają się wzdłuż osi symetrii kształtowanej wypraski (ryc. 2.31). Z uwagi na geometrię części zastosowano dzielone narzędzia, które umożliwiają wyjęcie wyrobu z przyrządu po zakończeniu procesu. Stwierdzono, że wysokość wsadu drażonego i współczynnik tarcia wykazują korelację dodatnią z siłą wyciskania. Ponadto materiał płynie korzystniej podczas realizacji procesu z dwoma przemieszczającymi się stemplami niż przy ruchu tylko jednego narzędzia.



Ryc. 2.31. Schemat procesu wyciskania w wykroju zamkniętym z zastosowaniem dwóch stempli (opracowanie własne na podstawie [126])

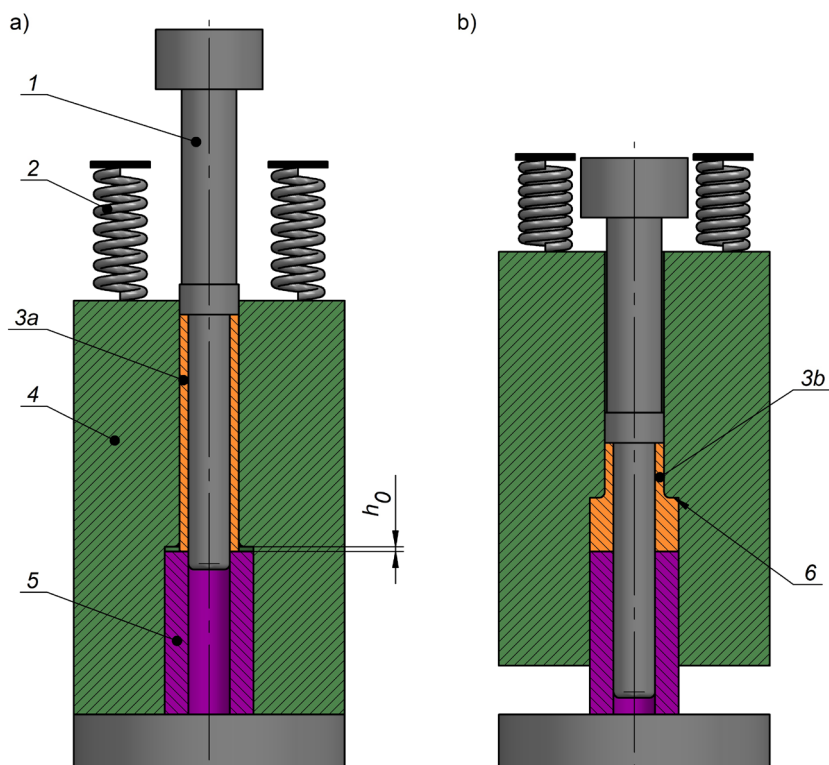
Liu i inni [71] przeanalizowali proces wyciskania wału stosowanego w silnikach lotniczych. Do jego wykonania wykorzystano technologię wyciskania złożonego (wybrane etapy przedstawiono na rycinie 2.32). Wraz z naciskiem stempla dochodzi do przeciwbieżnego i współbieżnego płynięcia materiału odpowiednio w górnej i dolnej strefie wsadu. Od momentu, gdy górna część wypraski zostanie ukształtowana i materiał wejdzie w pełny kontakt ze stemplem, kształtowanie odbywa się wskutek wyciskania współbieżnego. Po zakończeniu procesu wyrób usuwany jest z matrycy, co ułatwia jej stożkowa strefa o kącie pochylenia równym 1° umiejscowiona za strefą kalibrującą o długości 150 mm. Z przedstawionych wyników badań wynika, że warunki tarcia znacząco wpływają na przebieg procesu, w tym na siłę wyciskania i wartość odkształcenia. Temperatura wsadu znacząco oddziałuje na przebieg siły wyciskania oraz rozkład odkształceń i mikrostrukturę wypraski. Z kolei wzrost prędkości stempla do pewnej wartości granicznej korzystnie wpływa na przebieg procesu (jeśli chodzi o siły kształtowania, czas trwania procesu, spadek temperatury wsadu, trwałość stempla), niemniej jednak po jej przekroczeniu oddziaływanie to jest małe.



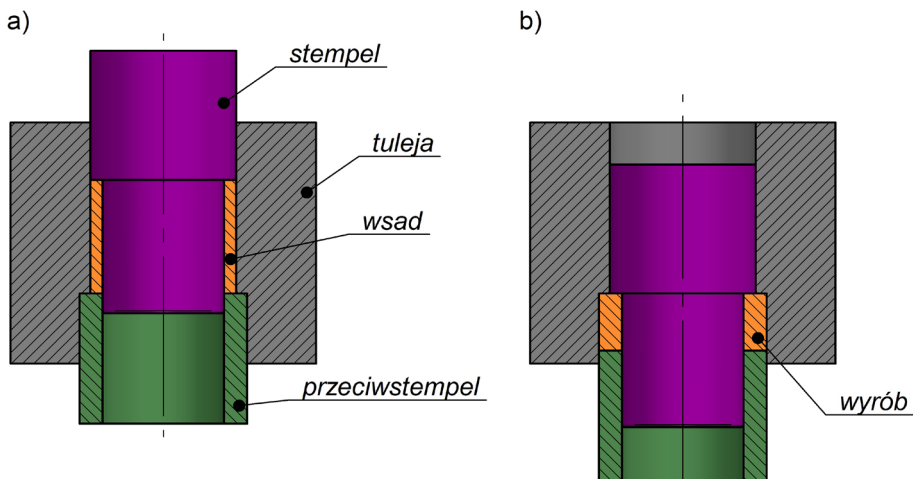
Ryc. 2.32. Wybrane etapy wyciskania wału stosowanego w silnikach lotniczych (opracowanie własne na podstawie [71])

Kolejnym przykładem procesu złożonego jest technologia wyciskania z ruchomą tuleją. Do jej realizacji mogą być wykorzystane typowe prasy kuźnicze posiadające jeden suwak roboczy. Kształtowanie odbywa się w wykroju zamkniętym tworzonym przez stempel 1, tuleję ruchomą 4 i tuleję nieruchomą 5 (ryc. 2.33). W wyniku nacisku stempla na wsad 3a dochodzi do wypełniania ww. wykroju o początkowej wysokości h_0 . Wskutek tego wyciskany stopień

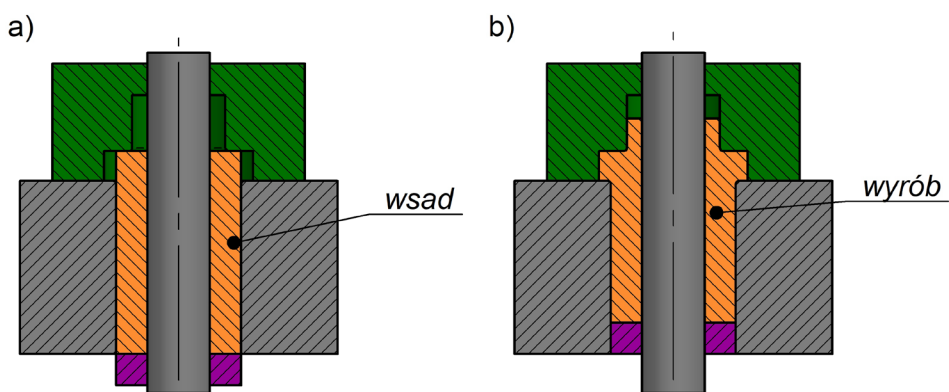
zwiększa swoją średnicę, a odkształcany materiał w coraz większym stopniu oddziałuje na czołową powierzchnię 6 tulei ruchomej, co powoduje, że w pewnym momencie zaczyna się ona samoczynnie przemieszczać przeciwnie do ruchu stempla. Sprężyny 2 zabezpieczają tuleję ruchomą zarówno przed zbyt szybkim przemieszczaniem się, jak i przed zbyt wczesnym rozpoczęciem ruchu. Powyższa metoda umożliwia kształtowanie wyrobów drążonych ze stopniem o stosunkowo dużej wysokości za pomocą pojedynczego ruchu roboczego stempla. Ponadto możliwe jest kształtowanie wieloetapowe, w którym zwiększa się średnicę kołnierza kosztem zmniejszenia jego wysokości. Do kluczowych parametrów procesu zalicza się początkową wysokość wykroju zamkniętego, średnicę kołnierza, siłę docisku tulei ruchomej (regulowaną sprężynami) oraz wartość promienia zaokrąglenia jej krawędzi roboczej. Główne zjawiska ograniczające to możliwość wyboczenia ścianki wsadu w początkowej fazie procesu, niewypełnienie wykroju, które w zależności od zastosowanych parametrów może być zlokalizowane w różnych strefach wypraski, a także zakucie i fałdowanie w strefie wyciskanego stopnia [29, 147, 148].



Ryc. 2.33. Schemat procesu wyciskania z ruchomą tuleją: a) początek procesu, b) koniec procesu; opis w tekście (opracowanie własne na podstawie [148])



Ryc. 2.34. Schemat procesu spęczania z kontrolowaną strefą odkształcenia:
a) początek procesu, b) koniec procesu (opracowanie własne na podstawie [174])



Ryc. 2.35. Schemat procesu kształtowania kołnierza z pocienieniem ścianki wsadu:
a) początek procesu, b) koniec procesu (opracowanie własne na podstawie [4])

Technologią zbliżoną do powyżej opisanego wyciskania z ruchomą tuleją jest spęczanie z kontrolowaną strefą odkształcenia (ryc. 2.34). Kształtowanie wyrobu również odbywa się wykroju zamkniętym, niemniej jednak tuleja współtworząca wykroj jest nieruchoma, natomiast współbieżnie przemieszczają się stempel i przeciwtempel. Podobnie jak w procesie wyciskania z ruchomą tuleją zaletą omawianej technologii spęczania jest przeciwdziałanie zjawisku wyboczenia ścianki wsadu dzięki odpowiedniej kinematyce i geometrii narzędzi [171, 172, 173, 175].

Metoda bazująca na wyciskaniu i spęczaniu to technologia, w której jednocześnie i z taką samą prędkością przemieszczają się dwa narzędzia, a stopień wyrobu kształtowany jest w wykroju zamkniętym – kołnierz spęczany jest z materiału płynącego wskutek redukcji grubości ścianki wsadu (ryc. 2.35). Prawidłowy przebieg tego procesu mogą zakłócić ewentualne wyboczenia czy pęknięcia wsadu [4].

2.12. Podsumowanie przeglądu literatury

Przedstawione metody plastycznego kształtowania wyrobów stopniowanych umożliwiają wytwarzanie zróżnicowanych produktów. Są to wykonywane ze wsadu w postaci rury lub pręta odkuwki zarówno drążone, jak i pełne, powstające wskutek kształtowania pod naciskiem wywieranym przez narzędzia. Z kolei oprzyrządowanie jest mocno zróżnicowane pod względem budowy oraz kinematyki i zależy przede wszystkim od specyfiki procesu. W technologiach, w których materiał odkształcany wykonuje ruch obrotowy, najczęściej jako narzędzia stosowane są walce lub płyty. Z kolei metody, w których wsad wykonuje ruch postępowy, realizowane są zazwyczaj przy wykorzystaniu narzędzi w postaci matryc, pojemników, stempli itp. Wdrażanie poszczególnych technologii możliwe jest przy zastosowaniu zarówno maszyn specjalistycznych, jak i uniwersalnych, które zostały wyposażone w odpowiednie oprzyrządowanie. Niemniej jednak duża grupa technologii może być zrealizowana tylko z wykorzystaniem dedykowanych maszyn (walcarki, kowarki, prasy obwiedniowe, agregaty do obciskania, maszyny do zgniatania obrotowego). Ponadto wiele metod predystynowanych jest do produkcji tylko jednych typów odkuwek – pełnych lub drążonych z jednego rodzaju wsadu w postaci pręta lub rury. Natomiast tylko wybrane technologie są na tyle uniwersalne, że umożliwiają stosowanie obu ww. wsadów. Z tego powodu dobór odpowiedniej technologii do wytwarzania określonego wyrobu jest uwarunkowany wieloma czynnikami. Wśród nich wyróżnić można przede wszystkim dostępny park maszynowy, wielkość produkcji, dokładność i jednostkowy koszt wykonania odkuwki.

Z przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia wynika również, że liczne badania naukowe ukierunkowane są na poszukiwanie nowych metod plastycznego kształtowania wyrobów stopniowanych bądź modyfikację istniejących technologii. Działania te mają na celu zwiększenie możliwości formowania coraz szerszego asortymentu wyrobów, skrócenie czasu wytwarzania produktów lub też minimalizację kosztów produkcji poprzez stosowanie bardziej

elastycznych technologii możliwych do realizacji przy wykorzystaniu uniwersalnych maszyn lub narzędzi.

Mając powyższe na uwadze, należy uznać za zasadne prowadzenie prac mających na celu poszukiwanie i poddawanie analizie nowatorskich metod plastycznego kształtowania wyrobów stopniowanych, które charakteryzować się będą uniwersalnością i będą zgodne z ideą elastycznych systemów produkcyjnych. W związku z tym zrealizowane zostały badania teoretyczne i doświadczalne dotyczące nowej, autorskiej technologii, w której odkuwka kształtowana jest metodą spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Ich celem jest określenie zakresu stosowalności technologii, analiza wpływu wybranych parametrów technologicznych na przebieg procesu i jakość wyrobu oraz identyfikacja zjawisk ograniczających zastosowanie badanej metody.

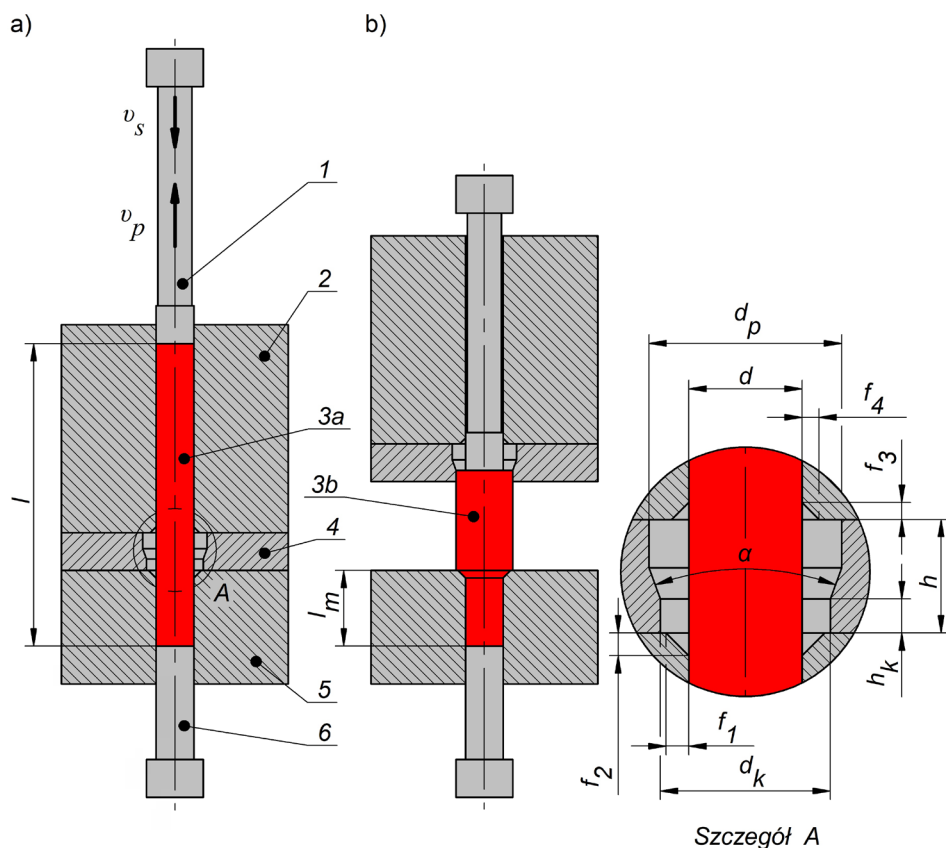
3. Charakterystyka procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

Proces spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu umożliwia kształtowanie wyrobów stopniowanych przy zastosowaniu wsadów pełnych i drążonych, czyli w postaci prętów i rur. W obu przypadkach odkuwka uzyskiwana jest w wyniku ruchu kilku narzędzi współtworzących wykrój. W zależności od postaci wsadu i geometrii wykroju dobierane są parametry kinematyczne procesu. Przemieszczenie poszczególnych narzędzi realizowane jest w wyniku przyłożenia do nich sił zewnętrznych, niebędących skutkiem wywieranego na nie nacisku pochodzącego od materiału odkształcanego. Omawiana autorska technologia została zgłoszona do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej jako wynalazek [145, 146]; jej szczegółową charakterystykę przedstawiono w dalszej części niniejszego rozdziału.

3.1. Spęczanie z wykorzystaniem wsadu w postaci pręta

Proces spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z wykorzystaniem wsadu w postaci pręta scharakteryzowano w oparciu o schemat przedstawiony na rycinie 3.1. Wykrój współtworzony jest przez pięć narzędzi: stempel 1, pojemnik górny 2, matrycę 4, pojemnik dolny 5 oraz wyrzutnik 6. Proces rozpoczyna się od wprowadzenia w ruch stempla z prędkością v_s , co powoduje, że materiał wsadu 3a zaczyna wypełniać wykrój matrycy.

W trakcie tegoż wypełniania dodatkowo wprawiane są jednocześnie w ruch pojemnik górny i matryca z taką samą prędkością v_p i przeciwbieżnie do ruchu stempla, co prowadzi do otwarcia się początkowo zamkniętego wykroju współtworzonego przez poszczególne narzędzia, dzięki czemu z kolei możliwy jest przyrost wysokości spęczanego stopnia. Zasadnicze odkształcenie plastyczne materiału odbywa się w strefie matrycy, która podczas procesu zmienia swoje położenie. Posiada ona wykroj o zmiennej geometrii, dzięki czemu dochodzi w niej do jednoczesnego spęczania i wyciskania materiału. W rezultacie uzyskuje się stopień odkuwki 3b o zakładanej średnicy. Po zakończeniu procesu ustawia się narzędzia w pozycji umożliwiającej wyjęcie odkuwki.



Ryc. 3.1. Schemat procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z wykorzystaniem wsadu w postaci pręta: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1 – stempel, 2 – pojemnik górny, 3a – wsad, 3b – odkuwka, 4 – matryca, 5 – pojemnik dolny, 6 – wyrzutnik, v_s – prędkość stempla, v_p – prędkość pojemnika górnego i matrycy

Jednym z istotnych parametrów przedstawionego procesu jest odpowiedni stosunek prędkości stempla do prędkości matrycy i pojemnika górnego. Korzystając z zasady zachowania stałej objętości, można stwierdzić, że objętość materiału opuszczającego otwór pojemnika górnego jest równa objętości, o jaką zwiększa się kształtowany stopień. Zakładając, że prędkość stempla jest stała, prędkość matrycy i pojemnika górnego można zdefiniować następującą zależnością:

$$v_p = v_s \cdot \frac{d^2}{d_k^2 - d^2}, \quad (3.1)$$

gdzie: v_p – prędkość pojemnika górnego i matrycy, v_s – prędkość stempla, d – średnica otworu pojemnika górnego, d_k – średnica otworu kalibrującego matrycy.

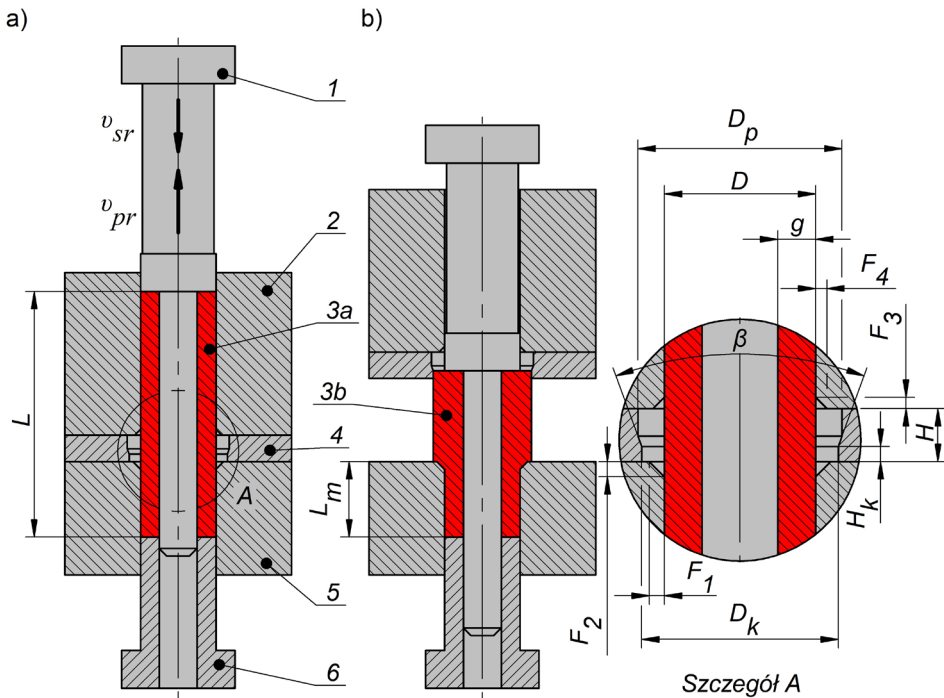
3.2. Spęczanie z zastosowaniem wsadu w postaci rury

W procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z wykorzystaniem wsadu w postaci rury założono, że uzyskiwana odkuwka będzie posiadać otwór o stałej średnicy równej średnicy wsadu. W związku z tym realizacja procesu, którego schemat przedstawiono na rycinie 3.2, odbywa się z zastosowaniem stempla 1 posiadającego trzpień o średnicy zgodnej ze średnicą wewnętrzną wsadu drążonego 3a. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania wyrzutnika 6 (posiadającego otwór pasowany luźno względem średnicy trzpienia), który umieszczony jest w pojemniku dolnym 5. W odniesieniu do samego przebiegu procesu, to – podobnie jak w przypadku kształtowania ze wsadu pełnego – najpierw w ruch wprawiany jest stempel, po czym w odpowiednim momencie wypełnienia wykroju matrycy 4, pojemnik górny 2 i matrycę wprawia się w ruch przeciwbieżny do ruchu stempla, a następnie, po zakończeniu procesu, usuwa odkuwkę 3b z przestrzeni roboczej narzędzi. Zastosowanie zmiennego wykroju matrycy, także w tej odmianie procesu, ma na celu umożliwienie uzyskania stopnia o zakładanej średnicy zewnętrznej i wewnętrznej, jak również ma przyczynić się do zminimalizowania zjawiska utraty kontaktu materiału odkuwki z trzpieniem w strefie stopnia.

Prędkość matrycy i pojemnika górnego, jako jeden z głównych parametrów procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z wykorzystaniem wsadu w postaci rury, można wyznaczyć z zależności (3.2), wyprowadzonej przy zastosowaniu tych samych założeń, co w przypadku procesu spęczania wsadu pełnego opisanego w poprzednim podrozdziale:

$$v_{pr} = v_{sr} \cdot \frac{4 \cdot g \cdot (D - g)}{D_k^2 - D^2}, \quad (3.2)$$

gdzie: v_{pr} – prędkość pojemnika górnego i matrycy, v_{sr} – prędkość stempla, D – średnica otworu pojemnika górnego, g – grubość ścianki wsadu rurowego, D_k – średnica otworu kalibrującego matrycy.



Ryc. 3.2. Schemat procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z wykorzystaniem wsadu w postaci rury: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1 – stempel, 2 – pojemnik górny, 3a – wsad, 3b – odkuwka, 4 – matryca, 5 – pojemnik dolny, 6 – wyrzutnik, v_{sr} – prędkość stempla, v_{pr} – prędkość pojemnika górnego i matrycy

4. Badania wstępne

Analizę procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu rozpoczęto od weryfikacji teoretycznej. Przeprowadzono ją na podstawie obliczeń numerycznych, w których wykorzystano metodę elementów skończonych. Metoda ta jest powszechnie stosowana w analizie różnego rodzaju technik wytwarzania, w tym procesów plastycznego kształtowania metali. Weryfikacja teoretyczna jest szczególnie przydatna w przypadku badania nowych technologii. Umożliwia wyznaczenie m.in. zakresu prawidłowych parametrów procesu, sił kształtowania oraz wielkości trudnych do wyznaczenia innymi sposobami (np. rozkładu odkształcenia, naprężenia, temperatury). Ponadto wstępne poznanie technologii ułatwia i przyspiesza projektowanie oprzyrządowania i realizację badań doświadczalnych. Dokładność obliczeń w dużej mierze zależy od poziomu szczegółowości modelu numerycznego. Z reguły im dokładniejszy jest model numeryczny tym generowane przez niego wyniki są bliższe результатам rzeczywistym. W przypadku symulacji procesów obróbki plastycznej metali kluczowymi parametrami mającymi bezpośredni wpływ na jakość obliczeń są: krzywa płynięcia materiału odkształcanego, warunki kontaktu poszczególnych par trących, geometria i kinematyka narzędzi, parametry termiczne procesu. Zależności te powinny pozostawać w możliwie największej zbieżności z warunkami rzeczywistymi. W związku z powyższym w celu zapewnienia jak najlepszych rezultatów obliczeń przeprowadzono wstępne badania teoretyczno-doświadczalne, których wyniki wykorzystano do

opracowania modelu numerycznego procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. W ramach badań wstępnych wyznaczono:

- krzywą płynięcia stopu aluminium EN AW-6060, który wykorzystano w badaniach teoretycznych i doświadczalnych analizowanego procesu spęczania,
- warunki tarcia pomiędzy stałą narzędziową, a ww. stopem aluminium,
- wartość początkowej wysokości wykroju, przy której nie dochodzi do wyboczenia wsadu w postaci pręta,
- wartość początkowej wysokości wykroju, przy której nie dochodzi do wyboczenia ścianki wsadu drążonego.

Metodykę badawczą oraz uzyskane rezultaty przedstawiono w dalszej części rozdziału w poszczególnych podrozdziałach.

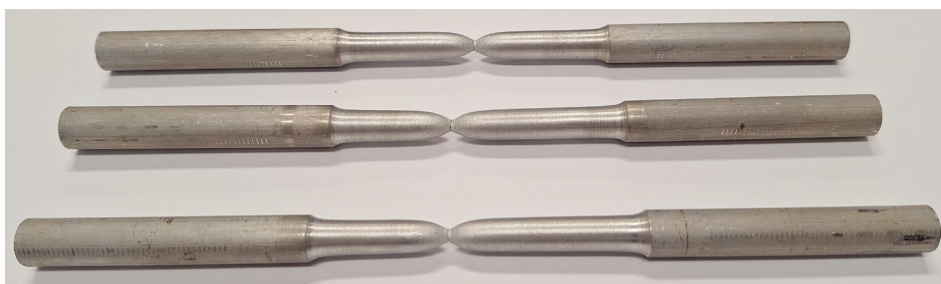
4.1. Wyznaczanie krzywej płynięcia stopu aluminium EN AW-6060

Zależność naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia dla stopu aluminium EN AW-6060 wykorzystanego w badaniach teoretyczno-doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wyznaczono w oparciu o statyczną próbę rozciągania oraz próbę ściskania.

W statycznej próbie rozciągania zrealizowanej trzykrotnie w temperaturze pokojowej wyznaczono umowną granicę plastyczności ($R_{p0.2}$), wytrzymałość na rozciąganie (R_m), wydłużenie ekstensometryczne (A_1) oraz przewężenie (Z). Próbę zrealizowano w oparciu o normę PN-EN ISO 6892-1:2020-05. Przeprowadzono ją na maszynie wytrzymałościowej Instron 1000 HDX wyposażonej w ekstensometr AUTOX 750. Próbkę pięciokrotną o średnicy części pomiarowej równej 8 mm zamocowaną w uchwytach maszyny przedstawiono na rycinie 4.1. Przed rozciąganiem próbki zostały poddane procesowi wyżarzania w temperaturze 415°C w elektrycznym piecu komorowym LAC PK 10/12 R. Nagrzewano i studzono je razem z piecem, natomiast czas wygrzewania wynosił dwie godziny. Podczas rozciągania zastosowano stałą prędkość odkształcenia wynoszącą 0,00025 s⁻¹, a próbę realizowano do momentu zerwania próbki. W trakcie badań rejestrowano wartość siły rozciągania w funkcji wydłużenia części pomiarowej. Próbki po zerwaniu przedstawiono na rycinie 4.2.



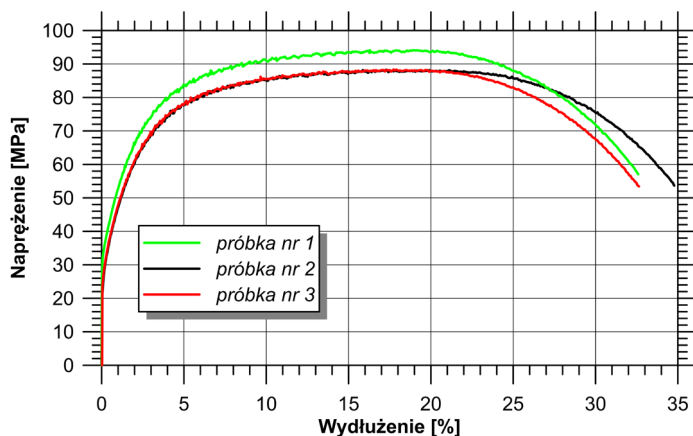
Ryc. 4.1. Widok próbki do statycznej próby rozciągania umieszczonej w przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej



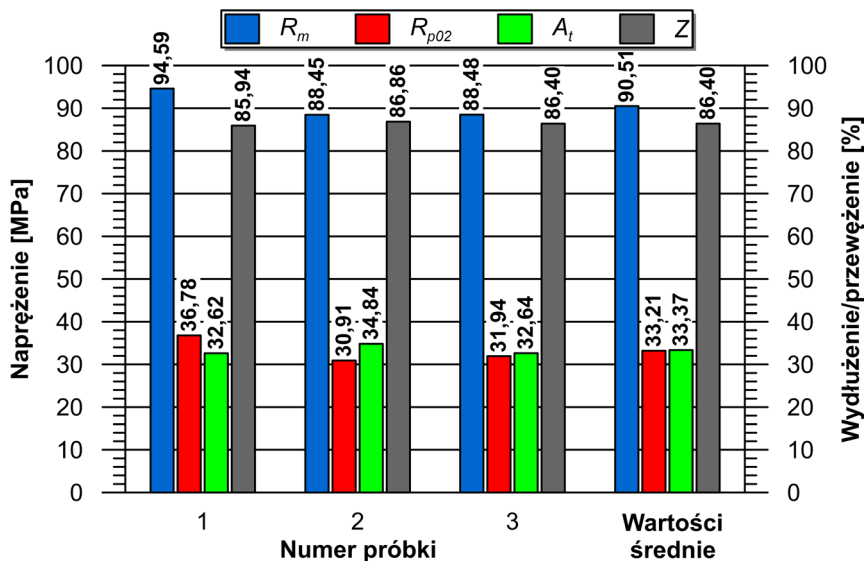
Ryc. 4.2. Próbkki zerwane w statycznej próbie rozciągania

Zestawienie parametrów wytrzymałościowych wyznaczonych w statycznej próbie rozciągania przedstawiono na rycinie 4.3 i 4.4. Wartości średnie tych wskaźników wynoszą:

- umowna granica plastyczności (R_{p02}): 33,21 MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie (R_m): 90,51 MPa,
- wydłużenie ekstensometryczne (A_t): 33,37 %,
- przewężenie (Z): 86,40 %.



Ryc. 4.3. Wykres naprężenia rozciągającego w funkcji wydłużenia wyznaczony dla próbek badanych w statycznej próbie rozciągania



Ryc. 4.4. Wartości parametrów wyznaczone w statycznej próbie rozciągania

Próbę ściskania – podobnie jak statyczną próbę rozciągania – przeprowadzono w temperaturze pokojowej. Zastosowano próbki walcowe ze stopu EN AW-6060 o średnicy 10 mm i wysokości 15 mm, które przed badaniem poddano procesowi wyżarzania w takich samych warunkach, jak w przypadku ww. próbek do rozciągania. Powierzchnie czołowe próbek oraz kowadeł smarowano środkiem smarnym na bazie dwusiarczku molibdenu, po czym próbki spęczano na maszynie wytrzymałościowej Instron 3369 do wysokości końcowej wynoszącej 5 mm. Zastosowano trzy różne prędkości kształtowania równe: 4, 40 i 400 mm/min, przy czym dla każdej prędkości wykonano po trzy próby. Należy mieć na uwadze, że realizacja próby ściskania ze stałą prędkością kształtowania powoduje, że uzyskuje się zmienną prędkość odkształcenia. Podczas badań rejestrowano wartość siły spęczającej w funkcji przemieszczenia kowadła górnego. Próbki uzyskane z poszczególnych prób przedstawiono na rycinie 4.5.



Ryc. 4.5. Próbki uzyskane podczas próby ściskania z prędkością kształtowania 4, 40 i 400 mm/min odpowiednio dla próbek przedstawionych w wierszu górnym, środkowym i dolnym

Na podstawie wyznaczonej granicy plastyczności i wyników z prób ściskania wyznaczono krzywe płynięcia badanego stopu aluminium dla poszczególnych prędkości kształtowania, które opisano równaniem Ludwika:

$$\sigma_{p,k} = \sigma_{p0} + c_k \cdot \varepsilon^{n_k}, \quad (4.1)$$

gdzie: $\sigma_{p,k}$ – wartość naprężenia uplastyczniającego dla próbek spęczanych z prędkością kształtowania k , σ_{p0} – wartość granicy plastyczności wyznaczona w statycznej próbie rozciągania, c_k , n_k – współczynniki dla próbek spęczanych z prędkością kształtowania k , ε – odkształcenie.

Wartość naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia z poszczególnych prób ściskania wyznaczono z poniższych wzorów:

$$\sigma_{p,j,k} = \frac{4 \cdot P_i \cdot h_i}{\pi \cdot d \cdot h}, \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_i}, \quad (4.3)$$

gdzie: $\sigma_{p,j,k}$ – wartość naprężenia uplastyczniającego dla próbki nr j spęczanej z prędkością kształtowania k , P_i – wartość siły spęczającej w i -tej chwili czasu, d, h – początkowa średnica i wysokość próbki, h_i – wysokość próbki w i -tej chwili czasu.

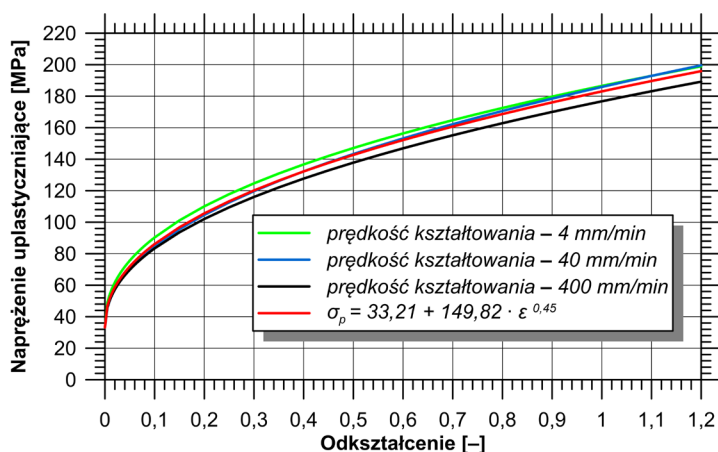
Wartości występujących w równaniu (4.1) współczynników c_k, n_k , przy których funkcja Ω_1 określona zależnością (4.4) przyjmuje minimum, uznano za reprezentatywne dla próby ściskania realizowanej przy danej prędkości kształtowania:

$$\Omega_1 = \sum_{i=1}^n [(\sigma_{p,k} - \sigma_{p,1,k})^2 + (\sigma_{p,k} - \sigma_{p,2,k})^2 + (\sigma_{p,k} - \sigma_{p,3,k})^2]. \quad (4.4)$$

Wyznaczone krzywe płynięcia dla trzech różnych prędkości kształtowania przedstawiono na rycinie 4.6. Krzywe są do siebie podobne pod względem ilościowym i jakościowym. Oznacza to, że w badanym zakresie wartość naprężenia uplastyczniającego w niewielkim stopniu zależy od prędkości kształtowania. W związku z powyższym krzywą płynięcia badanego stopu opisano pojedynczą zależnością reprezentującą wszystkie trzy prędkości kształtowania. Równanie ogólne σ_p krzywej płynięcia określono zależnością (4.5), przy czym wstawienie go do funkcji Ω_2 (zależność (4.6)) powoduje osiągnięcie przez nią wartości minimalnej. Przebieg wyznaczonej krzywej płynięcia dla stopu aluminium EN AW-6060 został przedstawiony na rycinie 4.6.

$$\sigma_p = 33,21 + 149,82 \cdot \varepsilon^{0,45}. \quad (4.5)$$

$$\Omega_2 = \sum_{i=1}^n [(\sigma_p - \sigma_{p,4})^2 + (\sigma_p - \sigma_{p,40})^2 + (\sigma_p - \sigma_{p,400})^2]. \quad (4.6)$$



Ryc. 4.6. Krzywe płynięcia stopu aluminium EN AW-6060

4.2. Określenie warunków tarcia

Badania związane z analizą procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przeprowadzono z wykorzystaniem wsadów wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6060. Narzędzia mające kontakt (w temperaturze pokojowej) z materiałem odkształcanym wykonano ze stali narzędziowej NZ3 do pracy na zimno. W badaniach doświadczalnych jako środek smarny zastosowano olej z uwagi na stosunkowo dobre właściwości smarne oraz łatwość w nanoszeniu i usuwaniu ze wsadu oraz narzędzi. Z tego względu na potrzeby budowy modelu numerycznego procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu określono czynnik tarcia dla ww. pary trącej. Zastosowano w tym celu próbę spęczania próbek walcowych o średnicy 10 mm i wysokości 15 mm, które ściskano do połowy ich wysokości początkowej. Próbkę wyżarzono w takich samych warunkach, jak próbki do wyznaczania krzywej płynięcia (415°C, dwie godziny). Wykonano po trzy próby zarówno przy zastosowaniu oleju, jak i bez stosowania środka smarnego. Próbkę spęczano z prędkością 40 mm/min na maszynie wytrzymałościowej Instron 3369; ich widok po odkształceniu przedstawiono na rycinie 4.7. Następnie zmierzono wysokość próbek oraz pozostałe wymiary przedstawione na rycinie 4.8. Pomiar średnicy w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach przeprowadzono w trzech płaszczyznach – w obu podstawach oraz na środku wysokości próbki. Następnie odpowiednie wymiary poszczególnych próbek

uśredniano (wzory 4.7–4.12), uzyskując wymiary reprezentujące średnicę próbki w podstawie dolnej i górnej oraz na środku wysokości dla próby spęczniania realizowanej z zastosowaniem oleju jako środka smarnego oraz prowadzonej bez środka smarnego

$$d_{pg,o} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^3 [ds_{1,i} + ds_{2,i}], \quad ($$

$$d_{pd,o} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^3 [ds_{3,i} + ds_{4,i}], \quad (4.8)$$

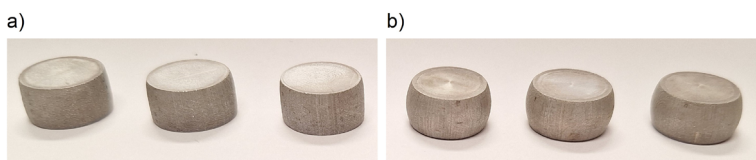
$$d_{ps,o} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^3 [ds_{5,i} + ds_{6,i}], \quad (4.9)$$

$$d_{pg,s} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^3 [ds_{1,i} + ds_{2,i}], \quad (4.10)$$

$$d_{pd,s} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^3 [ds_{3,i} + ds_{4,i}], \quad (4.11)$$

$$d_{ps,s} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^3 [ds_{5,i} + ds_{6,i}]. \quad (4.12)$$

gdzie: $ds_{1,i}$, $ds_{2,i}$, $ds_{3,i}$, $ds_{4,i}$, $ds_{5,i}$, $ds_{6,i}$ – wartość średnicy $ds_1, \dots, ds_6$ zgodna z ryc. 4.8 dla i -tej próbki, $d_{pg,o}$, $d_{pd,o}$, $d_{ps,o}$ – średnia średnica próbki kolejno w: podstawie górnej, podstawie dolnej oraz na środku wysokości spęcznianej z zastosowaniem oleju jako środka smarnego, $d_{pg,s}$, $d_{pd,s}$, $d_{ps,s}$ – średnia średnica próbek kolejno w: podstawie górnej, podstawie dolnej oraz na środku wysokości spęcznianej bez środka smarnego.

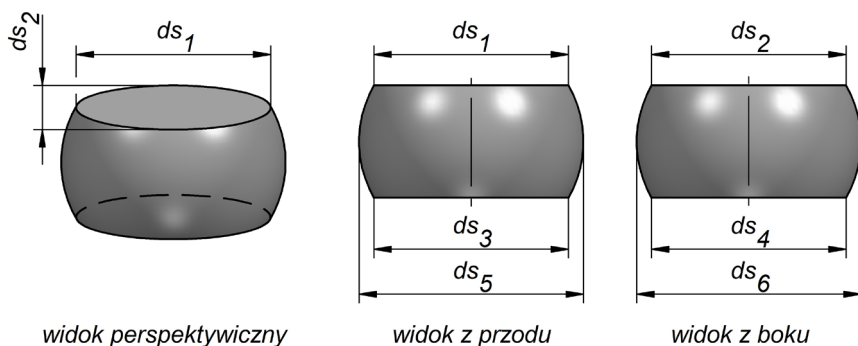


Ryc. 4.7. Próbkę uzyskane w próbie spęczniania: a) z zastosowaniem oleju jako środka smarnego, b) bez środka smarnego

Następnie wykonano symulacje numeryczne próby spęczniania takiej samej próbki jak w rzeczywistości. Obliczenia wykonano w programie Deform-2D/3D bazującym na metodzie elementów skończonych. Krzywą płynięcia materiału

odkształcanego opisano zależnością (4.5). Dyskretyzacji wsadu dokonano przy użyciu elementów tetragonalnych czterowęzłowych w liczbie ok. 120 tys. Narzędzia zdefiniowano jako obiekty sztywne, natomiast wsad jako obiekt sztywno-plastyczny. Zachowano taką samą prędkość narzędzia, a próbkę spęczano do takiej samej wysokości, jak w warunkach rzeczywistych.

W pierwszym kroku realizacji obliczeń numerycznych wykonano siedem symulacji różniących się tylko wartością czynnika tarcia, który wynosił od 0,1 do 0,7; jego wartość zmieniano co 0,1. Następnie dokonano pomiaru średnic próbek i uśrednienia wyników w sposób analogiczny do badań doświadczalnych.



Ryc. 4.8. Schemat pomiaru próbki uzyskanej w próbie spęczania

Zdefiniowano funkcje celu Ω_3 oraz Ω_4 odpowiednio dla próbek spęczanych z zastosowaniem oleju jako środka smarowego oraz bez środka sm

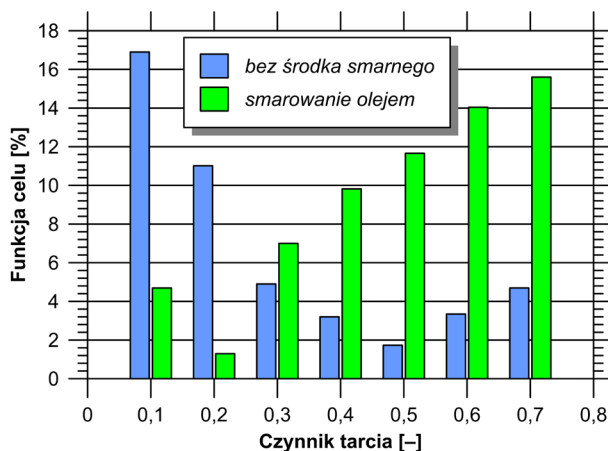
$$\Omega_3 = \left[\frac{|d_{pg,o} - d_{pg,m}|}{d_{pg,o}} + \frac{|d_{pd,o} - d_{pd,m}|}{d_{pd,o}} + \frac{|d_{ps,o} - d_{ps,m}|}{d_{ps,o}} \right] \cdot 100 \% \quad (4.13)$$

$$\Omega_4 = \left[\frac{|d_{pg,s} - d_{pg,m}|}{d_{pg,s}} + \frac{|d_{pd,s} - d_{pd,m}|}{d_{pd,s}} + \frac{|d_{ps,s} - d_{ps,m}|}{d_{ps,s}} \right] \cdot 100 \% \quad (4.14)$$

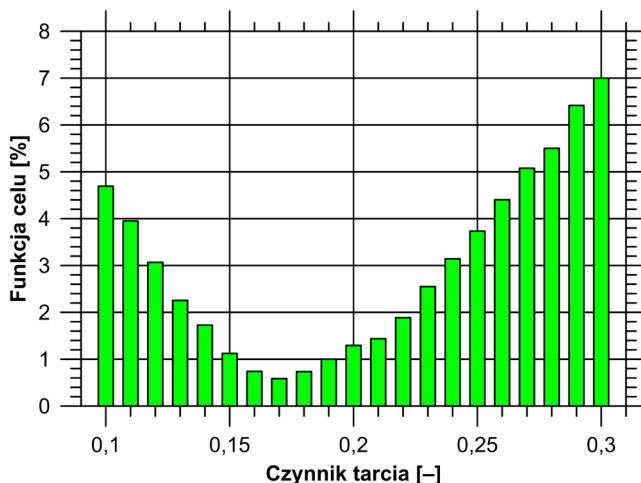
gdzie: $d_{pg,m}$, $d_{pd,m}$, $d_{ps,m}$ – średnia średnica próbki kolejno w: podstawie górnej, podstawie dolnej oraz na środku wysokości uzyskanej w symulacji z czynnikiem tarcia o wartości m .

Następnie poszukiwano wartości minimalnych powyższych funkcji. Wartość czynnika tarcia, przy którym funkcje osiągają minimum, uznano za reprezentującą warunki występujące w rzeczywistości. Wartość funkcji w zależności od czynnika tarcia przedstawiono na rycinie 4.9. Funkcje osiągają minimum dla czynnika tarcia mieszczącego się w zakresie 0,1–0,3 oraz 0,4–0,6 odpowiednio dla spęczania ze smarowaniem olejem oraz bez niego.

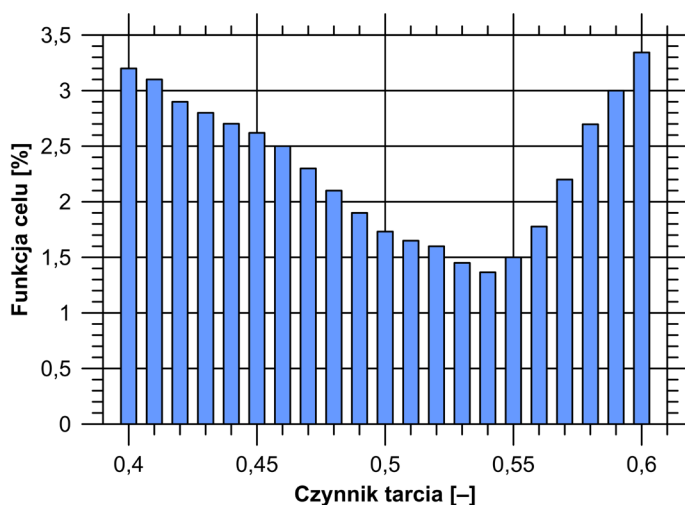
W drugim kroku realizacji obliczeń numerycznych wykonano kolejne symulacje – w wyżej wskazanych przedziałach czynnik tarcia zmieniano co 0,01. Wartości funkcji celu dla tych przypadków przedstawiono na rycinie 4.10 oraz 4.11. Z przedstawionych wykresów wynika, że wartość czynnika tarcia dla pary trącej: stal NZ3–stop aluminium EN AW-6060, odpowiadającego smarowaniu olejem, wynosi $m = 0,17$, natomiast w przypadku braku smarowania wartość ta wynosi $m = 0,54$.



Ryc. 4.9. Wartość funkcji celu w zależności od czynnika tarcia dla próbek spęczanych z zastosowaniem oleju jako środka smarnego oraz spęczanych bez środka smarnego



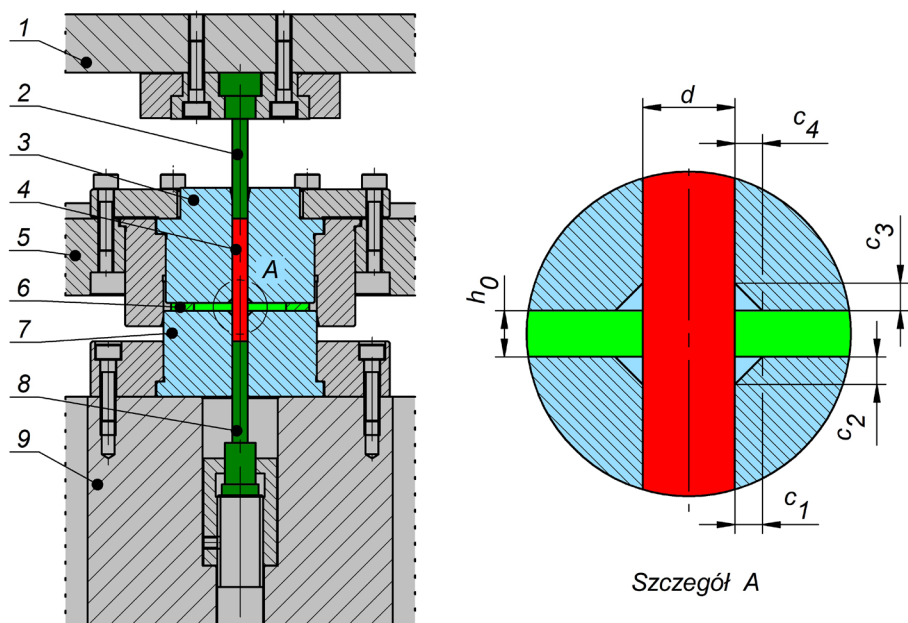
Ryc. 4.10. Wartość funkcji celu w zależności od czynnika tarcia dla próbek spęczanych z zastosowaniem oleju jako środka smarnego



Ryc. 4.11. Wartość funkcji celu w zależności od czynnika tarcia dla próbek spęczanych bez środka smarnego

4.3. Analiza zjawiska wyboczenia wsadu w postaci pręta

W początkowej fazie procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu dochodzi do wypełniania wykroju matrycy materiałem odkształcanego pręta. Pojemnik górny i matryca pozostają nieruchome, natomiast kształtowanie odkuwki odbywa się wskutek nacisku stempla na materiał wsadu. Zanim zewnętrzna powierzchnia spęczanego kołnierza zacznie kontaktować się z wykrojem matrycy płynięcie materiału w strefie kołnierza jest swobodne. Wskutek tego może dojść do wyboczenia wsadu, co z kolei spowoduje, że już w początkowej fazie procesu spęczania może powstać wada odkuwki. W związku z tym przeprowadzono wstępne badania doświadczalne w celu poznania tego niekorzystnego zjawiska i określenia bezpiecznej wysokości matrycy. Przeprowadzono je z wykorzystaniem przyrządu, który zastosowano do badań związanych z procesem spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Szczegółowa charakterystyka tego przyrządu została przedstawiona w podrozdziale 6.1, natomiast na potrzeby niniejszej analizy przedstawiono jedynie jego przestrzeń roboczą widoczną na rycinie 4.12. Umieszczono w niej wymienne narzędzia umożliwiające analizę wyboczenia spęczanego pręta: tuleję górną 3, tuleję dolną 7, stempel 2 i wyrzutnik 8. Wysokość h_0 wykroju zmieniano dzięki podkładkom dystansowym 6 o różnej wysokości umieszczanym pomiędzy tulejami.



Ryc. 4.12. Schemat przestrzeni roboczej przyrządu wykorzystanego do analizy zjawiska wyboczenia pręta; 1 – płyta górna, 2 – stempel, 3 – tuleja górna, 4 – wsad w postaci pręta, 5 – płyta pośrednia, 6 – podkładka dystansowa, 7 – tuleja dolna, 8 – wyrzutnik, 9 – podstawa



Ryc. 4.13. Narzędzia wykorzystane do analizy zjawiska wyboczenia pręta

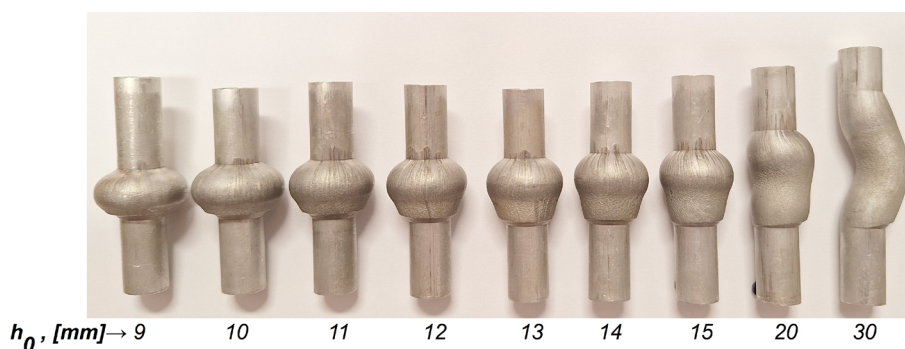
Zdjęcie zastosowanych narzędzi przedstawiono na rycinie 4.13. Wykonano je ze stali narzędziowej NZ3 i ulepszo ciepnie do twardości 57 HRC. Powierzchnie otworu tulei górnej oraz tulei dolnej polerowano.

Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej z wykorzystaniem wsadów ze stopu EN AW-6060. Materiał został uprzednio wyżarzony w ten sam sposób jak próbki do wyznaczania krzywej płynięcia i warunków tarcia (415°C, dwie godziny). Jako środek smarny zastosowano olej. Najważniejsze wymiary wykroju i wsadu przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Wymiary wykroju zastosowanego do analizy zjawiska wyboczenia pręta; oznaczenia zgodne z ryc. 4.12.

Symbol wymiaru	d	h_0	c_1	c_2	c_3	c_4
Wartość [mm]	10	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 30	1	0,5	1,5	2,5

Odkuwki uzyskane w trakcie badań przedstawiono na rycinie 4.14. Ustawiono je w ten sam sposób, w jaki były kształtowane – fragment odkuwki będący poniżej kołnierza znajdował się w wykroju tulei dolnej. Dla wysokości h_0 wykroju wynoszącej od 20 mm dochodzi do wyboczenia pręta widocznego okiem nieuzbrojonym. Stosowanie takich wartości wysokości matrycy w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu jest więc niedopuszczalne, gdyż prowadzi do powstania wady w początkowej fazie procesu.

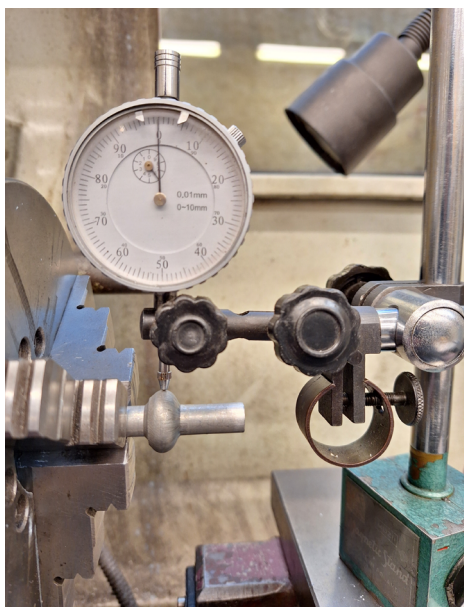


Ryc. 4.14. Odkuwki z kołnierzem spęczanym przy różnych wysokościach h_0 wykroju

Dla wysokości wykroju h_0 wynoszącej od 9 do 15 mm nie zaobserwowano wyraźnego wyboczenia pręta, aczkolwiek spęczany kołnierz ma zróżnicowaną średnicę oraz nie jest idealnie osiowoosymetryczny. Im większa wysokość wykroju, tym bardziej oddalona od tulei dolnej jest strefa kołnierza o największej średnicy – poniżej tej strefy powierzchnia boczna kołnierza jest stożkowa. W odniesieniu do procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu można uznać to zjawisko za niekorzystne. Wiąże się ono z tym, że podczas

wypełniania wykroju matrycy strefa o średnicy d_p (zob. ryc. 3.1) wchodzi w kontakt z materiałem odkształcanym znacznie wcześniej niż strefa o średnicy d_k , zatem wypełnienie drugiej z ww. stref wykroju może być utrudnione i wiązać się ze skokowym wzrostem siły przyłożonej do stempla.

W celu oceny osiowosymetryczności kołnierza dokonano pomiaru wartości bicia promieniowego w strefie o największej średnicy. Fragment odkuwki znajdujący się podczas kształtowania w tulei dolnej umieszczono w trójszczekowym uchwycie tokarki uniwersalnej. Czujnik zegarowy umieszczono pionowo nad odkuwką, opierając jego końcówkę o kołnierz zgodnie ze schematem widocznym na rycinie 4.15. Wartości bicia promieniowego kołnierza w zależności od wysokości h_0 wykroju zestawiono w tabeli 4.2. Wzrost wysokości powoduje, że bicie promieniowe kołnierza jest coraz większe, niemniej jednak dla wysokości wykroju 9 i 10 mm jego wartości są zbliżone, podczas gdy dla pozostałych wysokości – znacznie większe.



Ryc. 4.15. Schemat pomiaru bicia promieniowego kołnierza odkuwki

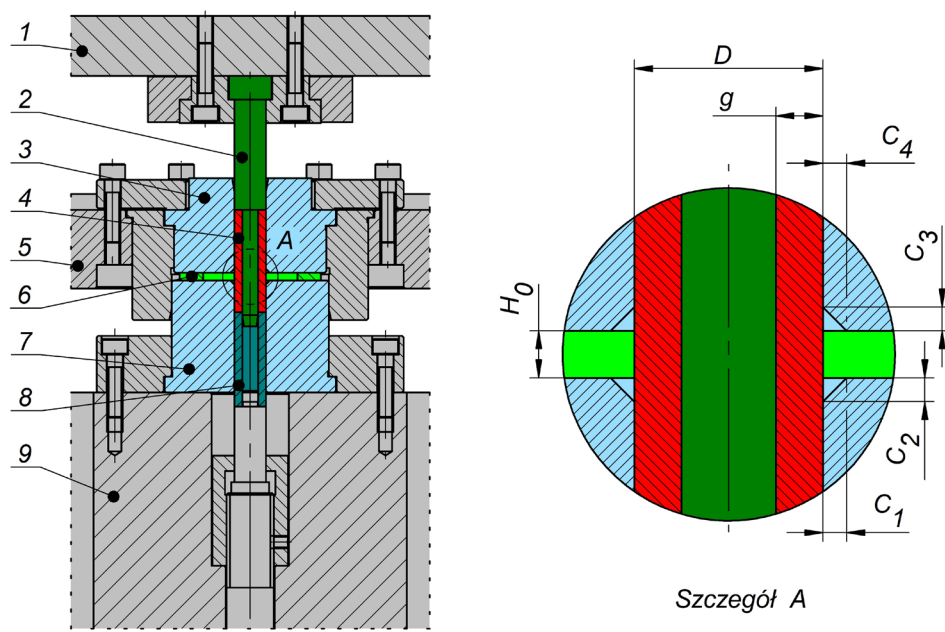
Tabela 4.2. Wartość bicia promieniowego kołnierza odkuwki dla różnych wysokości h_0 wykroju

Wysokość h_0 wykroju, [mm]						
9	10	11	12	13	14	15
Wartość bicia promieniowego, [mm]						
0,46	0,49	0,76	0,92	1,03	1,16	1,24

W oparciu o przeprowadzone badania można wnioskować, że w odniesieniu do początkowej fazy procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu korzystniejsze będzie stosowanie matryc o mniejszych wysokościach wykroju, tj. o wartości nie większej niż średnica wsadu.

4.4. Analiza zjawiska wyboczenia wsadu w postaci rury

Zastosowanie w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wsadu drążonego może prowadzić do lokalnego wyboczenia jego ścianki w początkowej fazie kształtowania. Analogicznie jak w przypadku odkształcania pręta do zjawiska tego może dojść zanim pojemnik górny i matryca zaczną przemieszczać się przeciwbieżnie do ruchu stempla. Z tego powodu przeprowadzono badania wstępne mające na celu określenie maksymalnej wysokości matrycy, przy której nie dochodzi do powstania ww. wady. Wykonano je przy wykorzystaniu przyrządu do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu (zob. rozdz. 6.1).



Ryc. 4.16. Schemat przestrzeni roboczej przyrządu wykorzystanego do analizy zjawiska wyboczenia ścianki wsadu rurowego: 1 – płyta górna, 2 – stempel, 3 – tuleja górna, 4 – wsad w postaci rury, 5 – płyta pośrednia, 6 – podkładka dystansowa, 7 – tuleja dolna, 8 – wyrzutnik, 9 – podstawa

W jego przestrzeni roboczej – widocznej na rycinie 4.16 – zamontowano stempel 2, tuleję górną 3, tuleję dolną 7 oraz wyrzutnik 8, a pomiędzy tulejami umieszczono podkładkę dystansową 6, której wysokość H_0 zmieniano w zakresie od 6 do 8 mm. W trakcie procesu jedynym narzędziem wykonującym ruch był stempel. Jako wsad drażony 4 zastosowano odcinki rur o średnicy zewnętrznej $D = 20$ mm i grubości ścianki $g = 5$ mm. Pozostałe wymiary narzędzi przedstawiono w tabeli 4.3. Wsad wykonano ze stopu aluminium EN AW-6060, który wyżarzono w temperaturze 415°C utrzymywanej przez dwie godziny.

Tabela 4.3. Wymiary wykroju zastosowanego do analizy zjawiska wyboczenia ścianki wsadu rurowego; oznaczenia zgodne z ryc. 4.16.

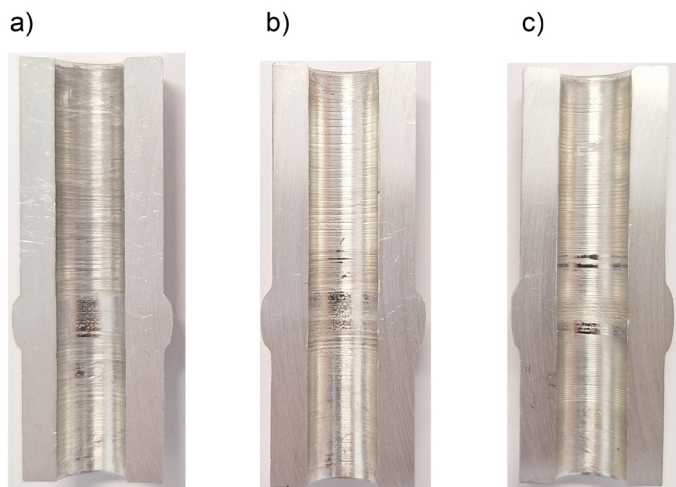
Symbol wymiaru	D	g	H_0	C_1	C_2	C_3	C_4
Wartość [mm]	20	5	6, 7, 8	1	1	1	1

Narzędzia bezpośrednio kontaktujące się z wsadem przedstawiono na rycinie 4.17. Wykonano je ze stali narzędziowej NZ3 i ulepszo cieplnie do twardości 57 HRC, jak również polerowano powierzchnie otworu tulei górnej, dolnej oraz trzpienia. W trakcie badań jako środek smarny zastosowano olej.

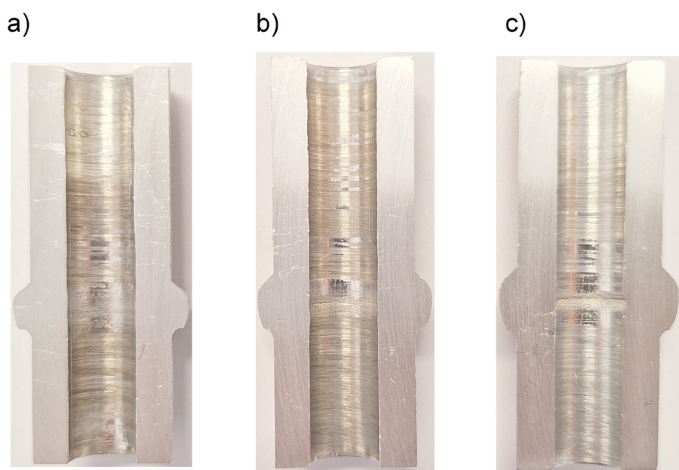


Ryc. 4.17. Narzędzia wykorzystane do analizy zjawiska wyboczenia ścianki wsadu rurowego

Odkuwki z kołnierzami o różnych średnicach kształtowane przy zmien-
nych wysokościach wykroju H_0 przedstawiono na rycinie 4.18–4.20. W począt-
kowej fazie spęczania, tj. dla średnicy kołnierza równej $\varnothing 23$ mm, materiał
odkształcany kontaktuje się z trzpieniem w strefie spęczanego kołnierza przy
zastosowaniu wysokości wykroju równej $H_0 = 6$ oraz 7 mm (ryc. 4.18a, b).



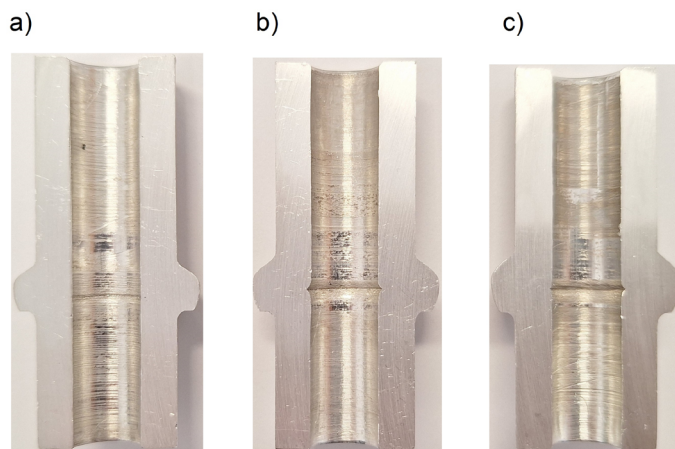
Ryc. 4.18. Odkuwki z kołnierzem o średnicy równej $\varnothing 23$ mm spęczanym przy różnych
wysokościach wykroju: a) $H_0 = 6$ mm, b) $H_0 = 7$ mm, c) $H_0 = 8$ mm



Ryc. 4.19. Odkuwki z kołnierzem o średnicy równej $\varnothing 25$ mm spęczanym przy różnych
wysokościach wykroju: a) $H_0 = 6$ mm, b) $H_0 = 7$ mm, c) $H_0 = 8$ mm

Natomiast dla wysokości wykroju $H_0 = 8$ mm zaobserwowano brak kontaktu materiału z trzpieniem w ww. strefie odkuwki. Wraz ze wzrostem średnicy kołnierza, tj. przy wartości równej $\varnothing 25$ mm, można zaobserwować, że dla wysokości wykroju $H_0 = 6$ mm materiał w dalszym ciągu kontaktuje się trzpieniem w strefie kołnierza (ryc. 4.19a). Przy wysokości wykroju $H_0 = 7$ mm widoczny jest obszar braku kontaktu materiału z trzpieniem w omawianej strefie odkuwki (ryc. 4.19b), natomiast dla $H_0 = 8$ mm inicjuje się proces powstawania zakucia na powierzchni otworu wyrobu (ryc. 4.19c).

Dalsze zwiększanie średnicy kołnierza do wartości $\varnothing 27$ mm (ryc. 4.20) powoduje, że dla wszystkich badanych wysokości wykroju materiał odkształcany traci kontakt z trzpieniem w strefie spęcanego kołnierza, a tendencja do tworzenia się zakucia zwiększa się wraz ze wzrostem wysokości wykroju H_0 .



Ryc. 4.20. Odkuwki z kołnierzem o średnicy równej $\varnothing 27$ mm spęczanym przy różnych wysokościach wykroju: a) $H_0 = 6$ mm, b) $H_0 = 7$ mm, c) $H_0 = 8$ mm

Z przeprowadzonych badań wynika, że wysokość wykroju $H_0 = 8$ mm jest wartością zbyt dużą, ponieważ już w początkowej fazie spęczania dochodzi do utraty kontaktu ścianki wsadu z trzpieniem w strefie kołnierza. Z kolei zastosowanie wysokości wykroju równych $H_0 = 6$ i 7 mm powoduje, że w początkowej fazie spęczania materiał nie traci kontaktu z trzpieniem w strefie kształtowanego kołnierza, niemniej jednak wraz ze stopniem realizacji procesu dochodzi do utraty ww. kontaktu, przy czym dla mniejszej wysokości wykroju zjawisko to ma miejsce przy większej średnicy kołnierza. Z tego względu wartością odpowiednią dla procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wydaje się zastosowanie matrycy o wysokości równej 6 mm (co odpowiada 120% grubości ścianki wsadu drążonego).

5. Modelowanie numeryczne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

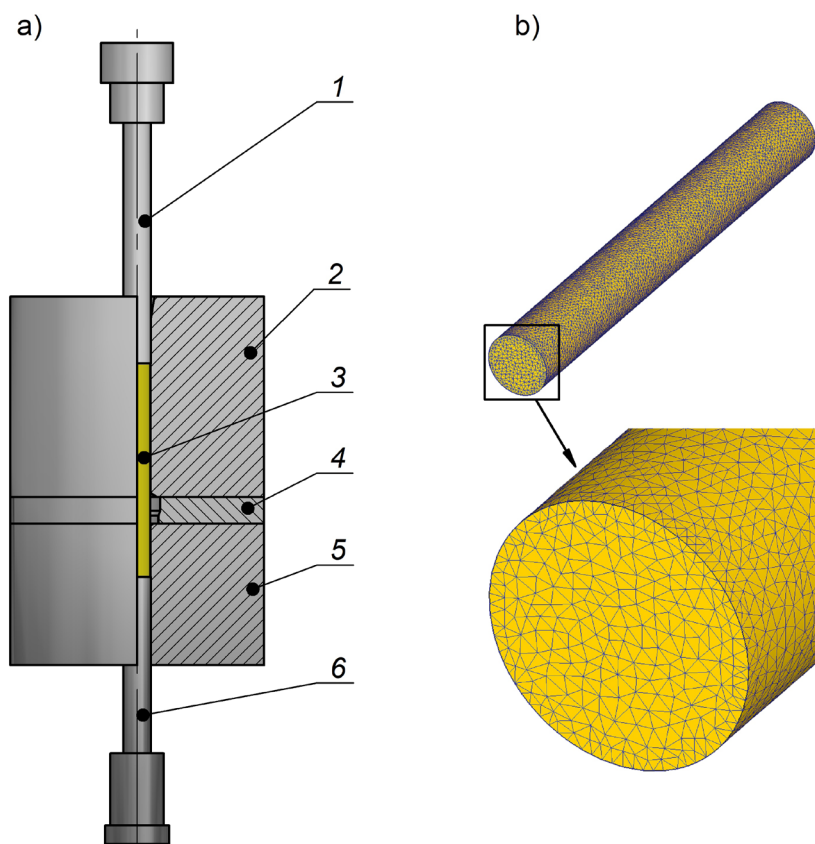
Symulacje komputerowe procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu zostały przeprowadzone w programie Deform-2D/3D. W obliczeniach wykorzystano metodę elementów skończonych. Badania zrealizowano dla różnych parametrów technologicznych, natomiast analiza wyników została ukierunkowana na określenie ich wpływu na przebieg procesu i jakość odkuwki. Modele numeryczne poszczególnych wariantów kształtowania wyrobu stopniowanego zbudowano w oparciu o wyniki badań wstępnych przedstawionych w rozdziale 4. Szczegóły związane z procesem modelowania oraz wyniki wraz z ich analizą przedstawiono w dwóch podrozdziałach traktujących o odkuwkach pełnych (kształtowanych ze wsadu w postaci pręta) oraz drażonych (wykonanych ze wsadu w postaci rury).

5.1. Analiza numeryczna procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta

5.1.1. Metodyka badawcza

Model geometryczny procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta został przedstawiony na rycinie 5.1a. Poza materiałem odkształcanym składa się

on z narzędzi bezpośrednio kontaktujących się z wsadem – pojemnika górnego, matrycy, stempla, pojemnika dolnego i wyrzutnika. Wsad zamodelowano jako obiekt sztywno-plastyczny, natomiast narzędzia jako obiekty sztywne. Dyskretyzację odkształcanego pręta (ryc. 5.1b) przeprowadzono za pomocą elementów tetragonalnych czterowzłowych w liczbie ok. 100 tys. Jako materiał wsadu przyjęto stop aluminium EN AW-6060, którego model materiałowy poza krzywą płynięcia pobrano z bazy programu. Zależność naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia opisano równaniem (4.5) wyznaczonym w badaniach własnych. Przyjęto początkową temperaturę narzędzi i wsadu równą 20°C, natomiast współczynnik wymiany ciepła pomiędzy ww. obiektami przyjęto równy 10 kW/(m²·K). Warunki tarcia pomiędzy wsadem a narzędziami opisano za pomocą modelu tarcia stałego, przyjmując czynnik tarcia $m = 0,17$, którego wartość wyznaczono w badaniach własnych (zob. rozdz. 4.2).



Ryc. 5.1. Model geometryczny procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta (a) oraz wsad po procesie dyskretyzacji (b): 1 – stempel, 2 – pojemnik górny, 3 – wsad, 4 – matryca, 5 – pojemnik dolny, 6 – wyrzutnik

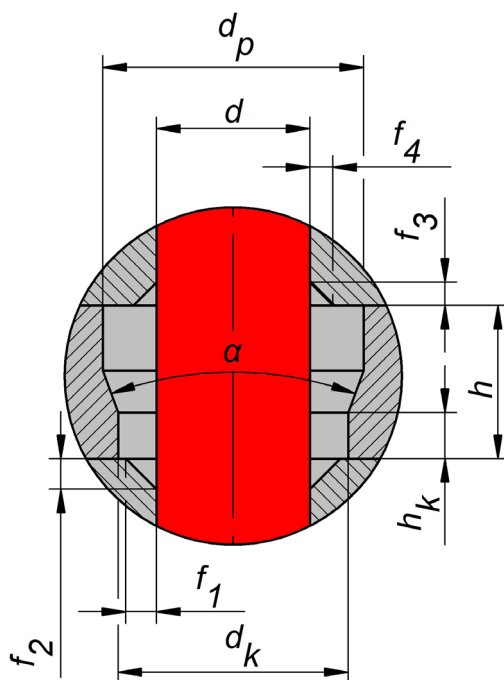
Przyjęto wsad w postaci odcinka pręta o średnicy $\phi 10$ mm i długości 80 mm, przy czym jego fragment o długości 20 mm umieszczono w pojemniku dolnym. Na podstawie wyników badań wstępnych przedstawionych w rozdziale 4.3 założono, że wysokość matrycy będzie równa średnicy wsadu, tj. $h = 10$ mm. Pozostałe oznaczenia wymiarów wykreju przedstawiono na rycinie 5.2, natomiast ich wartości liczbowe zestawiono w tabeli 5.1. Przyjęto, że parametrami zmiennymi będą:

- średnica otworu kalibrującego matrycy d_k ,
- kąt pochylenia α strefy stożkowej matrycy,
- redukcja przekroju poprzecznego wsadu δ_p mająca miejsce w matrycy.

Wartość redukcji przekroju poprzecznego wsadu, do jakiej dochodzi w matrycy podczas procesu spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, określono poniższą zależnością:

$$\delta_p = \frac{d_p^2 - d_k^2}{d_p^2} \cdot 100\% \quad ($$

gdzie: oznaczenia we wzorze są zgodne z ryc. 5.2.



Ryc. 5.2. Wymiary wykreju w procesie spęczniania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta; rysunek stanowi szczegół A z ryc. 3.1

Przyjęto pięć wartości średnic otworu kalibrującego matrycy d_k , trzy wartości kąta pochylenia α strefy stożkowej matrycy oraz trzy wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p . Obliczenia wykonano dla wszystkich możliwych kombinacji parametrów zmiennych, a analizę wyników ukierunkowano na określenie wpływu tych parametrów na przebieg procesu i jakość odkuwki.

We wszystkich analizowanych przypadkach prędkość stempla była stała i równa 5 mm/s, natomiast wartość prędkości pojemnika górnego i matrycy dla poszczególnych wariantów spęczania wyznaczono z zależności (3.1).

Tabela 5.1. Parametry analizowanych wariantów procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta; oznaczenia zgodne z ryc. 3.1 i 5.2 oraz ze wzorem (5.1)

Parametry stałe							
Symbol	d [mm]	h [mm]	h_k [mm]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	f_3 [mm]	f_4 [mm]
Wartość	10	10	3	1	0,5	1,5	2,5
Parametry zmienne							
Symbol	d_k [mm]			α [°]		δ_p [%]	
Wartość	12, 14, 16, 18, 20			20, 40, 60		5, 15, 25	

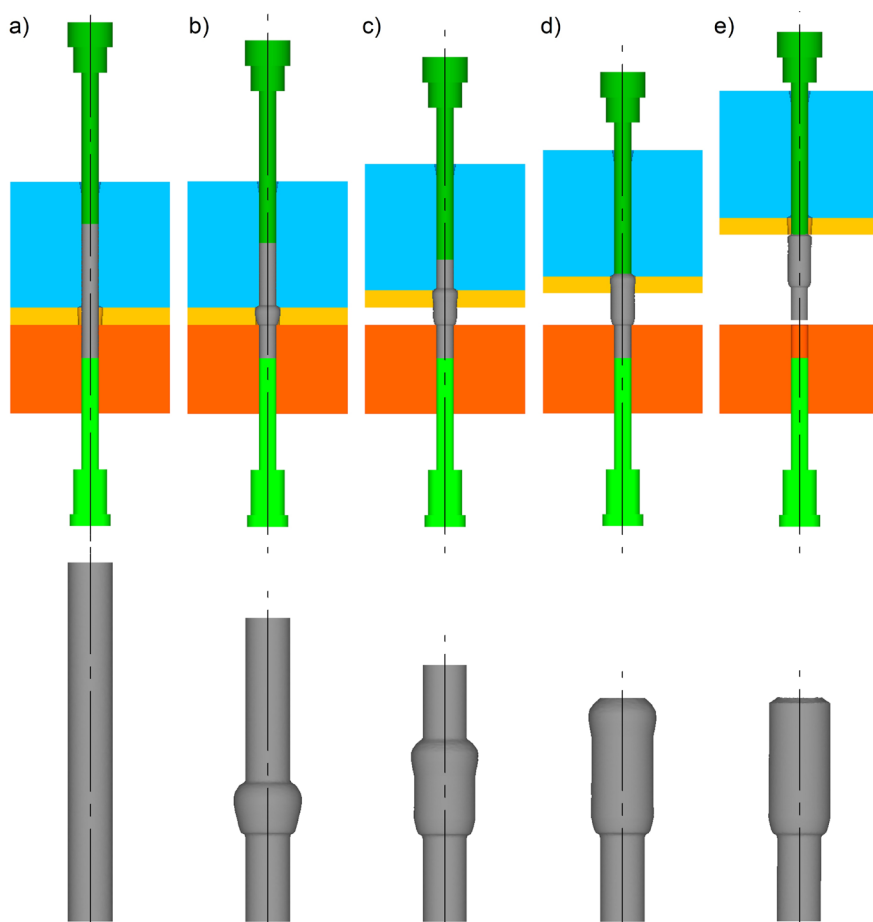
5.1.2. Wyniki analizy numerycznej

Obliczenia numeryczne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta umożliwiły szczegółową analizę badanej technologii. Wyniki zostały przedstawione w czterech podrozdziałach. W pierwszym omówiono geometrię odkuwek w odniesieniu do wszystkich analizowanych przypadków. Natomiast w pozostałych trzech zestawiono jedynie wybrane przypadki, które dobrano tak, aby wykazać wpływ badanych parametrów procesu (średnicy otworu kalibrującego matrycy, kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu mającej miejsce w matrycy) na jego przebieg i jakość wyrobu. W ramach wyników przedstawiono wybrane rezultaty, do których zaliczono kształt siatki koordynacyjnej odkuwki w jej przekroju osiowym, rozkład intensywności odkształcenia i naprężenia, jak również rozkład temperatury w odkuwce.

5.1.2.1. Geometria odkuwek

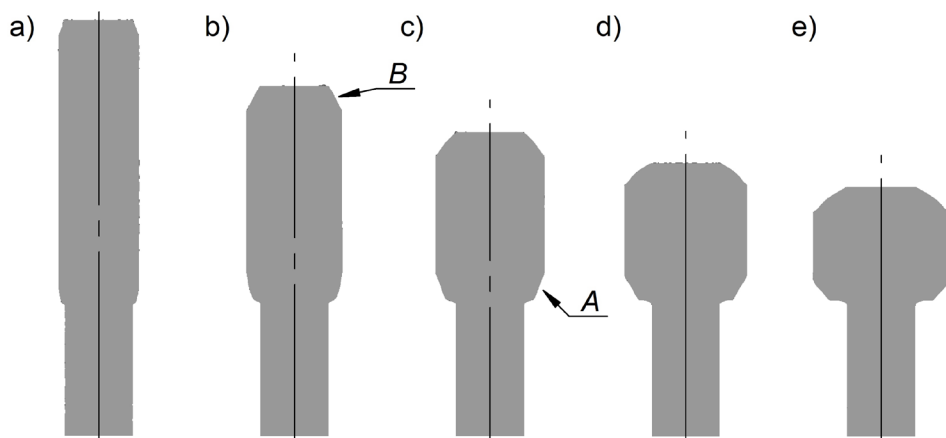
Progresję kształtu odkuwki w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przedstawiono na rycinie 5.3. Po odpowiednim usytuowaniu wsadu w postaci pręta w przestrzeni roboczej narzędzi (ryc. 5.3a) w ruch zostaje wprowadzony stempel, co rozpoczyna początkową fazę procesu. Wskutek jego nacisku na odkształcany materiał dochodzi do wypełniania wykroju matrycy. Zanim dojdzie do całkowitego wypełnienia wykroju, w ruch zostaje wprowadzony jednocześnie pojemnik górny z matrycą (ryc. 5.3b). Przemieszczają się one z taką samą prędkością przeciwnie do ruchu stempla. Prowadzi to do otwarcia początkowo zamkniętego wykroju tworzonego przez narzędzia, co umożliwi przyrost wysokości spęczanego stopnia odkuwki (ryc. 5.3c). Jednoczesny ruch trzech narzędzi – zasadnicza faza procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu – trwa do momentu, w którym mająca kontakt z wsadem powierzchnia czołowa stempla będzie współpłaszczyznowa z powierzchnią równoległą do dolnej powierzchni pojemnika górnego i odsuniętej od niej (oddalając się od matrycy) o wartość równą wielkości fazy f_3 wykonanej w pojemniku górnym (zob. ryc. 5.2). W tym momencie zatrzymywane są wszystkie narzędzia (ryc. 5.3d), po czym ustawia się je w pozycji umożliwiającej wyjęcie odkuwki z narzędzi. W trakcie tej ostatniej fazy procesu przemieszcza się jedynie stempel, co prowadzi do dalszego kształtowania wyrobu, którego niewielki fragment znajduje się w matrycy. Po całkowitym zakończeniu procesu (ryc. 5.3e) odkuwka znajduje się w przestrzeni pomiędzy pojemnikiem dolnym a matrycą. Zastosowanie matrycy posiadającej wykrój o zmiennym przekroju powoduje, że podczas zasadniczej fazy analizowanego procesu materiał znajdujący się w jej obszarze poddawany jest spęczaniu i wyciskaniu. W strefie wykroju narzędzia o większej średnicy dochodzi do zwiększenia przekroju poprzecznego wsadu, a następnie jego częściowej redukcji. Końcowy przekrój poprzeczny kształtowanego stopnia pozostaje jednak większy od początkowego przekroju poprzecznego wsadu. Z tego powodu proces należy uznać za taką metodę spęczania, w której zastosowanie ruchomej matrycy powoduje, że strefa odkształcenia zmienia swoje położenie.

Geometria odkuwek uzyskanych na podstawie obliczeń numerycznych dla wszystkich analizowanych przypadków spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu została przedstawiona na rycinie 5.4–5.12. Obok oczywistych różnic w zakresie średnicy i długości spęczanych stopni (wynikających ze zróżnicowanej geometrii wykroju) odchylenia można zaobserwować także na końcach kształtowanych stopni.

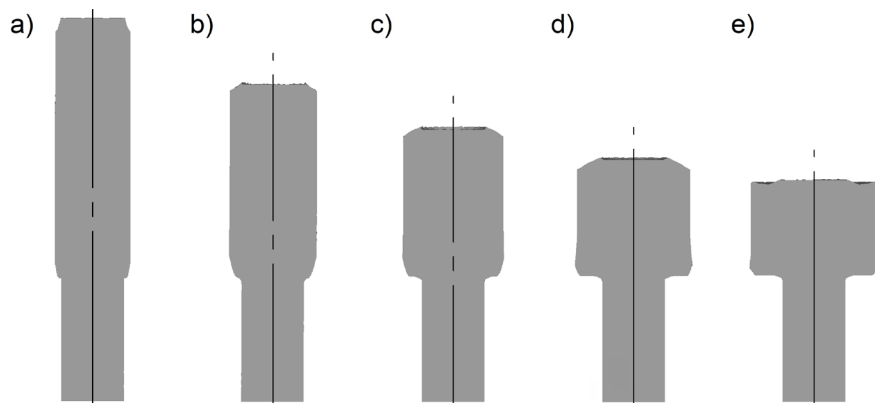


Ryc. 5.3. Progresja kształtu odkuwki wytwarzanej ze wsadu w postaci pręta

W odniesieniu do strefy stopnia znajdującej się przy pojemniku dolnym można zaobserwować, że w tym obszarze odkuwki dochodzi do niewypełnienia wykroju, którego przykład oznaczono szczegółem A na rycinie 5.4c. Wypełnianie wykroju w tej strefie ma miejsce w początkowej fazie procesu, kiedy to ruch wykonuje tylko stempel. W związku z tym na tym etapie procesu nie dochodzi do całkowitego wypełnienia naroża wykroju tworzonego przez matrycę i pojemnik dolny. Miejsce to szczególnie trudno wypełnić podczas początkowego spęczania, ponieważ wsad kontaktuje się z matrycą najpierw w centralnej części (w odniesieniu do jej wysokości). Jest to związane z kinematyką płynięcia materiału, wskutek której kształtowany stopień przyjmuje charakterystyczny dla spęczania beczkowaty kształt. Wypełnianie dodatkowo utrudnia pojawiający się wraz z postępowaniem procesu kontakt materiału z matrycą.



Ryc. 5.4. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

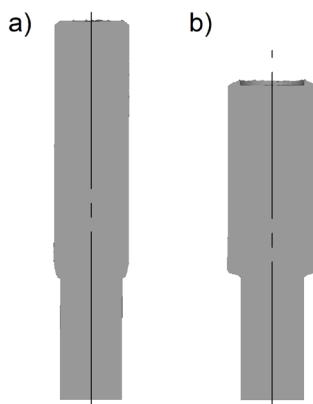


Ryc. 5.5. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

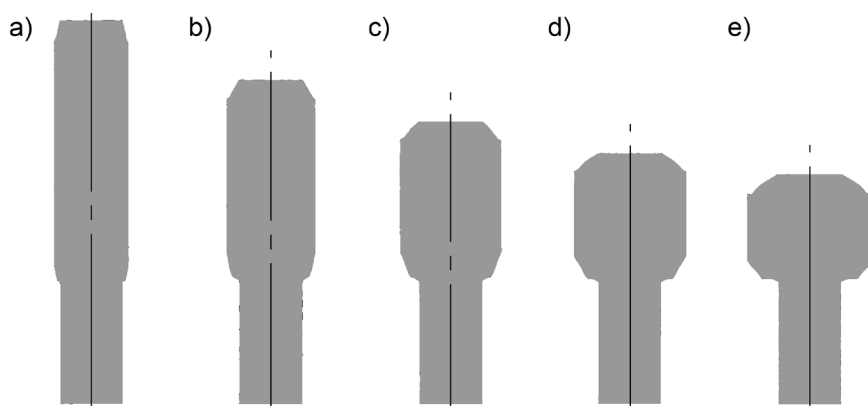
Omawiane niewypełnienie wykroju jest zależne od parametrów procesu. Największy wpływ w tym zakresie ma wielkość redukcji przekroju poprzecznego wsadu, do której dochodzi w matrycy. Parametr ten (przy określonej średnicy otworu kalibrującego matrycy) ma bezpośredni wpływ na wymiar większej średnicy wykroju w matrycy, tj. wymiar d_p (zob. ryc. 5.2). Oznacza to, że wraz ze wzrostem tego wymiaru (co jest równoznaczne ze wzrostem redukcji przekroju poprzecznego wsadu) opóźnia się moment wejścia materiału odkształcanego w kontakt ze ścianką strefy wykroju o średnicy d_p . W związku z tym początkowa faza procesu spęczania (przy określonej średnicy otworu

kalibrującego matrycy) trwa dłużej, siła spęczania przyłożona do stempla osiąga większe wartości, co w rezultacie polepsza stopień wypełnienia naroża wykroju pomiędzy pojemnikiem dolnym a matrycą.

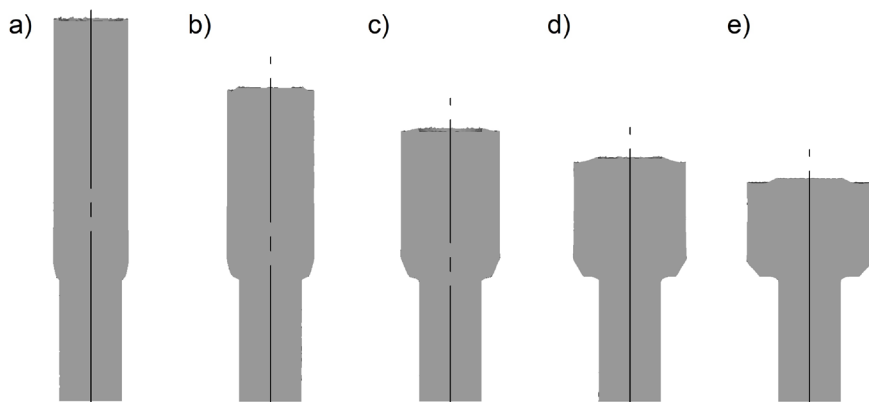
Analiza geometrii odkuwek wskazuje również, że przy określonych parametrach technologicznych procesu obserwuje się nieznacznie większą wartość średnicy spęczanego stopnia odkuwki od średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy. Zjawisko to występuje głównie w strefie stopnia znajdującej się w pobliżu pojemnika dolnego, a największy wpływ na nie ma średnica d_k otworu kalibrującego matrycy. Wraz ze wzrostem jej wartości obserwuje się niewielką intensyfikację omawianego zjawiska.



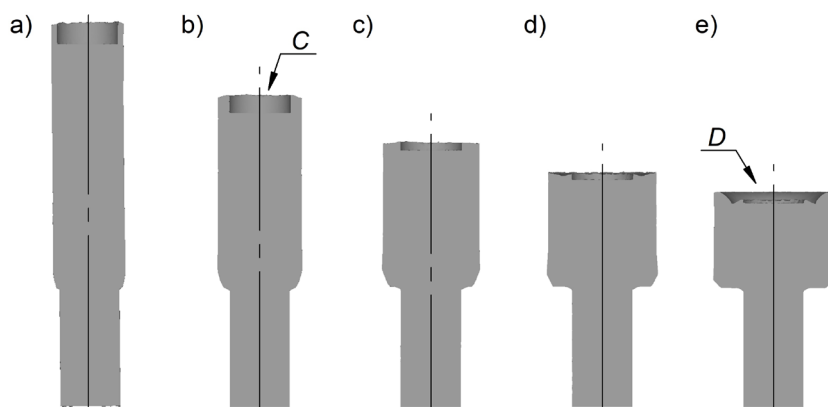
Ryc. 5.6. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm



Ryc. 5.7. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



Ryc. 5.8. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

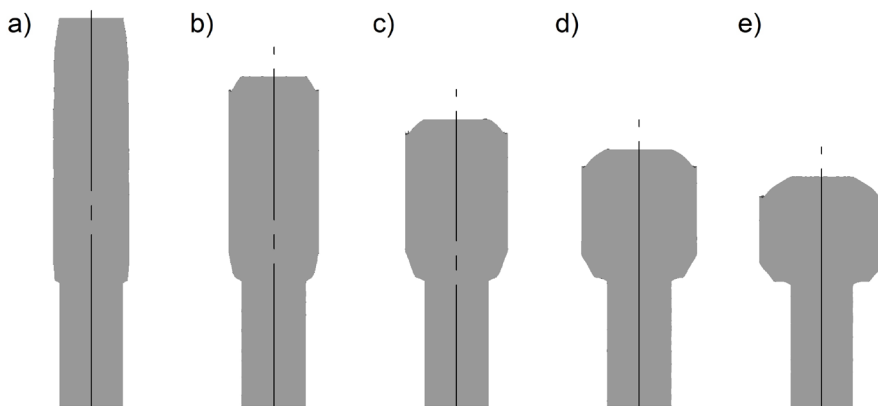


Ryc. 5.9. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

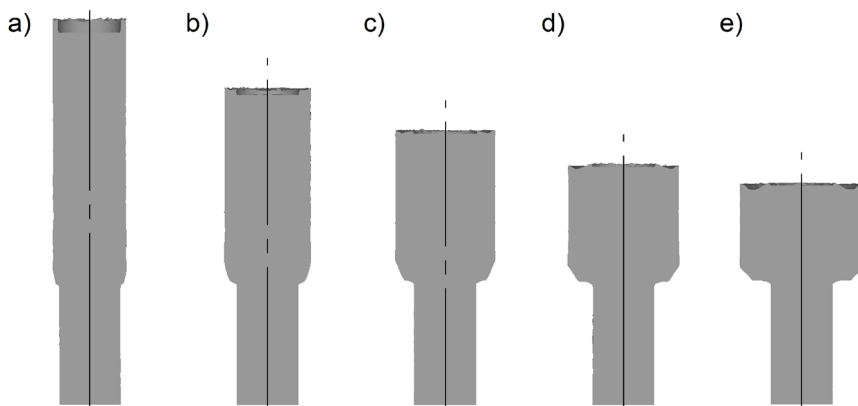
Geometria końca odkuwki znajdującego się od strony stempla jest również zależna od zastosowanych parametrów procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Jej ostateczny kształt formowany jest w ostatniej fazie procesu, podczas której przemieszcza się tylko stempel, powodując wysunięcie wyrobu z matrycy. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że kształt powierzchni czołowej odkuwki (od strony stempla) może być zróżnicowany. Wyodrębnić można w tym zakresie następujące trzy przypadki:

- przy powierzchni czołowej odkuwki tworzy się niewypełnienie przypominające sfazowaną krawędź, którego przykład oznaczono szczegółem B na rycinie 5.4b,

- na czołowej powierzchni odkuwki znajduje się otwór o stałej średnicy i głębokości utworzony przez stempel (zob. szczegół C na rycinie 5.9b),
- na czołowej powierzchni odkuwki znajduje się otwór o zmiennej i nieregularnej średnicy oraz głębokości (zob. szczegół D na rycinie 5.9e).



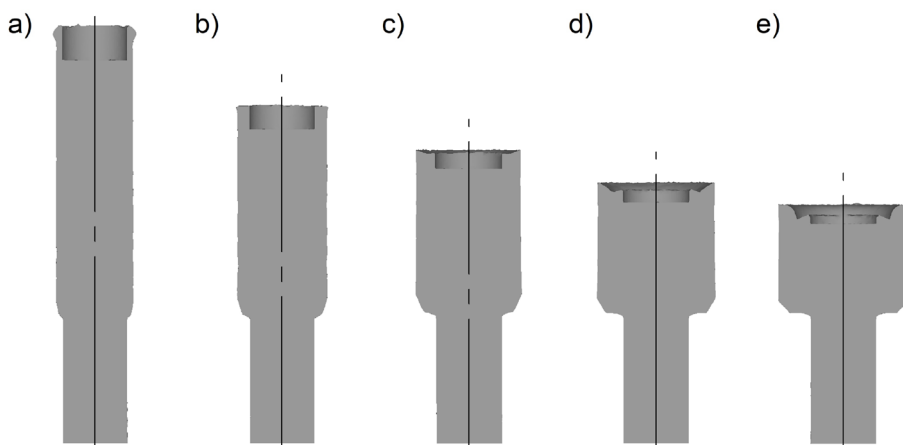
Ryc. 5.10. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



Ryc. 5.11. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

Wpływ na kształt powierzchni czołowej odkuwki mają wszystkie analizowane parametry procesu: kąt pochylenia α strefy stożkowej matrycy, wartość redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu, do której dochodzi w matrycy oraz średnica d_k jej otworu kalibrującego.

W odniesieniu do kąta pochylenia α strefy stożkowej matrycy zauważalne jest, że wpływ tego parametru jest istotny zwłaszcza dla przypadków spęczania, w których zastosowano redukcję δ_p przekroju poprzecznego wsadu o wartości 15 i 25%. Wzrost wartości omawianego kąta powoduje, że końcowa strefa odkuwki (od strony stempla) zmienia swój kształt zgodnie z kolejnością powyżej opisanych trzech możliwych przypadków. Oznacza to, że jeżeli przy zastosowaniu kąta $\alpha = 20^\circ$ na powierzchni czołowej odkuwki występuje niewypełnienie przypominające sfazowaną krawędź, to wraz ze wzrostem kąta α niewypełnienie maleje, a na powierzchni czołowej odkuwki obserwuje się tendencję do tworzenia się otworu. Jeśli z kolei przy najmniejszej z badanych wartości kąta α na powierzchni czołowej odkuwki występuje otwór o stałej średnicy, to wzrost tegoż kąta powoduje zwiększenie głębokości tego otworu bądź tworzenie się otworu o zmiennej i nieregularnej średnicy oraz głębokości.



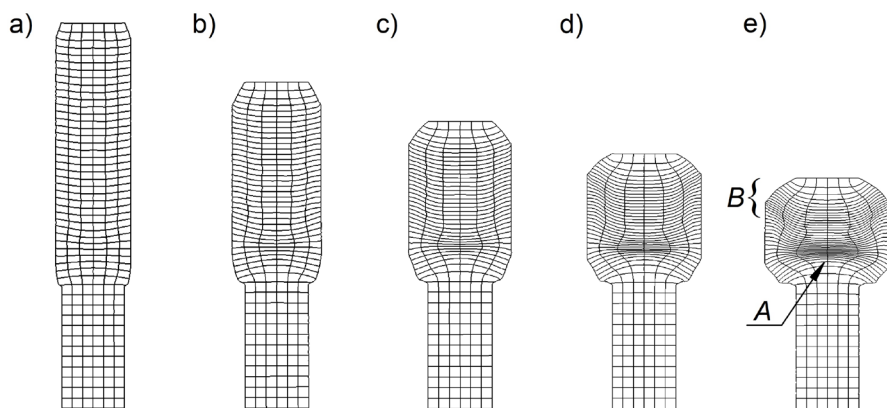
Ryc. 5.12. Przekrój osiowy odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

Wartość redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu ma taki sam wpływ na kształt końcowej strefy odkuwki, jak wartość kąta pochylenia α strefy stożkowej matrycy. Dla wszystkich badanych wartości średnic d_k otworu kalibrującego matrycy oraz wartości kątów pochylenia α strefy stożkowej tego narzędzia można zaobserwować, że wzrost redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu powoduje zanikanie niewypełnienia przypominającego sfazowaną krawędź. Ponadto sprzyja to tworzeniu się na powierzchni czołowej odkuwki otworu o coraz większej głębokości bądź o coraz bardziej zmiennej średnicy i głębokości.

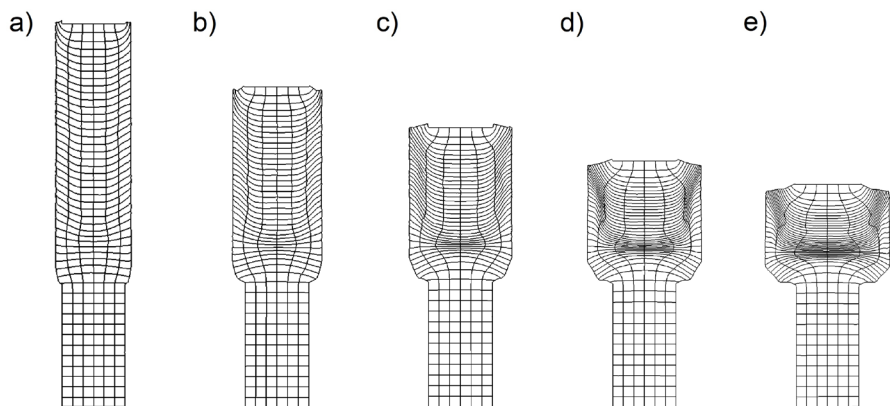
Jeśli chodzi o wpływ średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy na kształt końca odkuwki znajdującego się od strony stempla, można stwierdzić, że wzrost wartości tego parametru powoduje, że zmniejsza się możliwość powstania otworu o stałej średnicy bądź zmniejsza się jego głębokość. Równocześnie wzrost omawianej średnicy sprzyja tworzeniu się na powierzchni czołowej odkuwki otworu o zmiennej i nieregularnej średnicy oraz głębokości.

5.1.2.2. Wpływ wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy na przebieg procesu

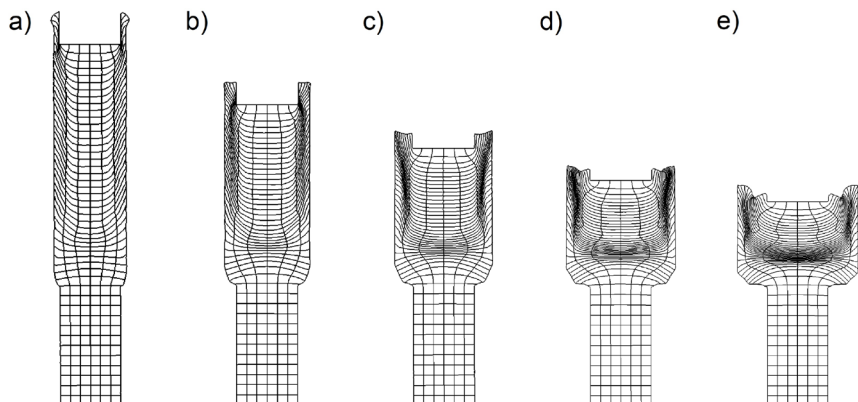
Analizę wpływu wartości średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy na przebieg procesu spęczania wsadu w postaci pręta przeprowadzono dla trzech grup wariantów kształtowania opisanych następującymi wartościami kąta α pochylenia strefy stożkowej matrycy oraz redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu: $\alpha = 20^\circ$ i $\delta_p = 5\%$, $\alpha = 40^\circ$ i $\delta_p = 15\%$ oraz $\alpha = 60^\circ$ i $\delta_p = 25\%$. Widok siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym odkuwek po zakończonym procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przedstawiono na rycinie 5.13–5.15.



Ryc. 5.13. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



Ryc. 5.14. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



Ryc. 5.15. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

Dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ (ryc. 5.13) można zaobserwować, że dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm pionowe linie siatki koordynacyjnej w strefie spęczzonego stopnia są równoległe do zarysu zewnętrznego części. Ich wzajemna odległość w kierunku promieniowym jest zbliżona. Z kolei poziome linie siatki również są od siebie oddalone o podobną odległość. Można zaobserwować niewielkie ich odchylenie w kierunku stempla przy warstwach powierzchniowych omawianego stopnia odkuwki.

Z kolei w przypadku kształtowania z zastosowaniem średnicy otworu kalibrującego matrycy wynoszącej $d_k = 20$ mm linie siatki w strefie spęcznego stopnia mają bardziej nieregularny przebieg niż w powyżej opisanym wariantcie procesu. Pionowe linie nie są idealnie równoległe do zarysu części na całej wysokości stopnia, a ponadto ich wzajemna odległość jest największa w pobliżu osi symetrii części. Poziome linie siatki są do siebie najbardziej zbliżone w strefie stopnia bliskiej pojemnika dolnego (szczegół A na rycinie 5.13e), powstałej w początkowej fazie procesu, kiedy to ruch wykonywał jedynie stempel. Natomiast przy powierzchni czołowej odkuwki od strony stempla poziome linie siatki są od siebie bardziej oddalone niż w centralnej części stopnia. Ponadto poziome linie siatki w strefie stopnia odkuwki tworzonej od momentu wprawienia w ruch matrycy i pojemnika górnego (szczegół B na rycinie 5.13e) są odchylone w kierunku stempla znacznie bardziej niż w przypadku odkuwki kształtowanej za pomocą matrycy o średnicy otworu kalibrującego równej $d_k = 12$ mm.

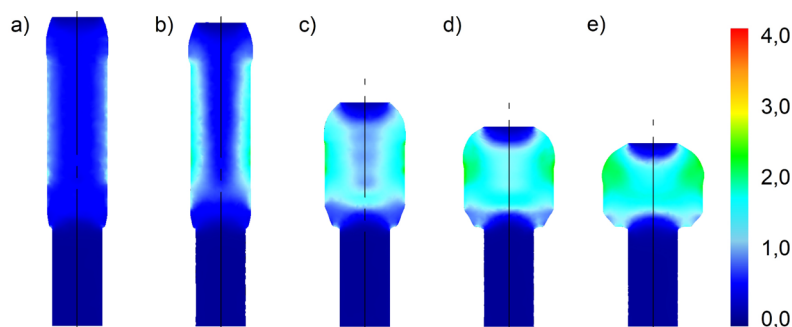
Dla odkuwek spęczanych z wykorzystaniem matrycy o średnicy otworu kalibrującego o wartości pomiędzy $d_k = 12$ i 20 mm linie siatki koordynacyjnej zmieniają swoje usytuowanie stopniowo wraz ze wzrostem średnicy d_k , poczynszyszy od tego opisanego dla najmniejszej wartości i zmierzając ku usytuowaniu opisanemu dla największej wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy.

Dla wariantów spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu opisanych parametrami $\alpha = 40^\circ$ i $\delta_p = 15\%$ (ryc. 5.14) oraz $\alpha = 60^\circ$ i $\delta_p = 25\%$ (ryc. 5.15) obserwuje się podobny wpływ średnicy otworu kalibrującego matrycy na układ siatki koordynacyjnej, jak w wypadku powyżej opisanego wariantu ($\alpha = 20^\circ$ i $\delta_p = 5\%$), niemniej jednak można zauważyć, że dla omawianych dwóch wariantów poziome linie siatki w strefie przy powierzchni stopni są bardziej odchylone w kierunku stempla niż dla omawianego wcześniej ($\alpha = 20^\circ$ i $\delta_p = 5\%$). Ponadto pojawiające się na powierzchni czołowej odkuwki (od strony stempla) otwory o stałej bądź zmiennej średnicy i głębokości (zob. rozdz. 5.1.2.1) powodują, że w tych strefach linie siatki są bardziej zbliżone do siebie.

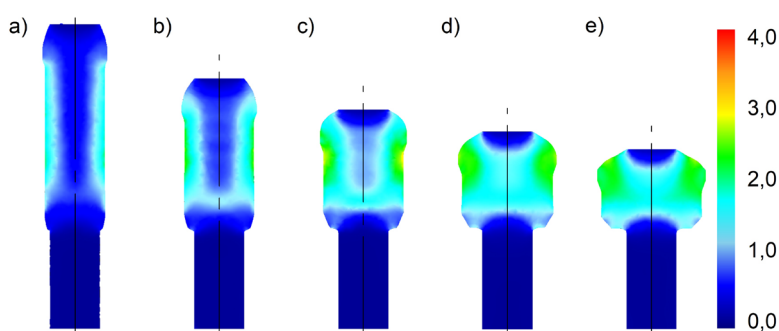
Reasumując, można stwierdzić, że w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wraz ze wzrostem średnicy otworu kalibrującego matrycy w strefie kształtowanego stopnia obserwuje się wzrost odległości pomiędzy pionowymi liniami siatki koordynacyjnej oraz coraz większe odchylenie poziomych linii w kierunku stempla w strefie przypowierzchniowej odkuwki.

Dalszą analizę wpływu średnicy otworu kalibrującego na rozkład intensywności odkształcenia, naprężenia i temperatury w odkuwce przeprowadzono na podstawie map tych parametrów zdefiniowanych dla ostatniego momentu zasadniczej fazy procesu, kiedy to ruch wykonują stempel, matryca i pojemnik górny. Po zakończeniu tego etapu dolna część odkuwki wyjmowana jest z pojemnika dolnego i pozostaje swobodna, co powoduje spadek wartości naprężenia niemalże do zera. Z tego względu prezentowane w dalszej części rozdziału rozkłady parametrów pobrano z ww. momentu trwania procesu.

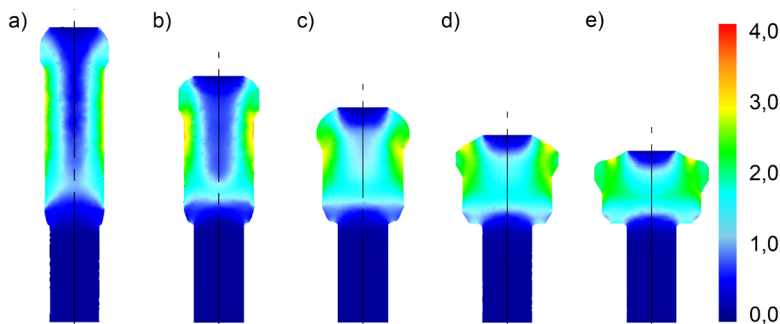
Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek dla analizowanych przypadków spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przedstawiono na rycinie 5.16–5.18.



Ryc. 5.16. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

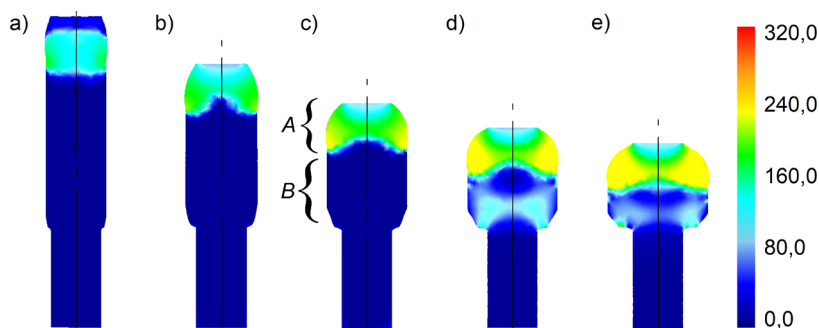


Ryc. 5.17. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

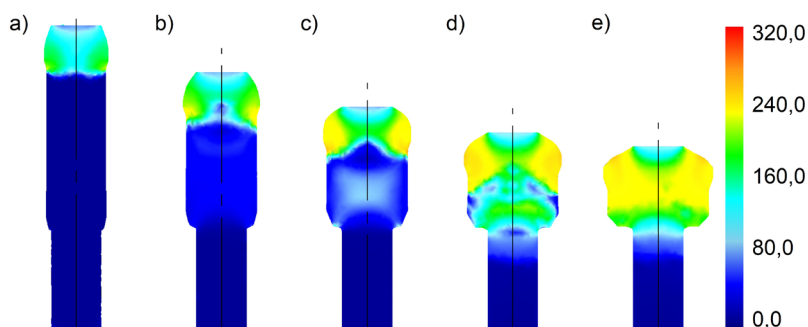


Ryc. 5.18. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

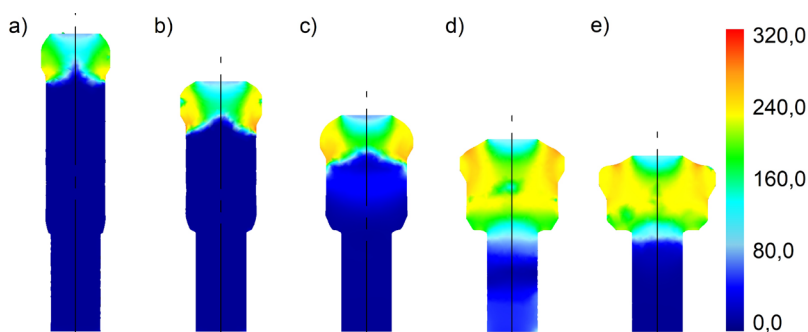
Na podstawie zaprezentowanych map można zaobserwować znaczący wpływ średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy na rozkład i wartości analizowanego parametru. Największe wartości intensywności odkształcenia znajdują się przy powierzchni zewnętrznej spęczanego stopnia. Z kolei w strefie stopnia znajdującej się w pobliżu osi symetrii odkuwki wartości intensywności odkształcenia są znacząco mniejsze. Przykładowo dla wariantu procesu zdefiniowanego parametrami $\alpha = 20^\circ$, $\delta_p = 5\%$, $d_k = 12$ mm (ryc. 5.16a) w środku wysokości spęczanego stopnia wartości intensywności odkształcenia wynoszą 0,45 i 1,2 odpowiednio w osi symetrii i na powierzchni bocznej odkuwki. Natomiast analogiczne wartości dla wariantu procesu zdefiniowanego parametrami $\alpha = 20^\circ$, $\delta_p = 5\%$, $d_k = 20$ mm (ryc. 5.16e) wynoszą 1,8 i 2,3. Oznacza to, że wraz ze wzrostem średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy zmniejsza się rozrzut wartości, jakie osiąga intensywność odkształcenia w kierunku promieniowym, a ponadto wraz ze wzrostem średnicy d_k rosną wartości intensywności odkształcenia rozpatrywane w kierunku promieniowym. Wyjątkiem jest oczywiście stopień wyrobu znajdujący się w pojemniku dolnym, który nie podlega odkształceniu plastycznemu z uwagi na fakt, iż znajduje się on w wykroju zamkniętym o objętości niemalże równej objętości tegoż stopnia. Poza tym niezależnie od wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy zaobserwować można strefę dookoła powierzchni czołowej odkuwki kontaktującej się ze stemplem, gdzie intensywność odkształcenia osiąga niske wartości. Obszar ten tworzony jest przez fragment wsadu, który przez większość trwania procesu znajduje się w otworze pojemnika górnego i jedynie przemieszcza się względem niego. Niewielkiemu odkształceniu podlega w końcowej fazie procesu (kiedy to przemieszcza się tylko stempel) podczas usuwania odkuwki z matrycy.



Ryc. 5.19. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



Ryc. 5.20. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

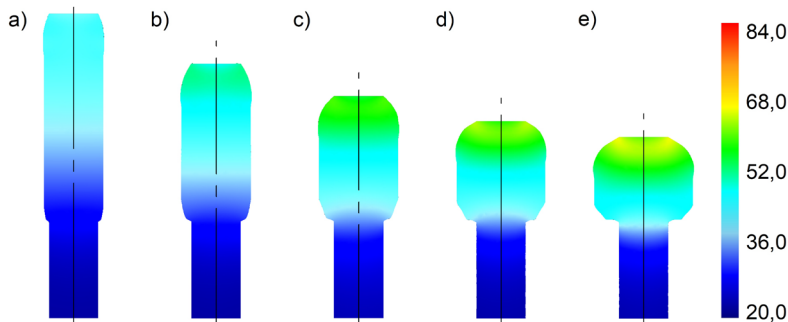


Ryc. 5.21. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

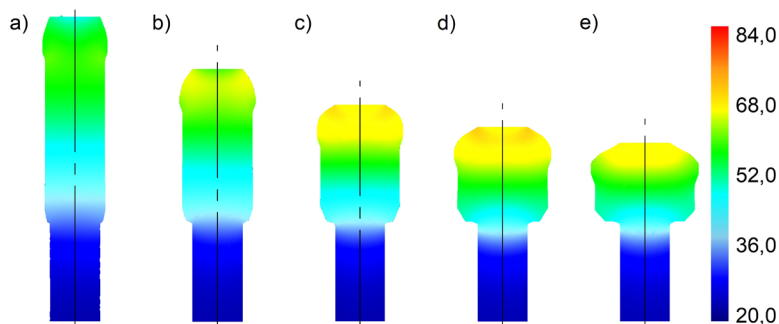
W odniesieniu do rozkładu intensywności naprężenia (ryc. 5.19–5.21) można zaobserwować, że największe wartości tego parametru koncentrują się w strefie odkuwki pomiędzy stemplem i matrycą (szczegół A na rycinie 5.19c). Z kolei w strefie stopnia pomiędzy matrycą i pojemnikiem dolnym (szczegół B na rycinie 5.19c) wartości te są znacząco mniejsze. Dla mniejszych wartości średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy można zaobserwować niejednorodną zmianę wartości naprężenia pomiędzy ww. strefami w kierunku pionowej osi (ryc. 5.21a–c i d–e). Natomiast dla większych wartości średnic d_k rozkład naprężenia pomiędzy omawianymi strefami jest bardziej jednorodny (ryc. 5.21d, e). Ponadto w drugiej z ww. stref wartości naprężenia rosną wraz ze wzrostem średnicy d_k . Dodatkowo wraz ze wzrostem wartości średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy można zaobserwować również wzrost maksymalnych wartości intensywności naprężenia. Przykładowo dla procesu opisanego parametrami: $\alpha = 40^\circ$, $\delta_p = 15\%$ dla średnicy $d_k = 12$ mm (ryc. 5.20a) największa wartość intensywności naprężenia wynosi ok. 220 MPa, podczas gdy dla $d_k = 20$ mm (ryc. 5.20e) jest równa ok. 320 MPa.

Należy nadmienić, że niska wartość intensywności naprężenia w strefie odkuwki pomiędzy matrycą a pojemnikiem dolnym jest korzystna, jeśli chodzi o generowanie niezamierzonego wzrostu średnicy stopnia. Można to wytłumaczyć z pomocą zjawiska zaobserwowanego podczas analizy geometrii odkuwek – niezamierzony przyrost średnicy spęczanego stopnia jest mniejszy dla mniejszych wartości średnicy d_k , co pozostaje w zgodzie z rozkładem intensywności naprężenia. Niezależnie od wartości średnicy d_k najniższe wartości intensywności naprężenia występują w strefie stopnia znajdującej się w pojemniku dolnym. To właśnie w tym obszarze materiał nie odkształca się i pozostaje w wykroju zamkniętym, a w związku z tym podlega trójosiowemu ściskaniu, dla którego naprężenia główne mają zbliżone wartości, co z kolei sprawia, że intensywność naprężenia osiąga bardzo małe wartości, zbliżone do zera.

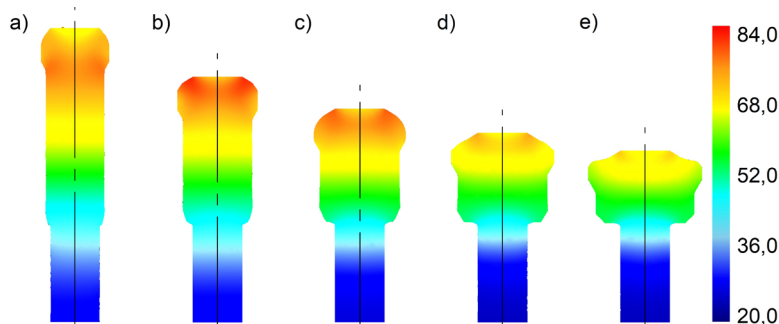
Na podstawie analizy rozkładu temperatury w przekroju osiowym odkuwek (ryc. 5.22–5.24) można stwierdzić, że rozkład analizowanego parametru jest warstwowy. Wartości największe znajdują się przy powierzchni czołowej wyrobu znajdującej się od strony stempla i maleją w miarę oddalania się od tej strefy. W zależności od warunków realizacji procesu maksymalna temperatura nie przekracza 84°C . Można zaobserwować, że dla średnicy otworu kalibrującego matrycy nie większej od $d_k = 16$ mm maksymalne wartości temperatury rosną wraz ze wzrostem średnicy d_k , z kolei dla średnicy o wartości powyżej $d_k = 16$ mm maksymalna temperatura odkuwki jest zbliżona bądź niższa niż dla tej obserwowanej przy spęczaniu z zastosowaniem matrycy o średnicy otworu kalibrującego równej $d_k = 16$ mm.



Ryc. 5.22. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



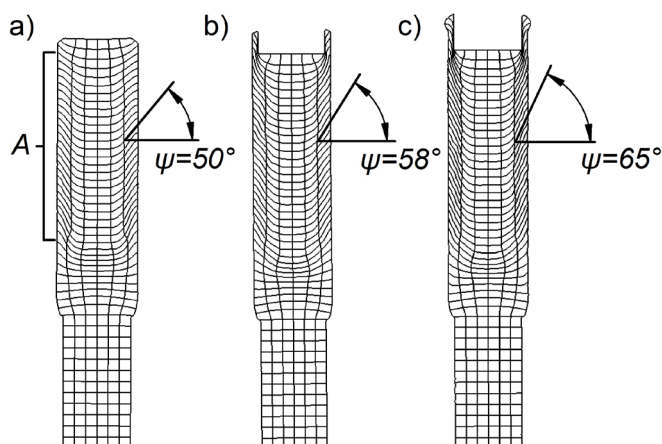
Ryc. 5.23. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm



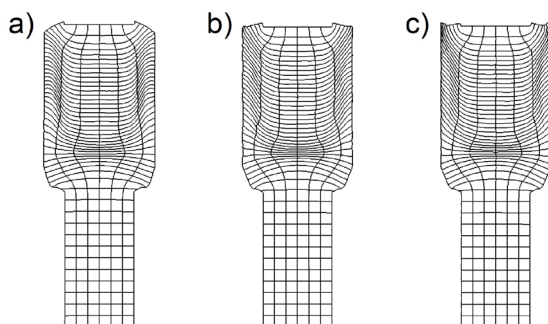
Ryc. 5.24. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy d_k : a) 12 mm, b) 14 mm, c) 16 mm, d) 18 mm, e) 20 mm

5.1.2.3. Wpływ wartości kąta strefy stożkowej matrycy na przebieg procesu

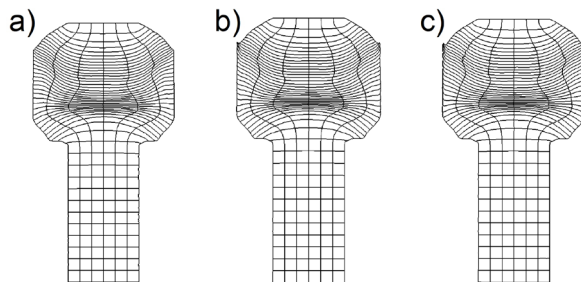
Analizę wpływu wielkości kąta strefy stożkowej matrycy na przebieg procesu spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przeprowadzono na podstawie wariantów procesu opisanych parametrami: $d_k = 12$ mm i $\delta_p = 25\%$, $d_k = 16$ mm i $\delta_p = 15\%$ oraz $d_k = 20$ mm i $\delta_p = 5\%$. Widok siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym przedstawiono dla odkuwki po zakończeniu procesu, natomiast rozkłady intensywności odkształcenia, naprężenia i temperatury zaprezentowano w momencie zakończenia fazy procesu, kiedy to przemieszczają się stempel, matryca i pojemnik górny.



Ryc. 5.25. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°



Ryc. 5.26. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°



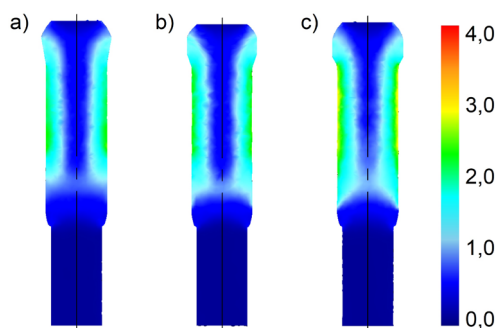
Ryc. 5.27. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°

Na podstawie analizy siatki koordynacyjnej (ryc. 5.25–5.27) widocznej w przekroju osiowym można stwierdzić, że wielkość kąta strefy stożkowej matrycy ma największy wpływ na jej usytuowanie w warstwie przypowierzchniowej spęczanego stopnia odkuwki. Zależność ta widoczna jest w strefie stopnia, która kształtowana jest w zasadniczej fazie procesu, kiedy matryca i pojemnik górny przemieszczają się przeciwnie do ruchu stempla (szczegół A na rycinie 5.25a). Wraz ze wzrostem kąta strefy stożkowej matrycy poziome linie siatki odchylają się coraz bardziej w kierunku stempla, maleje też ich wzajemna odległość. Przykładowo dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ odchylenie od poziomu linii siatki wynosi $\psi = 50^\circ$, $\psi = 58^\circ$ oraz $\psi = 65^\circ$ odpowiednio dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, 40° i 60° (ryc. 5.25). W związku z powyższym zwiększanie wartości kąta α intensyfikuje osiowe płynięcie materiału w strefie przypowierzchniowej odkuwki.

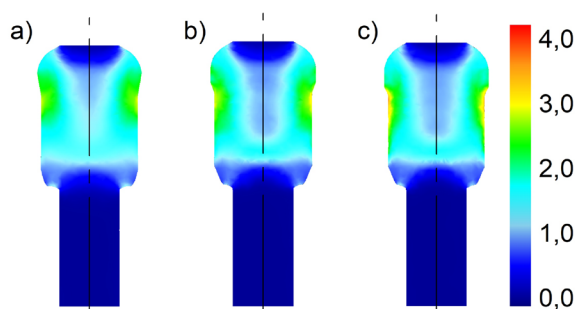
Powyższa zależność jest jednak mniej widoczna w przypadku niskich stopni, tj. o większej średnicy (ryc. 5.27). Wynika to z faktu, że przemieszczenie matrycy i pojemnika górnego jest wówczas niewielkie, a dużą część procesu stanowi początkowa jego faza, w której przemieszcza się tylko stempel. W odniesieniu do znajdującej się w pobliżu osi symetrii wyrobu centralnej strefy spęczanego stopnia obserwuje się niewielki wpływ wielkości kąta α na układ linii siatki koordynacyjnej.

Wpływ wielkości kąta α pochylenia strefy stożkowej matrycy na rozkład intensywności odkształcenia jest analogiczny do układu linii siatki koordynacyjnej. W warstwach przypowierzchniowych spęczanego stopnia wraz ze wzrostem wartości kąta α można zaobserwować coraz większe wartości odkształcenia (ryc. 5.28–5.30). Wartości maksymalne koncentrują się w strefie odkuwki znajdującej się w otworze kalibrującym matrycy.

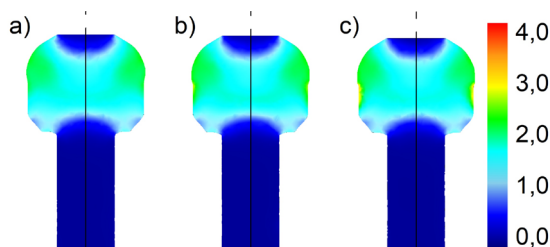
Dla wariantu procesu opisanego parametrami $d_k = 16$ mm oraz $\delta_p = 15\%$ największe wartości odkształcenia w ww. strefie wynoszą 2,8 i 3 oraz 3,3 odpowiednio dla kątów $\alpha = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ (ryc. 5.29).



Ryc. 5.28. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°

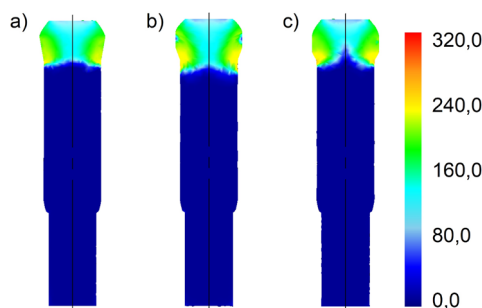


Ryc. 5.29. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°

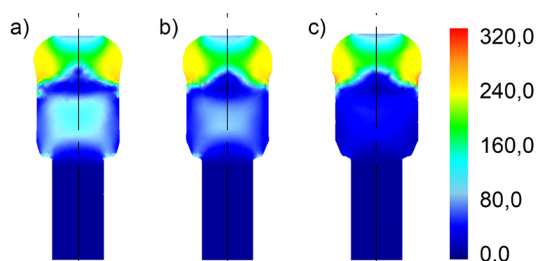


Ryc. 5.30. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°

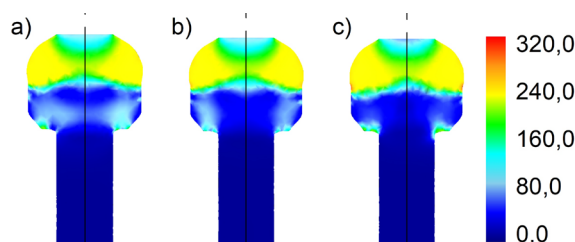
Wartości znacząco mniejsze znajdują się w pobliżu osi symetrii odkuwki, natomiast najmniejsze występują w pobliżu powierzchni kontaktującej się ze stemplem. W tych strefach na wartość intensywności odkształcenia niewielki wpływ ma wartość kąta α pochylenia strefy stożkowej matrycy, podobnie jak w przypadku układu siatki koordynacyjnej, która obrazuje sposób płynięcia materiału w całej objętości odkuwki.



Ryc. 5.31. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°



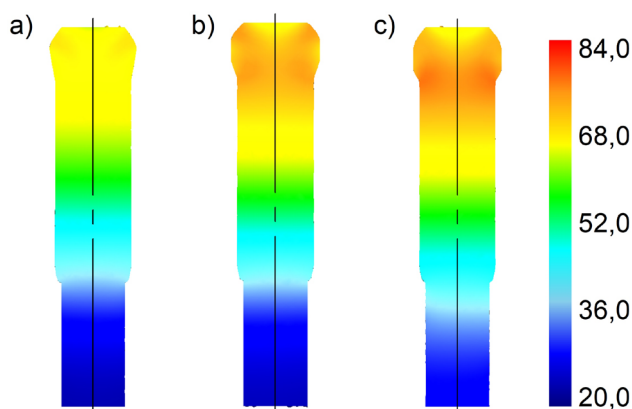
Ryc. 5.32. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°



Ryc. 5.33. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20° , b) 40° , c) 60°

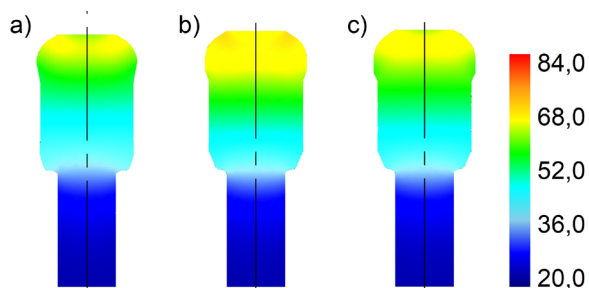
Kąt α pochylenia strefy stożkowej matrycy oddziałuje również na rozkład i wartość intensywności naprężenia (ryc. 5.31–5.33). Wartość tego kąta ma największy wpływ na stan naprężenia występujący w strefie spęczanego stopnia odkuwki pomiędzy matrycą a pojemnikiem dolnym. Od momentu wprawienia w ruch matrycy i pojemnika górnego strefa ta jest swobodna i nie znajduje się w wykroju. Z tego powodu wartości naprężenia są istotne z punktu widzenia możliwości niezamierzonego wzrostu średnicy stopnia powyżej oczekiwanej wartości, zdefiniowanej przez średnicę d_k otworu kalibrującego matrycy. Widoczne jest, że wraz ze wzrostem kąta α wartości intensywności naprężenia w ww. strefie maleją, przeciwdziałając przy tym niezamierzonemu wzrostowi średnicy stopnia. Przykładowo dla wariantu procesu realizowanego przy zastosowaniu średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ wartość intensywności naprężenia w osi symetrii odkuwki wynosi w środku wysokości ww. strefy 112 i 84 oraz 48 MPa odpowiednio dla kąta $\alpha = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ (ryc. 5.32).

W odniesieniu do wpływu kąta α strefy stożkowej matrycy na rozkład temperatury w odkuwce można stwierdzić, że w przypadku małej wartości średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy wzrost wartości kąta α powoduje wzrost temperatury. Jej najwyższe wartości koncentrują się w strefie odkuwki w pobliżu matrycy, gdzie odbywa się zasadnicze odkształcenie plastyczne materiału. Dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ maksymalne wartości temperatury wynoszą $71^\circ, 76^\circ$ i 78° C odpowiednio dla kąta $\alpha = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ (ryc. 5.34).

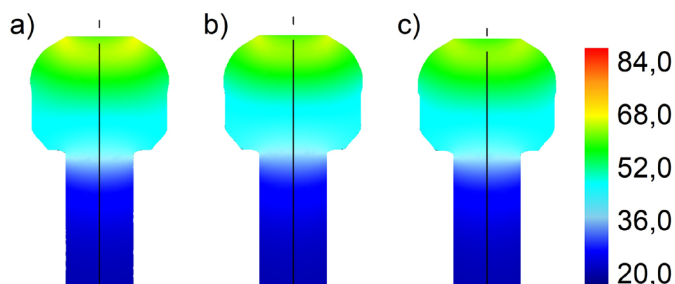


Ryc. 5.34. Rozkład temperatury (w $^\circ\text{C}$) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy a) 20° , b) 40° , c) 60°

Natomiast w przypadku większej wartości średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy wzrost wartości kąta α nie wpływa znacząco na rozkład i wartość temperatury w odkuwce (ryc. 5.35 i 5.36).



Ryc. 5.35. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20°, b) 40°, c) 60°

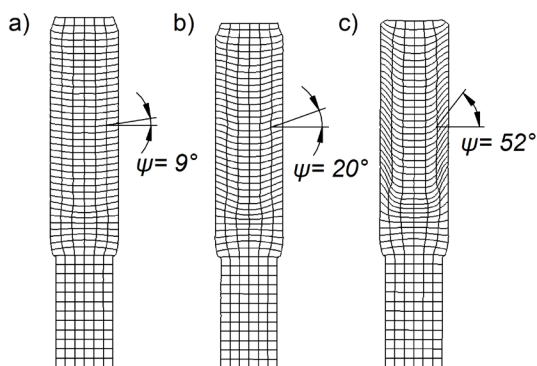


Ryc. 5.36. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$ oraz kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy α : a) 20°, b) 40°, c) 60°

Przyczyn tego zjawiska można upatrywać w różnych wartościach odkształcenia i powierzchni kontaktu materiału odkształcanego z narzędziami oraz w odmiennych prędkościach matrycy i pojemnika górnego. Wszystkie te czynniki zależą od rozmiarów średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy i wspólnie z wielkością kąta α wpływają na temperaturę odkuwki.

5.1.2.4. Wpływ wartości redukcji przekroju poprzecznego materiału na przebieg procesu

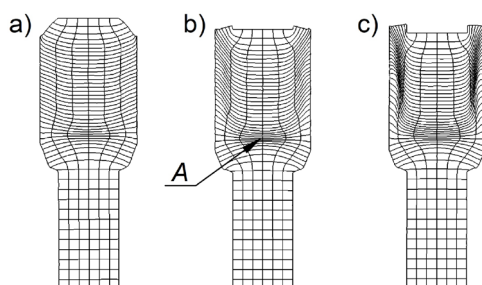
Do omówienia wpływu wielkości redukcji przekroju poprzecznego materiału na przebieg procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wytypowano warianty procesu, w których zastosowano kąt pochylenia strefy stożkowej matrycy oraz średnicę otworu kalibrującego matrycy o wartościach: $\alpha = 20^\circ$ i $d_k = 12$ mm, $\alpha = 40^\circ$ i $d_k = 16$ mm oraz $\alpha = 60^\circ$ i $d_k = 20$ mm. Podobnie jak w przypadku analizy wpływu wielkości kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy oraz jej średnicy otworu kalibrującego, przedstawiono widok siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym odkuwki po zakończeniu procesu, a także rozkład intensywności odkształcenia oraz temperatury w ostatnim etapie jednoczesnego ruchu stempla, matrycy i pojemnika. Z kolei rozkład intensywności naprężenia przedstawiono w momencie trwania tego etapu procesu, w którym występuje jednoczesny ruch trzech narzędzi z uwagi na fakt, iż to właśnie wtedy obserwuje się największy wpływ redukcji przekroju na ww. parametr.



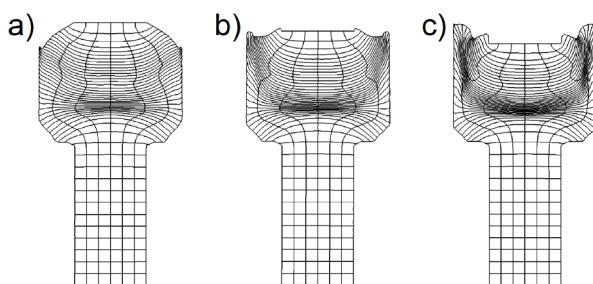
Ryc. 5.37. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

Widok siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym odkuwek w zależności od wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu przedstawiono na rycinie 5.37–5.39. Widoczny jest wpływ analizowanego parametru na układ linii obrazujących płynięcie materiału w dwóch obszarach. Pierwszy znajduje się w strefie centralnej stopnia usytuowanej w pobliżu pojemnika dolnego, natomiast drugi stanowi warstwa przypowierzchniowa odkuwki. W odniesieniu do strefy centralnej stopnia usytuowanej w pobliżu pojemnika

dolnego (szczegół A na rycinie 5.38b) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem redukcji przekroju poprzecznego wsadu dochodzi do zagęszczenia poziomych linii siatki, można też zaobserwować, że w warstwach przypowierzchniowych spęczanego stopnia materiał płynie intensywniej w kierunku osiowym. Poziome linie siatki odchylają się pod coraz większym kątem, który dla wariantu procesu opisanego kątem pochylenia strefy stożkowej matrycy wynoszącym $\alpha = 20^\circ$ oraz średnicą otworu kalibrującego matrycy równą $d_k = 12$ mm wynosi $\psi = 9^\circ, 20^\circ$ i 52° odpowiednio dla redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_p = 5\%, 15\%$ i 25% (ryc. 5.37).



Ryc. 5.38. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

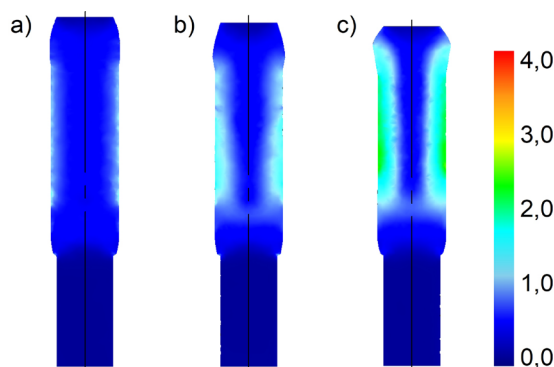


Ryc. 5.39. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

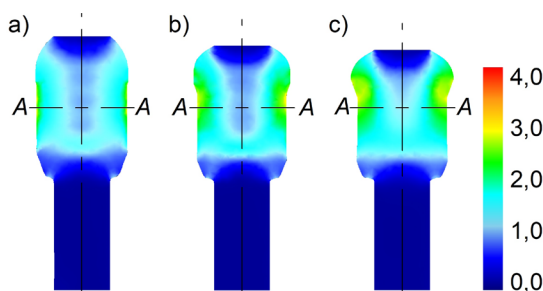
Powyższe zależności wynikają z faktu, iż wraz ze wzrostem redukcji przekroju poprzecznego wsadu (przy określonej średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy) rośnie wartość większej średnicy d_p wykroju matrycy (zob. ryc. 5.2). Oznacza to, że początkowa faza procesu (w której przemieszcza się tylko stempeł) trwa dłużej, czemu towarzyszy wzrost siły przyłożonej do stempla. Skutkuje to zagęszczeniem linii siatki w dolnej strefie spęczanego stopnia, a ponadto

w strefie matrycy wsad w trakcie spęczania osiąga coraz większą średnicę wraz ze wzrostem wartości redukcji δ_p przekroju. Płynięcie materiału w kierunku osiowym w strefie przypowierzchniowej odbywa się zatem z większą prędkością niż w strefie centralnej znajdującej się w pobliżu osi symetrii odkuwki, co przekłada się na powyżej opisany układ linii siatki koordynacyjnej w strefie przypowierzchniowej spęczanego stopnia.

Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwkach jest także zależny od wartości redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu. Wpływ ten jest analogiczny do sposobu płynięcia materiału, jaki zobrazowano za pomocą usytuowania siatki koordynacyjnej, a mianowicie wzrost wartości parametru δ_p powoduje, że na powierzchni bocznej spęczanego stopnia pojawiają się coraz większe wartości intensywności odkształcenia (ryc. 5.40–5.42).

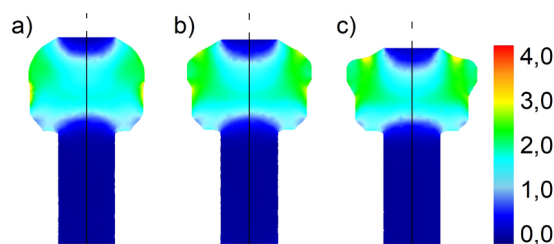


Ryc. 5.40. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwki uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

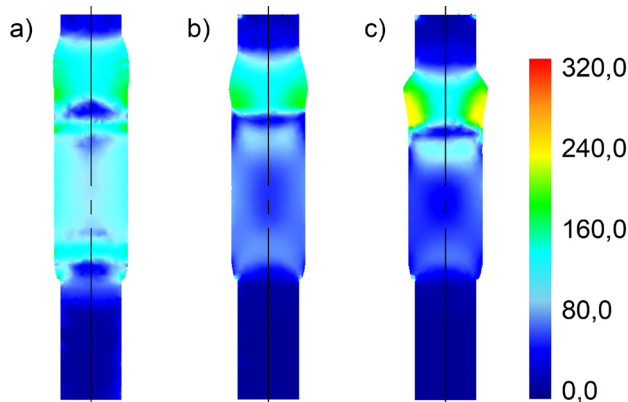


Ryc. 5.41. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwki uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

Dodatkowo rozkład odkształcenia w kierunku promieniowym staje się coraz bardziej jednorodny, a przypowierzchniowe warstwy, gdzie koncentrują się największe wartości odkształcenia, są coraz większe i przybliżają się do osi symetrii odkuwki. Przykładowo dla procesu realizowanego przy zastosowaniu kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm w płaszczyźnie A-A (prostopadłej do osi spęczanego stopnia) stosunek maksymalnej do minimalnej wartości intensywności odkształcenia wynosi 2,7, 2,5 oraz 2,1 odpowiednio dla redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 5\%$, 15% oraz 25% (ryc. 5.41).



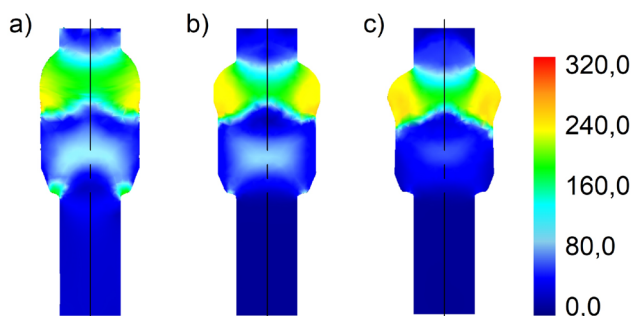
Ryc. 5.42. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%



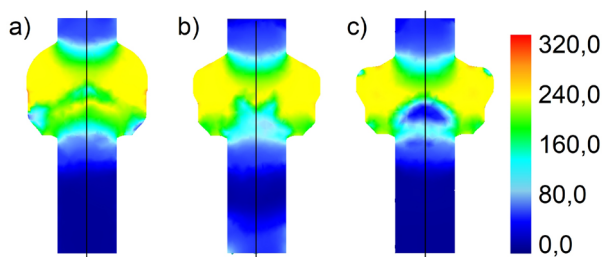
Ryc. 5.43. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

Wpływ wartości redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu na rozkład intensywności naprężenia jest widoczny zwłaszcza w zasadniczej fazie procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, kiedy to jednocześnie

przemieszczają się stempel, matryca i pojemnik górny. Analizę tej zależności przeprowadzono w momencie, gdy odkuwki kształtowane zgodnie z wytypowanymi parametrami procesu osiągnęły taką samą wysokość całkowitą (ryc. 5.43–5.45). Zaobserwowano wpływ wartości redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu na dwa czynniki. Po pierwsze wzrostowi wartości parametru δ_p towarzyszy wzrost wartości intensywności naprężenia w strefie odkuwki znajdującej się w stożkowej części wykroju matrycy. Po drugie wzrost wartości δ_p powoduje spadek wartości naprężenia w strefie odkuwki pomiędzy matrycą i pojemnikiem dolnym. Zjawisko to pozwala zapobiegać niezamierzonemu wzrostowi średnicy stopnia powyżej wartości równej średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy.



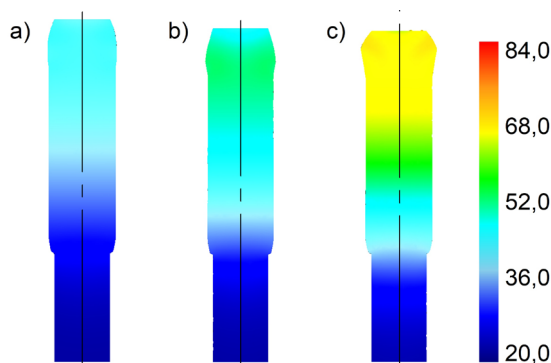
Ryc. 5.44. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%



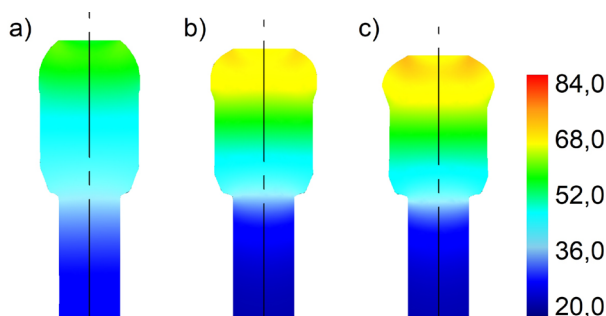
Ryc. 5.45. Rozkład intensywności naprężenia (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

Wartość redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu wpływa również na rozkład temperatury w odkuwce. Wraz ze wzrostem parametru δ_p rośnie wartość intensywności odkształcenia w odkuwce, a ponadto zwiększa się powierzchnia,

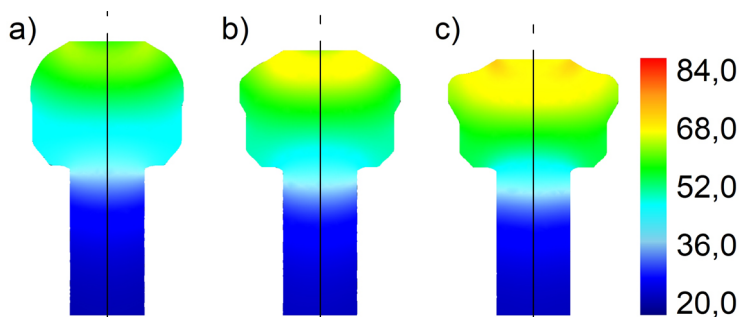
na której odkształcany materiał wchodzi w kontakt z powierzchnią wykroju matrycy w strefie jej stożkowej części zdefiniowanej kątem pochylenia α . W związku z powyższym czynniki te powodują wzrost temperatury odkuwki, który zaobserwować można w strefie wyrobu znajdującej się w obszarze matrycy (ryc. 5.46–5.48). Z tego powodu poza wzrostem temperatury maksymalnej zwiększa się także długość strefy stopnia o podwyższonej temperaturze, niemniej jednak rozkład wartości pozostaje warstwowy z uwagi na specyfikę realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu.



Ryc. 5.46 Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 20^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 12$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%



Ryc. 5.47. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 16$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%



Ryc. 5.48. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci pręta dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 60^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $d_k = 20$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_p : a) 5%, b) 15%, c) 25%

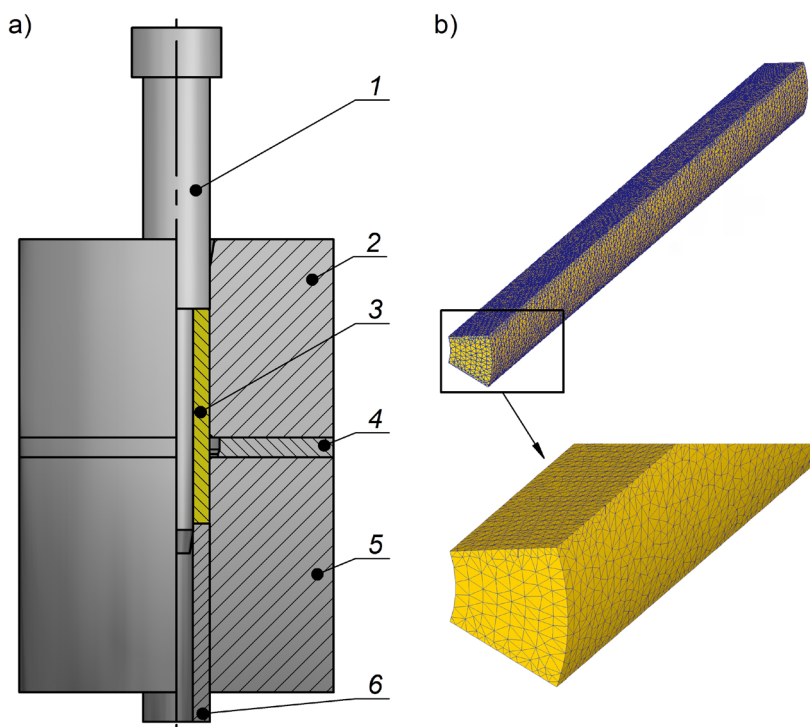
5.2. Analiza numeryczna procesu spęczniania z zastosowaniem wsadu w postaci rury

5.2.1. Metodyka badawcza

Obliczenia numeryczne procesu spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wsadu w postaci rury przeprowadzono metodą elementów skończonych. Model geometryczny procesu przedstawiony na rycinie 5.49 składa się ze wsadu drażonego, stempla, pojemnika górnego, matrycy, wyrzutnika oraz pojemnika dolnego. Wsad zamodelowano jako obiekt sztywno-plastyczny, natomiast narzędzia jako obiekty sztywne. Dyskretyzacji wsadu dokonano za pomocą elementów tetragonalnych czterowęzłowych w liczbie ok. 100 tys. Z uwagi na zastosowanie elementów tetragonalnych oraz fakt, iż badany proces można traktować jako osiowosymetryczny obliczenia przeprowadzono dla wycinka wsadu o kącie wierzchołkowym równym 36° . Podejście takie umożliwia wygenerowanie stosunkowo dużej liczby elementów skończonych na grubości ścianki wsadu drażonego bez konieczności ich mnożenia w całej objętości wsadu. Parametry symulacji przyjęto analogiczne do analizy procesu spęczniania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta. Jako materiał odkształcany przyjęto stop aluminium EN AW-6060. Krzywą płynięcia opisano równaniem (4.5) wyznaczonym w badaniach własnych, natomiast pozostałe dane modelu materiałowego pobrano z bazy programu. Przyjęto początkową temperaturę narzędzi i wsadu równą 20°C oraz współczynnik wymiany ciepła pomiędzy ww.

obiektami na pułapie $10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Warunki tarcia pomiędzy wsadem a narzędziami opisano za pomocą modelu tarcia stałego, przyjmując czynnik tarcia $m = 0,17$, którego wartość wyznaczono w badaniach własnych (zob. rozdz. 4.2).

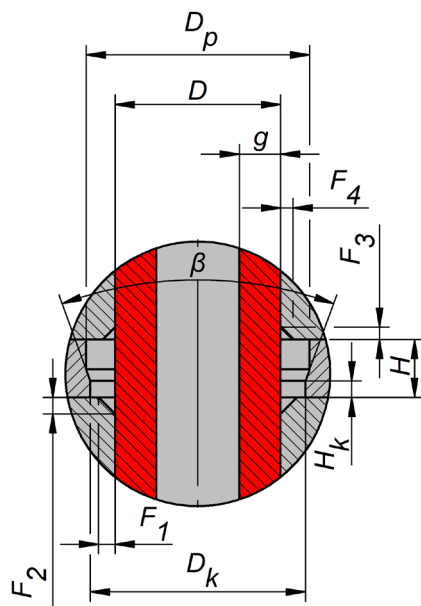
Przyjęto wsad w postaci odcinka rury o średnicy $\varnothing 20 \text{ mm}$, grubości ścianki 5 mm i długości 65 mm . W każdym z analizowanych przypadków fragment wsadu o długości 20 mm umieszczono w pojemniku dolnym. Na podstawie wyników badań wstępnych przedstawionych w rozdziale 4.4 założono, że wysokość matrycy będzie równa 120% grubości ścianki wsadu, tj. $H = 6 \text{ mm}$. Pozostałe wymiary wykroju przedstawiono na rycinie 5.50 oraz w tabeli 5.2.



Ryc. 5.49. Model geometryczny procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci rury (a) oraz wsad po procesie dyskretyzacji (b); 1 – stempel, 2 – pojemnik górny, 3 – wsad, 4 – matryca, 5 – pojemnik dolny, 6 – wyrzutnik

We wszystkich analizowanych przypadkach prędkość stempla była taka sama – 5 mm/s – natomiast prędkość pojemnika górnego i matrycy dla poszczególnych wariantów kształtowania wyznaczono z zależności (3.2). Założono, że parametrami zmiennymi będą:

- średnica D_k otworu kalibrującego matrycy,
- redukcja przekroju poprzecznego wsadu δ , zachodząca w matrycy.



Ryc. 5.50. Wymiary wykroju w procesie spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci rury; rysunek stanowi szczegół A z ryc. 3.2

Wartość redukcji przekroju poprzecznego wsadu drążonego, do jakiej dochodzi w matrycy, określono poniższą zależnością:

$$\delta_r = \frac{D_p^2 - D_k^2}{D_p^2 - D^2 + 4 \cdot D \cdot g - 4 \cdot g^2} \cdot 100\% , \quad (5.2)$$

gdzie: oznaczenia we wzorze są zgodne z ryc. 5.50.

Tabela 5.2. Parametry analizowanych wariantów procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci rury; oznaczenia zgodne z ryc. 3.2 i 5.50 oraz ze wzorem (5.2)

Parametry stałe									
Symbol	D [mm]	H [mm]	g [mm]	H_k [mm]	β [°]	F_1 [mm]	F_2 [mm]	F_3 [mm]	F_4 [mm]
Wartość	20	6	5	1	40	0,5	0,5	1	1
Parametry zmienne									
Symbol	D_k [mm]					δ_r [%]			
Wartość	22, 24, 26, 28					5, 10, 15			

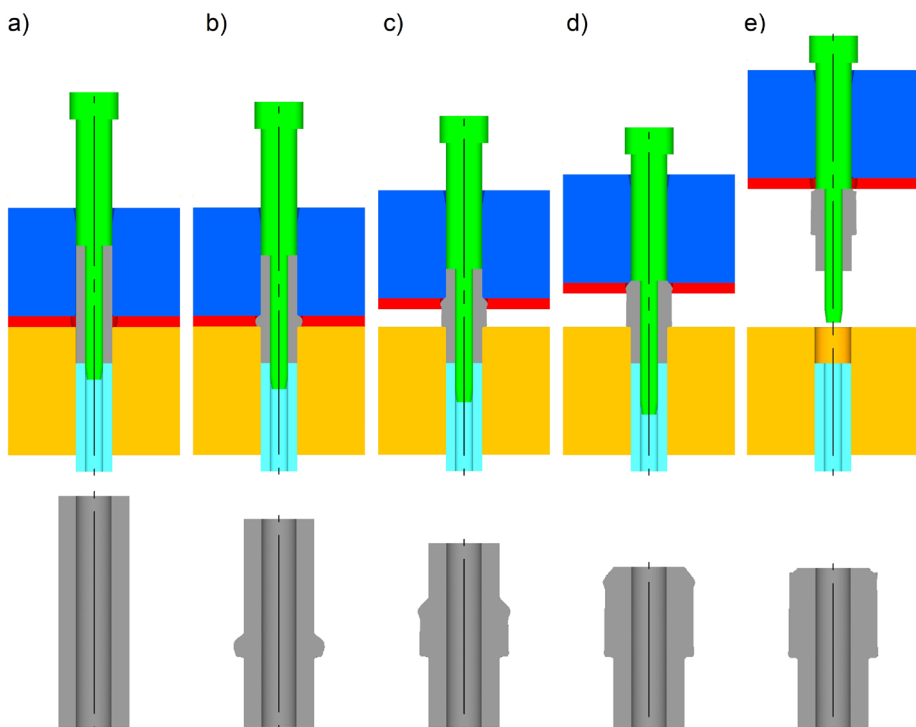
5.2.2. Wyniki analizy numerycznej

Analiza numeryczna procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wsadu drążonego została ukierunkowana na określenie oddziaływania wybranych parametrów technologicznych na przebieg procesu. Wyniki dotyczące wpływu wartości średnicy D_k otworu kalibrującego matrycy oraz wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_r zostały przedstawione w dwóch podrozdziałach. Zaprezentowano w nich informacje dotyczące przebiegu procesu, stanu odkształcenia oraz naprężenia panującego w odkuwce oraz zjawisk ograniczających.

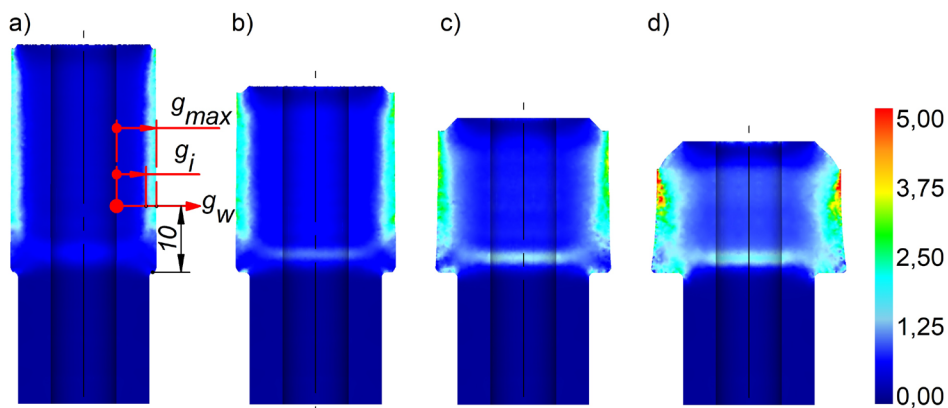
5.2.2.1. Wpływ wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy na przebieg procesu

Badania dotyczące wpływu wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy na przebieg procesu spęczania wsadu w postaci rury zostały przeprowadzone w oparciu o analizę wariantów procesu, w których zastosowano wsad o średnicy zewnętrznej $D = 20$ mm i grubości ścianki $g = 5$ mm. Kształtowano go z zastosowaniem matrycy posiadającej kąt pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$ oraz zapewniającej redukcję przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$. Parametr zmienny matrycy, tj. wartość średnicy otworu kalibrującego, przyjęto równy $D_k = 22$ mm, 24 mm, 26 mm oraz 28 mm.

Progresję kształtu odkuwki wytwarzanej ze wsadu w postaci rury przedstawiono na rycinie 5.51. Po wprowadzeniu w ruch stempla (posiadającego trzpień) dochodzi do wypełniania odkształcanym materiałem wykroju matrycy (ryc. 5.51a, b). Następnie przeciwnie do ruchu stempla zaczyna przemieszczać się pojemnik górny wraz z matrycą (ryc. 5.51c), w rezultacie czego początkowo zamknięty wykrój otwiera się, umożliwiając przyrost wysokości kształtowanego stopnia. Po zatrzymaniu wszystkich komponentów (ryc. 5.51d) rozpoczyna się etap wyjmowania odkuwki z narzędzi. Zwiększa się wówczas odległość pomiędzy matrycą a pojemnikiem dolnym, po czym wprawia w ruch jedynie stempel. Na tym etapie procesu ma miejsce również kształtowanie strefy końcowej wyrobu znajdującej się od strony stempla (ryc. 5.51e). Wyjęcie trzpienia z otworu odkuwki ma miejsce podczas ruchu stempla do góry, podczas którego przemieszczenie wyrobu blokowane jest przez matrycę.



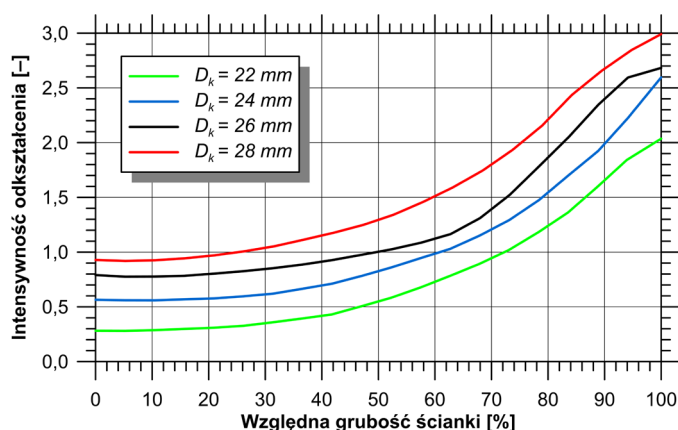
Ryc. 5.51. Progresja kształtu odkuwki wytwarzanej ze wsadu w postaci rury



Ryc. 5.52. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20 \text{ mm}$, $g = 5 \text{ mm}$) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm

Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek drażnionych dla analizowanych parametrów procesu spęczania ze strefą

odkształcenia o zmiennym położeniu przedstawiono na rycinie 5.52. We wszystkich przypadkach największe wartości ww. parametru zlokalizowane są przy zewnętrznej powierzchni spęczanego stopnia. Intensywność odkształcenia rośnie wraz ze wzrostem średnicy otworu kalibrującego matrycy. W strefie znajdującej się w pobliżu otworu odkuwki wartości badanego parametru są stosunkowo niewielkie, z kolei fragment wyrobu znajdujący się w pojemniku dolnym nie odkształca się plastycznie.



Ryc. 5.53. Rozkład intensywności odkształcenia na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20 \text{ mm}$, $g = 5 \text{ mm}$) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

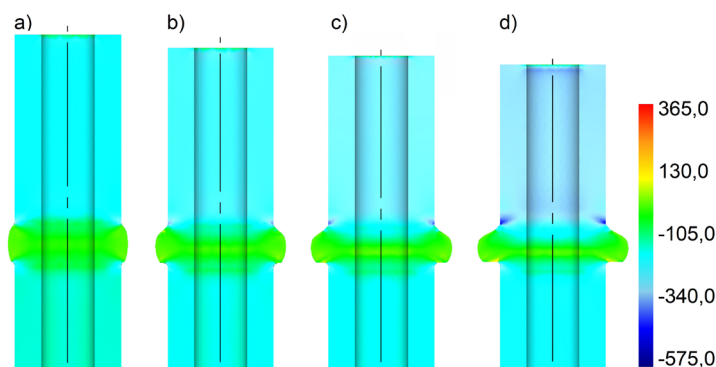
Przykładowy rozkład wartości intensywności odkształcenia na grubości ścianki odkuwek został przedstawiony na rycinie 5.53. Przedstawiono go w funkcji względnej grubości ścianki g_w , którą zdefiniowano następującym wzorem:

$$g_w = \frac{g_i}{g_{max}} \cdot 100\% , \quad (5.3)$$

gdzie: g_i – grubość ścianki odkuwki w i -tym punkcie pomiarowym (zob. ryc. 5.52a), g_{max} – maksymalna grubość ścianki odkuwki (zob. ryc. 5.52a).

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rycinie 5.52a wartości analizowanego parametru pobrano w kierunku promieniowym na płaszczyźnie oddalonej od pojemnika dolnego o 10 mm. We wszystkich przypadkach omawiane rozkłady są pod względem jakościowym podobne: dla początkowych wartości względnej grubości ścianki g_w odkuwki widoczny jest niewielki wzrost wartości

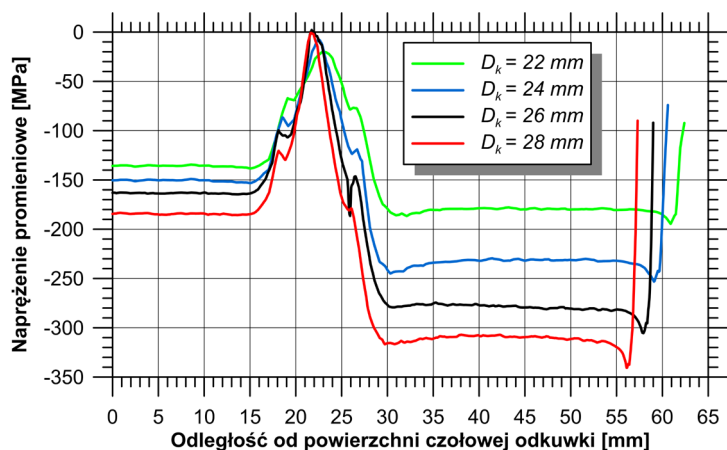
intensywności odkształcenia, z kolei dla względnej grubości ścianki g_w wynoszącej powyżej 30–50% przyrost wartości intensywności odkształcenia jest znaczący. Pod względem ilościowym należy stwierdzić, że im większa jest średnica otworu kalibrującego matrycy D_k , tym większa jest wartość intensywności odkształcenia, niezależnie od wartości względnej grubości ścianki. Jeśli mowa o wartościach na zewnętrznej powierzchni stopnia odkuwki ($g_w = 100\%$), to widoczne jest, że dla parametru $D_k = 28$ mm intensywność odkształcenia jest o ok. 45% większa niż dla $D_k = 22$ mm. Ponadto rozbieżność ta jest zbliżona w całym zakresie wartości względnej grubości ścianki g_w .



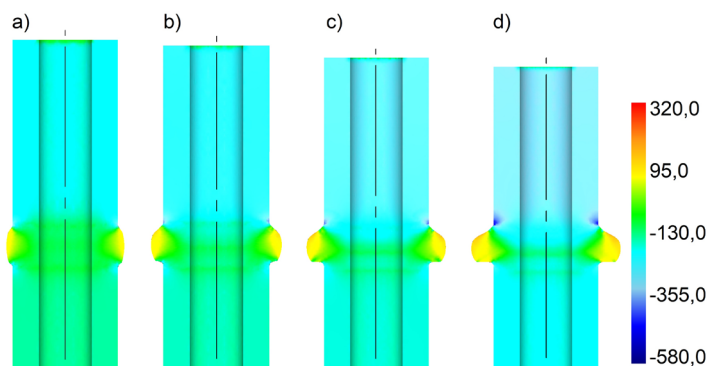
Ryc. 5.54. Rozkład naprężenia promieniowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w początkowej fazie spęczania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm

Rozkład naprężenia promieniowego w przekroju osiowym odkuwek w początkowej fazie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu widoczny jest na rycinie 5.54. Odkuwki przedstawiono tuż przed pojawieniem się kontaktu odkształcanego materiału z wykrojem matrycy. Na tym etapie procesu rozkłady naprężenia promieniowego w wyrobach są zbliżone pod względem jakościowym, należy jednak nadmienić, że wraz ze wzrostem wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k zarówno w strefie odkuwki znajdującej się w wykroju pojemnika górnego, jak i pojemnika dolnego, występują coraz większe (w stosunku do wartości bezwzględnej) naprężenia promieniowe o charakterze ściskającym. Z kolei w strefie zewnętrznej spęczanego stopnia (która na tym etapie procesu nie kontaktuje się z narzędziami) wartości naprężenia promieniowego są bliskie zera.

Rozpatrując wartości omawianego parametru na powierzchni otworu odkuwek w funkcji odległości od ich powierzchni czołowej znajdującej się od strony wyrzutnika, należy zwrócić uwagę na pewną zależność (ryc. 5.55).



Ryc. 5.55. Rozkład naprężenia promieniowego na powierzchni otworu odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w początkowej fazie spęczniania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

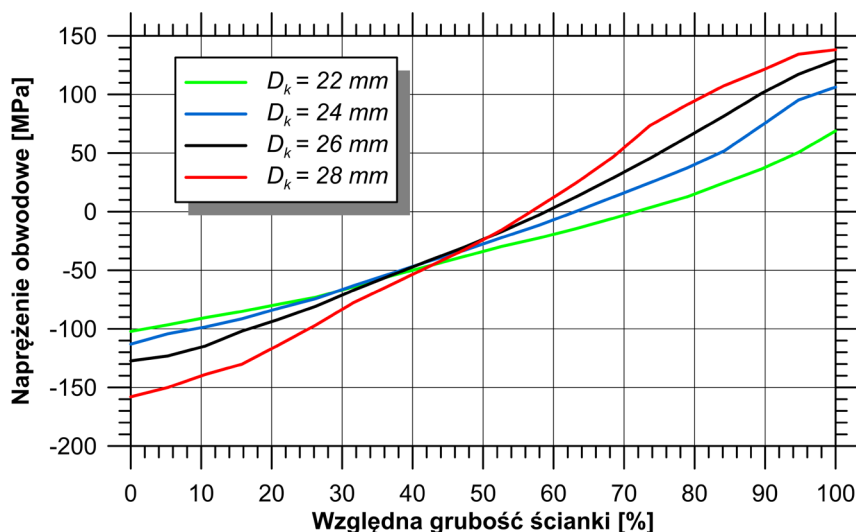


Ryc. 5.56. Rozkład naprężenia obwodowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w początkowej fazie spęczniania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm

W strefie wyrobu w pobliżu spęczanego stopnia – w odległości ok. 17–30 mm od powierzchni czołowej odkuwki – widoczna jest zmiana przebiegu wartości naprężenia promieniowego. Materiał nie jest tam ograniczony ściankami wykoju, a dodatkowo można zaobserwować, że lokalne maksymalne wartości występują dla odległości równej 22–23 mm, czyli do połowy wysokości matrycy. Naprężenia ściskające w tej strefie (widoczne dla $D_k = 22$ oraz 24 mm) oznaczają, że materiał kontaktuje się z powierzchnią trzpienia, z kolei naprężenia promieniowe o wartości zbliżonej do zera (widoczne dla $D_k = 26$ oraz 28 mm) świadczą o znikomym lub utraconym kontakcie z trzpieniem. Wyniki te są

zgodne z rezultatami badań wstępnych przedstawionych w rozdziale 4.4, z których wynika, że w początkowym etapie procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu może dojść do utraty kontaktu wsadu z trzpieniem, a przy nieodpowiednio dobranych parametrach nawet do wyboczenia ścianki i zakucia.

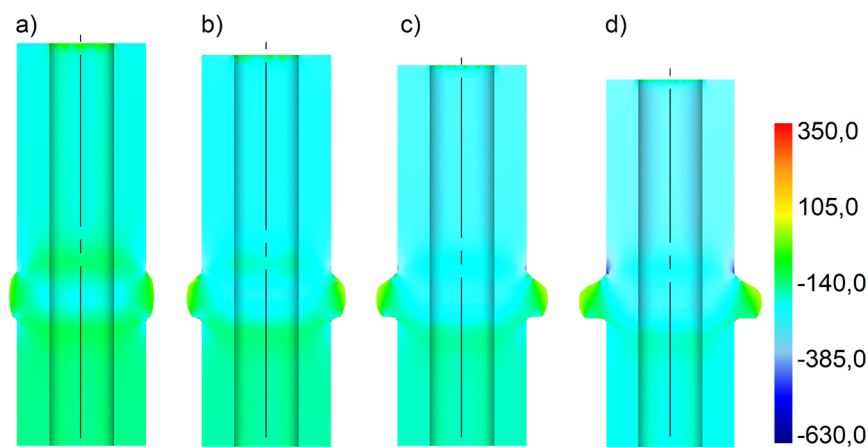
Rozkład naprężenia obwodowego w przekroju osiowym odkuwek w początkowej fazie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przedstawiono na rycinie 5.56. Także i tym razem – podobnie jak w wypadku rozkładu naprężenia promieniowego – zobrazowano moment, w którym materiał znajduje się tuż przed kontaktem z wykrojem matrycy. Można zaobserwować, że wartości naprężenia obwodowego w strefie kształtowanego stopnia są zróżnicowane na grubości ścianki, podczas gdy w strefie odkuwki znajdującej się w pojemniku górnym i pojemniku dolnym wartości te są bardziej zbliżone do siebie. W przypadku części wyrobu pozostającej w wykroju pojemnika górnego występują ściskające naprężenia obwodowe o wartości ok. -180 MPa, -230 MPa, -280 MPa i -310 MPa dla średnicy otworu kalibrującego matrycy wynoszącej odpowiednio $D_k = 22$ mm, 24 mm, 26 mm i 28 mm. Natomiast dla fragmentu wyrobu znajdującego się w pojemniku dolnym naprężenia te wynoszą ok. -130 MPa, -150 MPa, -160 MPa oraz -180 MPa dla średnicy otworu kalibrującego matrycy wynoszącej odpowiednio $D_k = 22$ mm, 24 mm, 26 mm i 28 mm. Z kolei rozkład naprężenia obwodowego na grubości ścianki w strefie spęczanego stopnia przedstawiono na rycinie 5.57.



Ryc. 5.57. Rozkład naprężenia obwodowego na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w początkowej fazie spęczania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

Wartości analizowanego parametru pobrano w kierunku promieniowym znajdującym się w płaszczyźnie oddalonej od pojemnika dolnego o 3 mm, czyli w połowie wysokości matrycy; względną grubość g_w ścianki wyznaczono zgodnie z zależnością (5.3). Uzyskane wyniki wskazują, iż na powierzchni otworu odkuwki ($g_w = 0\%$) występują ściskające naprężenia obwodowe, zaś na powierzchni zewnętrznej ($g_w = 100\%$) naprężenia te są rozciągające. Ponadto wraz ze wzrostem średnicy D_k otworu kalibrującego matrycy ww. naprężenia rozciągające osiągają coraz większe wartości, podobnie jak naprężenia ściskające (w odniesieniu do ich wartości bezwzględnej).

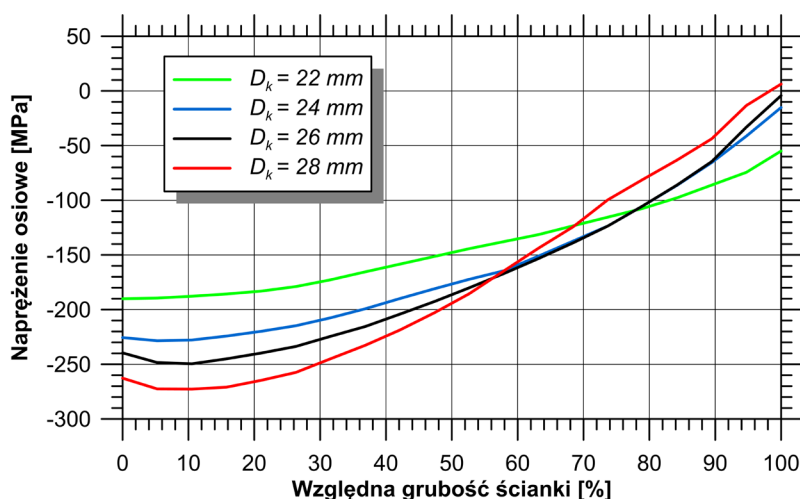
Mając powyższe na uwadze można stwierdzić, że w początkowej fazie spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu istnieje korelacja pomiędzy średnicą D_k otworu kalibrującego matrycy, a rozkładem naprężenia obwodowego w odkuwce drążonej.



Ryc. 5.58. Rozkład naprężenia osiowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w początkowej fazie spęczniania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm

Rozkład naprężenia w kierunku osiowym dla odkuwki w początkowym etapie kształtowania przedstawiono na rycinie 5.58. Podobnie jak w przypadku naprężenia promieniowego i obwodowego w początkowej fazie spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu w odkuwce drążonej można wyróżnić trzy obszary. Są to fragmenty wyrobu znajdujące się w pojemniku dolnym, na wysokości matrycy oraz w pojemniku górnym. Analogicznie do wcześniej opisanych rozkładów naprężenia osiowe mają zbliżone wartości w strefach odkuwki znajdujących się w pojemnikach, podczas gdy w strefie spęczanego

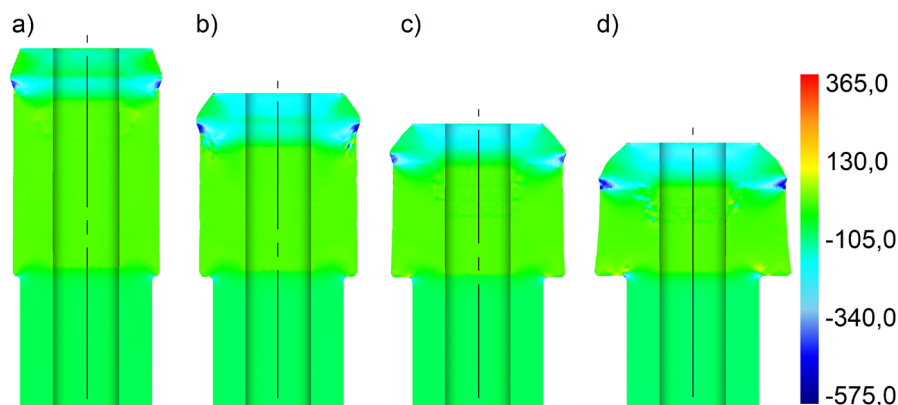
stopnia są zróżnicowane na grubości ścianki. Istnieje również korelacja pomiędzy wartościami naprężenia osiowego a średnicą D_k otworu kalibrującego matrycy. Wraz ze wzrostem średnicy D_k we fragmentach odkuwki znajdujących się w pojemnikach rosną wartości ściskającego je naprężenia osiowego (w odniesieniu do ich wartości bezwzględnej). Naprężenia te w strefie wyrobu znajdującej się w pojemniku górnym wynoszą ok.: -180 MPa, -230 MPa, -280 MPa, -310 MPa, natomiast w strefie znajdującej się w pojemniku dolnym są równe ok.: -135 MPa, -150 MPa, -160 MPa, -180 MPa odpowiednio dla średnicy $D_k = 22$ mm, 24 mm, 26 mm, 28 mm. Należy również nadmienić, że w górnej części odkuwki naprężenia przyjmują większe wartości bezwzględne niż w jej dolnym fragmencie. Jest to związane z tym, że spęczany stopień wywiera nacisk na czołową powierzchnię pojemnika dolnego, co odciąża wyrzutnik i przekłada się na spadek wartości bezwzględnych naprężenia w dolnej strefie odkuwki.



Ryc. 5.59. Rozkład naprężenia osiowego na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w początkowej fazie spęczania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

Rozkład naprężenia osiowego na grubości ścianki kształtowanego stopnia przedstawiono na rycinie 5.59. Wartości badanego parametru odczytano analogicznie do powyżej opisanych przypadków, tzn. w kierunku promieniowym na płaszczyźnie oddalonej od pojemnika dolnego o 3 mm (w połowie wysokości matrycy; względną grubość ścianki wyznaczono zgodnie z zależnością (5.3)). Największe wartości bezwzględne ściskającego naprężenia osiowego zlokalizowane są przy powierzchni otworu odkuwki i maleją w miarę oddalania się od osi symetrii wyrobu. W odniesieniu do wartości bezwzględnych naprężenia występującego

na powierzchni otworu odkuwki zaobserwować można korelację dodatnią ze średnicą D_k otworu kalibrującego matrycy, z kolei na powierzchni zewnętrznej stopnia jest ona ujemna. W dalszej części analizy zostanie omówiony stan naprężenia występujący w odkuwce na końcowym etapie kształtowania, w momencie zatrzymania się stempla, matrycy i pojemnika górnego (zob. ryc. 5.51d).

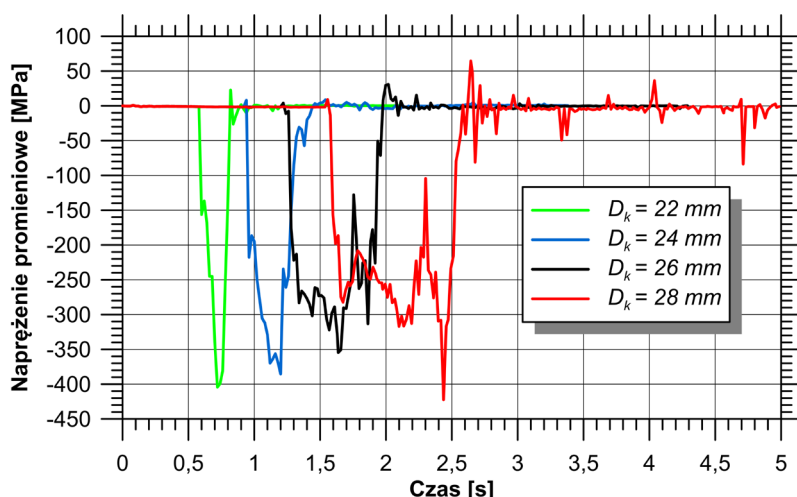


Ryc. 5.60. Rozkład naprężenia promieniowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w końcowej fazie spęczania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm

Na rycinie 5.60 przedstawiono rozkład naprężenia promieniowego w przekroju osiowym odkuwek w końcowej fazie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Rozkład i wartości parametru są zbliżone we wszystkich analizowanych przypadkach. W strefie odkuwki znajdującej się w pojemniku dolnym występują ściskające naprężenia promieniowe o wartości ok. -80 MPa, natomiast w strefie stopnia znajdującej się pomiędzy pojemnikiem dolnym a matrycą wartości te zbliżone są do zera. Z kolei w części odkuwki pozostającej w matrycy – zwłaszcza w jej stożkowej strefie – występują naprężenia ściskające o stosunkowo dużych wartościach sięgających do ok. -300 MPa, a lokalnie w pojedynczych węzłach siatki elementów skończonych nawet do -575 MPa.

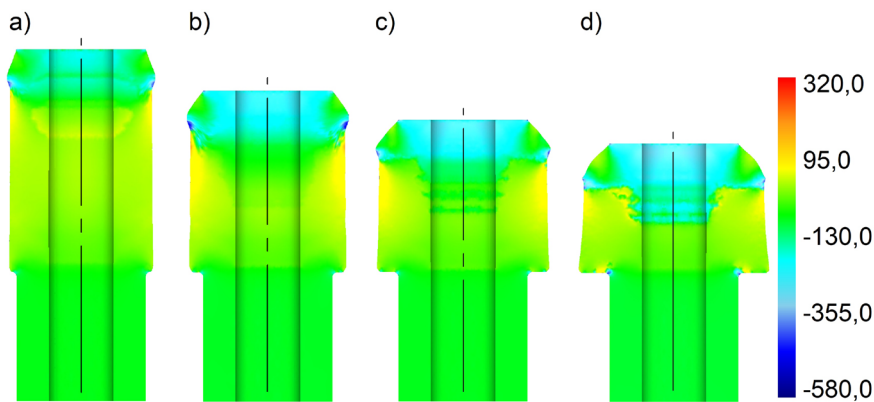
Poza rozkładem naprężenia na końcowym etapie kształtowania odkuwki istotny jest również przebieg zmian wartości naprężenia w trakcie trwania procesu. Z tego względu na rycinie 5.61 przedstawiono rozkład naprężenia promieniowego w funkcji czasu w wybranym punkcie na powierzchni bocznej odkuwek. Wytypowano punkt, który przed rozpoczęciem spęczania znajdował się na powierzchni bocznej wsadu w odległości 5 mm (równej grubości ścianki wsadu) powyżej pojemnika dolnego. W trakcie kształtowania punkt ten przemieszczał się

wraz z odkształcanym materiałem, by ostatecznie znaleźć się w pobliżu dolnej czołowej powierzchni spęczanego stopnia (w odległości nie większej niż 5 mm). Rozpatrywano czas do momentu jednoczesnego zatrzymania ruchu stempla, matrycy i pojemnika górnego. Z przedstawionych wykresów jednoznacznie wynika, że w badanym punkcie – reprezentującym powierzchnię boczną kształtowanego stopnia – naprężenia promieniowe pozostają niemal zerowe przez większość czasu spęczania. Chwilowe naprężenia ściskające o dość dużych wartościach bezwzględnych występują wówczas, gdy badany punkt kontaktuje się z wykojem matrycy. Po utracie styku (wynikającej ze specyfiki spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu) powierzchni bocznej stopnia nie ograniczają ścianki wykroju, wartości naprężenia promieniowego są zatem zerowe.

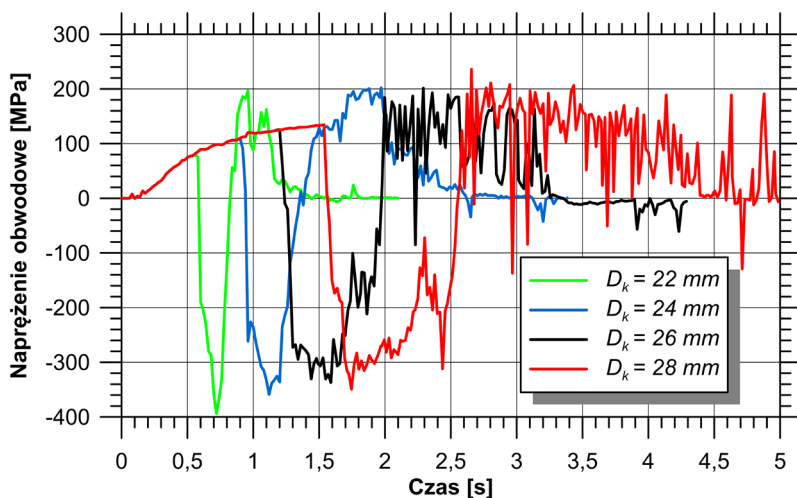


Ryc. 5.61. Rozkład naprężenia promieniowego w funkcji czasu w wybranym punkcie na powierzchni bocznej odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) spęczanych z zastosowaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

Przedstawiony na rycinie 5.62 rozkład naprężenia obwodowego dla odkuwek w końcowej fazie spęczania jest zbliżony dla każdej rozpatrywanej wartości średnicy D_k otworu kalibrującego matrycy. W strefie wyrobu znajdującej się w wykroju pojemnika dolnego występują ściskające naprężenia obwodowe o wartości ok. -80 MPa. Część stopnia pomiędzy pojemnikiem dolnym a matrycą podlega obwodowemu rozciąganiu o wartości ok. 20 MPa w środku grubości ścianki, z kolei w materiale znajdującym się w strefie matrycy występuje ściskające naprężenie obwodowe o wartości ok. -100 do -150 MPa.



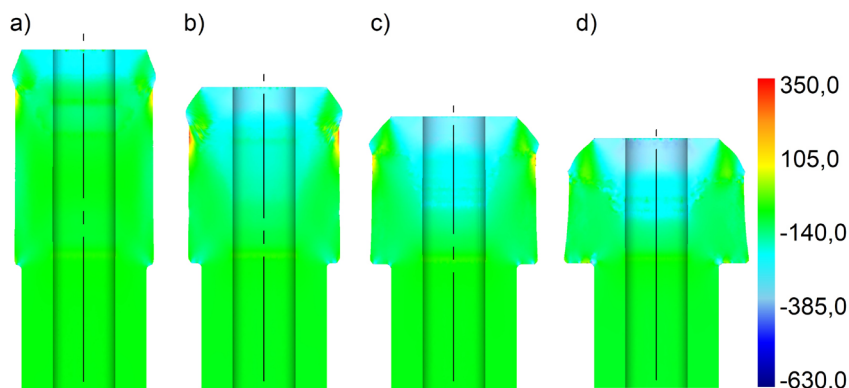
Ryc. 5.62. Rozkład naprężenia obwodowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20\text{ mm}$, $g = 5\text{ mm}$) w końcowej fazie spęczania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm



Ryc. 5.63. Rozkład naprężenia obwodowego w funkcji czasu w wybranym punkcie na powierzchni bocznej odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20\text{ mm}$, $g = 5\text{ mm}$), spęczanych z zastosowaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

Podobnie jak w przypadku rozkładu naprężenia promieniowego, dokonano analizy przebiegu zmienności naprężenia obwodowego w funkcji czasu dla wybranego punktu na zewnętrznej powierzchni spęczanego stopnia. Do badań przyjęto ten sam punkt, który rozpatrywano w przypadku powyżej opisanego rozkładu naprężenia promieniowego. Z przebiegów zmienności wartości naprężenia przedstawionego na rycinie 5.63 można zaobserwować, że lokalne

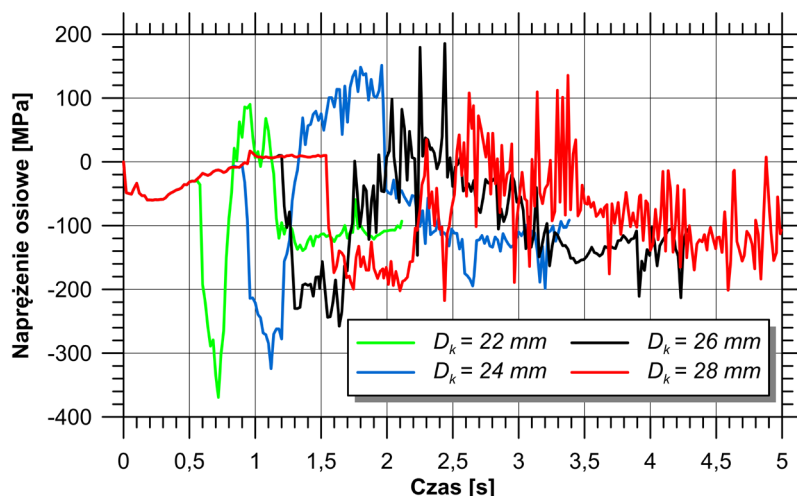
maksymalne obwodowe naprężenia ściskające (w odniesieniu do wartości bezwzględnej) występują w momencie, gdy materiał kształtowany jest w matrycy. Od momentu, gdy znajduje się poza nią – tzn. pomiędzy matrycą a pojemnikiem dolnym – naprężenia obwodowe w punkcie pomiarowym (reprezentującym powierzchnię boczną stopnia) stają się rozciągające. Wraz z postępem procesu można zaobserwować, że dla mniejszych średnic otworu kalibrującego matrycy ($D_k = 22$ i 24 mm) naprężenia te stosunkowo szybko przyjmują wartości zerowe, z kolei dla większych średnic otworu kalibrującego matrycy ($D_k = 26$ i 28 mm) stan obwodowego naprężania rozciągającego utrzymuje się przez dłuższy czas, zaś jego wartości są większe dla większej wartości parametru D_k . Należy nadmienić, że jeśli chodzi o uzyskanie średnicy stopnia równej średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k obwodowe naprężenia rozciągające w strefie odkuwki znajdującej się pomiędzy pojemnikiem dolnym a matrycą są niekorzystne, gdyż przyczyniają się do niezamierzonego wzrostu średnicy spęczanego stopnia.



Ryc. 5.64. Rozkład naprężenia osiowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) w końcowej fazie spęczania dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy D_k : a) 22 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 28 mm

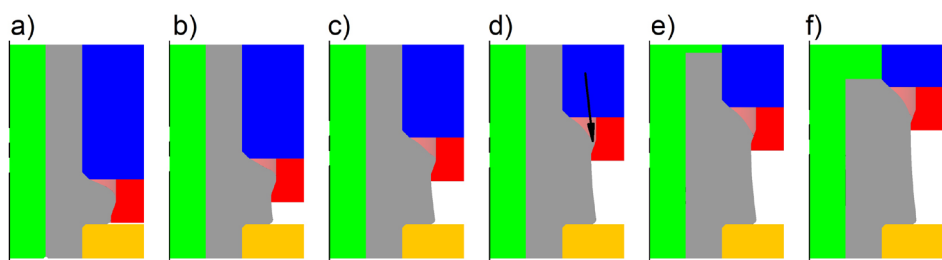
Analizując rozkład naprężenia w kierunku osiowym w końcowej fazie procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, można zauważyć, że jest on zbliżony dla wszystkich badanych wartości średnic D_k otworu kalibrującego matrycy (ryc. 5.64). W strefie odkuwki znajdującej się w pojemniku dolnym występują naprężenia ściskające o wartości ok. -80 MPa. Z kolei w części wyrobu znajdującej się pomiędzy matrycą, a pojemnikiem dolnym naprężenia (w środku grubości ścianki) rosną (w odniesieniu do wartości bezwzględnych) wraz ze wzrostem średnicy D_k w zakresie od -80 do -120 MPa. Niemniej jednak wartości

maksymalne (w odniesieniu do wartości bezwzględnych) obserwuje się w strefie odkuwki pozostającej w matrycy. W pobliżu otworu wyrobu naprężenia osiowe wynoszą ok. -215 MPa, -300 MPa, -320 MPa, -340 MPa odpowiednio dla średnicy otworu kalibrującego matrycy równej $D_k = 22$ mm, 24 mm, 26 mm, 28 mm.



Ryc. 5.65. Rozkład naprężenia osiowego w funkcji czasu w wybranym punkcie na powierzchni bocznej odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm), spęczanych z zastosowaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$

Rozpatrywanie przebiegu zmienności naprężenia osiowego na powierzchni bocznej stopnia (ryc. 5.65) w sposób analogiczny do przedstawionego wcześniej naprężenia promieniowego i obwodowego, pozwala wysnuć pewne wnioski. Można zauważyć, że największe (w odniesieniu do wartości bezwzględnych) naprężenia ściskające występują w momencie, gdy sensor przechodzi przez matrycę; wraz ze wzrostem średnicy otworu kalibrującego matrycy naprężenia rosną – wartości zmierzają ku zeru. Przemieszczanie się matrycy oraz zawartej w niej strefy stożkowej powoduje, że materiał opuszczający otwór kalibrujący matrycy jest chwilowo rozciągany osiowo na powierzchni zewnętrznej. Następnie wraz z postępem procesu naprężenia zmieniają znak na ujemny i w tej postaci utrzymują się do momentu jednoczesnego zakończenia ruchu matrycy, pojemnika górnego i stempla. Należy zwrócić uwagę, że ściskające naprężenia osiowe w końcowej fazie procesu rosną (w stosunku do wartości bezwzględnych) wraz ze wzrostem średnicy otworu kalibrującego matrycy.



Ryc. 5.66. Etapy powstawania niezamierzonego wzrostu średnicy kołnierza na przykładzie odkuwki kształtowanej ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) z zastosowaniem kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 28$ mm; opis w tekście

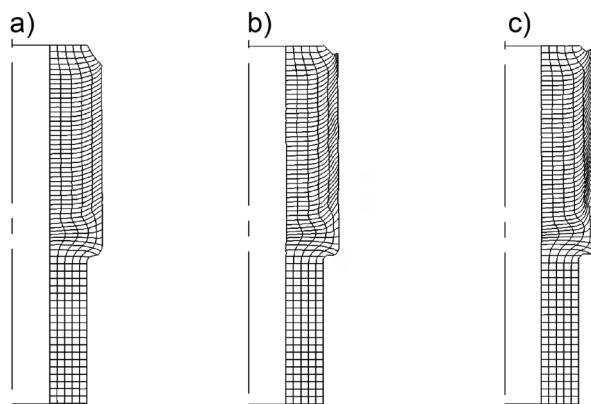
Średnica D_k otworu kalibrującego matrycy wywiera wpływ nie tylko na stan odkształcenia i naprężenia odkuwek, ale również na ich geometrię. Jak wynika z kształtu przekroju osiowego odkuwek – przedstawionego na wcześniejszych rysunkach obrazujących rozkłady odkształcenia i naprężenia – przy większych wartościach parametru D_k dochodzi do niezamierzonego wzrostu średnicy spęczanego stopnia. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w wypadku zastosowania matrycy posiadającej średnicę otworu kalibrującego $D_k = 28$ mm w strefie stopnia znajdującej się w pobliżu pojemnika dolnego i zachodzi niemalże od samego momentu wprowadzenia w ruch matrycy i pojemnika górnego (ryc. 5.66b–f). W rezultacie spada objętość materiału znajdującego się w strefie matrycy (która powinna być stała w trakcie jednoczesnego ruchu matrycy, stempla i pojemnika górnego). Wzrost średnicy otworu kalibrującego matrycy (który jak wcześniej wykazano) skutkuje wzrostem zarówno obwodowego naprężenia rozciągającego, jak i ściskającego naprężenia osiowego (w odniesieniu do wartości bezwzględnych), które występują w kształtowanym stopniu w strefie pomiędzy matrycą a pojemnikiem dolnym. W konsekwencji taki stan naprężenia sprzyja wzrostowi średnicy wytwarzanego stopnia.

Następstwem ww. zjawiska ograniczającego jest powstawanie zakucia na powierzchni bocznej stopnia. Wskutek zmniejszającej się objętości materiału znajdującego się w strefie matrycy dochodzi do utraty kontaktu wsadu z walcową częścią jej wykroju (o większej średnicy; zob. ryc. 5.50 – powierzchnia wykroju o średnicy D_p). Od tego etapu procesu – w miejscu oznaczonym strzałką na rycinie 5.66d – rozpoczyna się proces powstawania zakucia. Stożkowa powierzchnia wykroju matrycy hamuje płynięcie osiowe materiału w warstwach przypowierzchniowych, a brak kontaktu materiału z otworem matrycy o średnicy D_p przyczynia się do zmniejszenia udziału promienio-ego płynięcia materiału w środkowych (w odniesieniu do grubości ścianki)

warstwach. Powyższe czynniki sprawiają, że dochodzi do swego rodzaju fałdowania materiału, które to skutkuje zakuciem. Opisane zjawisko powstaje przy zastosowaniu średnicy otworu kalibrującego matrycy wynoszącej $D_k = 28$ mm, co w omawianym kontekście jest wartością graniczną.

5.2.2.2. Wpływ wartości redukcji przekroju poprzecznego materiału na przebieg procesu

Badania dotyczące analizy wpływu wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu drążonego na przebieg procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmien- nym położeniu zrealizowano dla rury o średnicy zewnętrznej $D = 20$ mm i gru- bości ścianki $g = 5$ mm. Zastosowano matrycę o średnicy otworu kalibrującego równej $D_k = 24$ mm i kącie pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$. Przyjęto trzy wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu: $\delta_r = 5\%$, 10% , 15% .

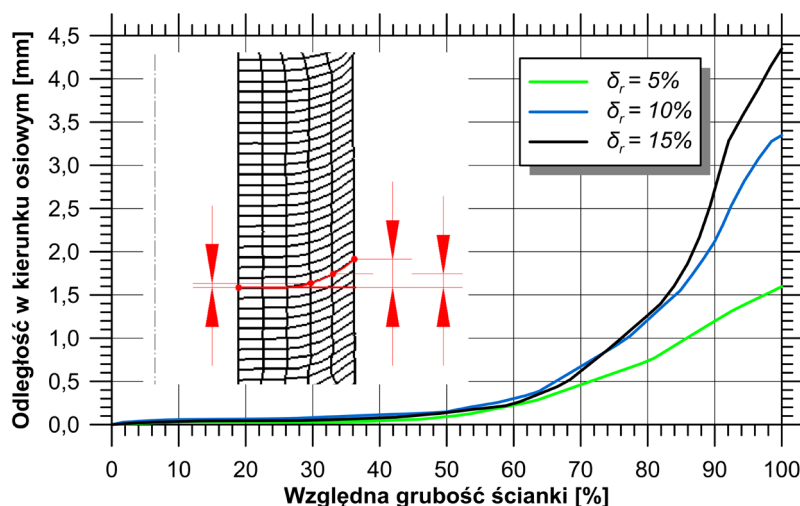


Ryc. 5.67. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_r : a) 5%, b) 10%, c) 15%

Dla analizowanych przypadków na rycinie 5.67 przedstawiono widok siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym odkuwek. W dolnej strefie wyrobu, znajdującej się podczas spęczania w wykroju pojemnika dolnego, linie siatki nie zmieniają swojego położenia, co jest typowe dla badanej technologii. W strefie kształtowanego stopnia zwiększyły wzajemną odległość w kierunku promieniowym, natomiast w kierunku osiowym – zmniejszyły (w odniesieniu do usytuowania przed rozpoczęciem procesu). Ponadto na przeważającej długości stopnia pionowe linie siatki są równoległe do zarysu zewnętrznego odkuwki.

Odchylenie linii siatki od pionu daje się dostrzec tylko w dolnej jego części – kształtowanej, gdy nie przemieszczają się ani matryca, ani pojemnik górny. Wynika to z intensywnego płynięcia materiału w kierunku promieniowym we wspomnianej fazie procesu. Wraz ze wzrostem wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu w warstwach przypowierzchniowych stopnia widać również, jak linie siatki coraz bardziej odchylają się w kierunku stempla, tj. ku górze odkuwki.

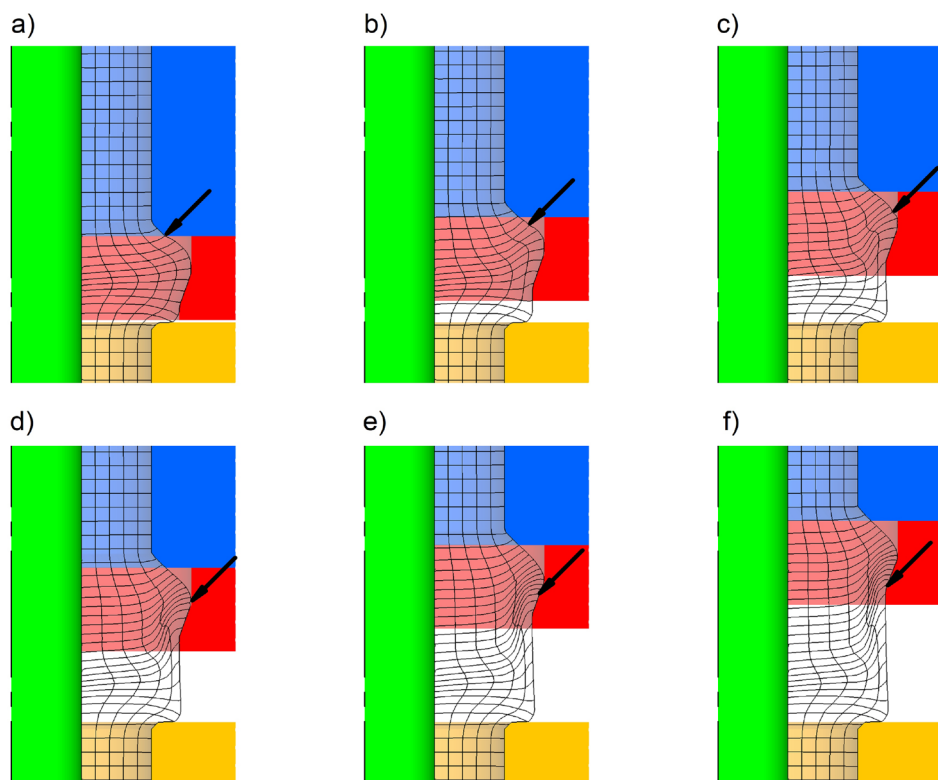
W celu analizy tego zjawiska na grubości ścianki wsadu zdefiniowano 50 równomiernie oddalonych od siebie punktów pomiarowych (sensorów), przy czym pierwszy znajdował się na powierzchni otworu wsadu, a ostatni – na powierzchni zewnętrznej odkształcanej rury. Odległość sensorów od dolnej powierzchni czołowej wsadu (kontaktującej się z wyrzutnikiem) była taka sama i wynosiła 45,5 mm, przed rozpoczęciem procesu spęczniania punkty pomiarowe znajdowały się zatem w płaszczyźnie oddalonej (w kierunku stempla) od górnej powierzchni matrycy o odległość równą połowie długości fragmentu wsadu wewnątrz wykroju pojemnika górnego.



Ryc. 5.68. Odległość punktów pomiarowych w kierunku osiowym w funkcji grubości ścianki dla odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) przy zastosowaniu kąta pochyleń strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm

Na rycinie 5.68 przedstawiono odległość wszystkich sensorów (od sensora pierwszego) mierzoną w kierunku osiowym po zakończeniu procesu spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Do wartości względnej grubości

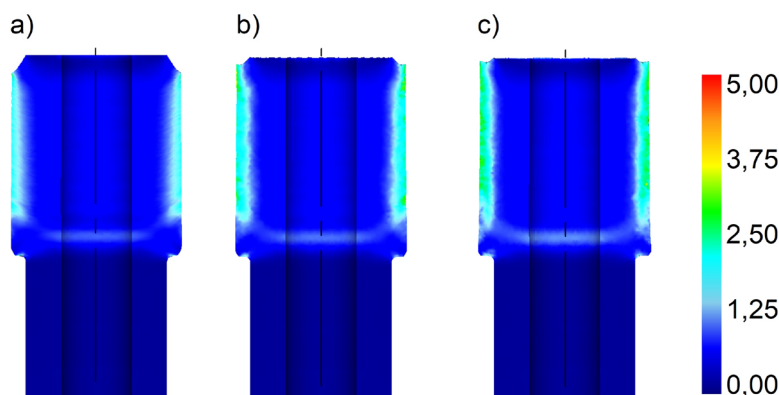
ścianki (zob. wzór (5.3)) wynoszącej ok. 60% nie obserwuje się znaczącego wpływu wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu na wzajemną odległość ww. punktów pomiarowych, która obrazuje układ poziomych linii siatki koordynacyjnej odkuwki. Z kolei im bliżej powierzchni zewnętrznej stopnia, tym omawiana odległość sensorów w kierunku osiowym jest coraz większa, wykazuje też korelację dodatnią z wartością redukcji (δ_r) przekroju poprzecznego wsadu. Odległość na zewnętrznej powierzchni stopnia dla $\delta_r = 15\%$ jest ponad dwuipółkrotnie większa niż dla $\delta_r = 5\%$.



Ryc. 5.69. Siatka koordynacyjna w przekroju osiowym odkuwki uzyskanej ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 15\%$

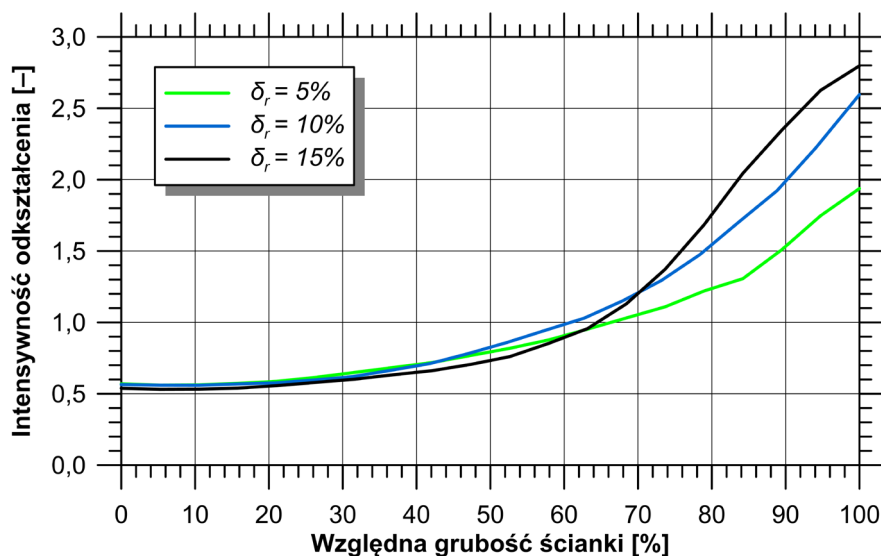
Analiza układu siatki koordynacyjnej w trakcie trwania procesu wykazała, że przy zastosowaniu redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 15\%$ na powierzchni zewnętrznej spęczanego stopnia może dojść do niewielkiego zakucia. Zlokalizowane jest ono w strefie materiału, która tuż po wprowadzeniu w ruch matrycy kontaktuje

się z dolną krawędzią pojemnika górnego (szczegół oznaczony na rys. 5.69a). W bliskim sąsiedztwie tej krawędzi materiał od góry kontaktuje się z pojemnikiem górnym natomiast od dołu nie jest ograniczony wykojem. W związku z tym jest to strefa zmiany krzywizny zarysu zewnętrznego odkuwki. Wraz ze stopniem zaawansowania procesu (rys. 5.69b÷f) w tym obszarze dochodzi do zjawiska fałdowania, po czym w strefie stożkowej wykroju matrycy oraz w jej otworze kalibrującym tworzy się zakucie materiału.

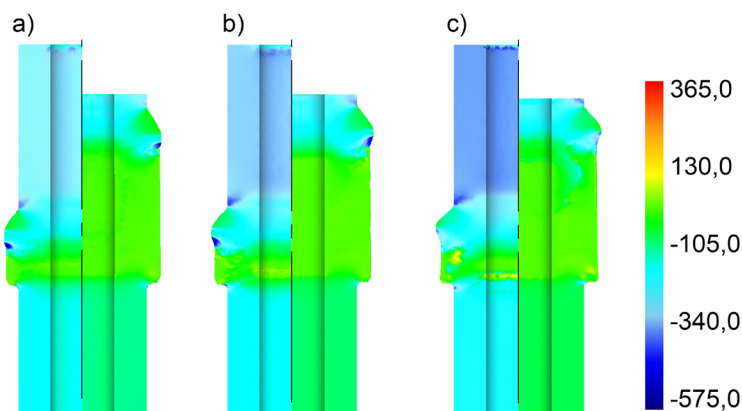


Ryc. 5.70. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_r : a) 5%, b) 10%, c) 15%

Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym odkuwek został przedstawiony na rycinie 5.70. Jest on zgodny z układem siatki koordynacyjnej. Największe wartości odkształcenia zlokalizowane są w warstwach przypowierzchniowych spęczanego stopnia. Wzrost wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu powoduje, że wartości maksymalne intensywności odkształcenia są coraz większe. Szczegółowo zostało to przedstawione na rycinie 5.71 przedstawiającym rozkład intensywności odkształcenia na grubości ścianki odkuwek w odległości 10 mm od dolnej czołowej powierzchni spęczzonego stopnia. Analogicznie do układu siatki koordynacyjnej dla względnej grubości ścianki nie przekraczającej ok. 60% nie obserwuje się znaczącego wpływu wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu na rozkład intensywności odkształcenia. Dopiero w warstwach przypowierzchniowych widoczna jest korelacja dodatnia ww. parametru technologicznego procesu z wartością intensywności odkształcenia.



Ryc. 5.71. Rozkład intensywności odkształcenia na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm

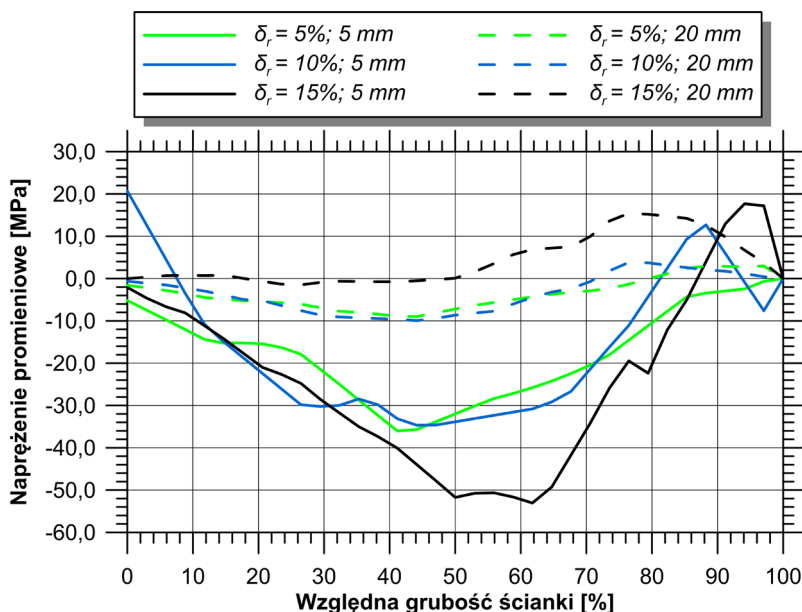


Ryc. 5.72. Rozkład naprężenia promieniowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek (na różnych etapach procesu) uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_r : a) 5%, b) 10%, c) 15%

W dalszej części rozdziału przedstawione zostaną rozkłady naprężenia promieniowego, obwodowego i osiowego w przekroju osiowym odkuwek w różnym stopniu zaawansowania procesu (ryc. 5.72, 5.74, 5.76). Wytypowano początkową i końcową fazę zasadniczego etapu procesu, kiedy to jednocześnie przemieszczają się stempel, matryca i pojemnik górny. W związku z powyższym przedstawiono

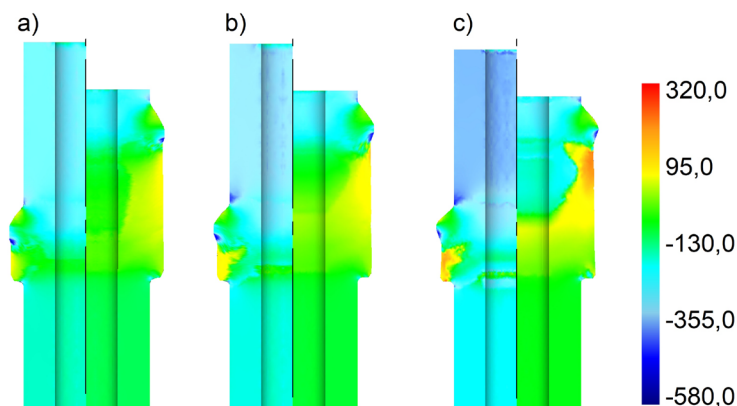
odkuwki w momencie, w którym przemieszczenie matrycy i pojemnika górnego wynosi 5 oraz 20 mm. Dodatkowo przeanalizowane zostaną przebiegi zmienności ww. parametrów na grubości ścianki odkuwki wyznaczone w kierunku promieniowym znajdującym się w odległości 2,5 mm (w połowie grubości ścianki wsadu) od dolnej czołowej powierzchni kształtowanego stopnia (ryc. 5.73, 5.75, 5.77).

Na podstawie przedstawionego na rycinie 5.72 rozkładu naprężenia promieniowego można stwierdzić, że w początkowej fazie procesu we fragmencie odkuwki znajdującym się w wykroju pojemnika górnego występują naprężenia promieniowe ściskające o wartości ok. -290 MPa, -320 MPa oraz -350 MPa odpowiednio dla redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 5\%$, 10% i 15%. W końcowej fazie procesu naprężenia te również mają charakter ściskający i wynoszą kolejno ok. -260 MPa, -280 MPa oraz -290 MPa. Na podstawie przebiegu zmienności naprężenia promieniowego na grubości ścianki stopnia (ryc. 5.73) można stwierdzić, że w początkowej fazie spęczania – przy przemieszczeniu matrycy i pojemnika górnego wynoszącym 5 mm – ściskające naprężenia promieniowe w wewnętrznych strefach stopnia (dla względnej grubości ścianki w zakresie ok. 20–80%) są znacznie wyższe (w odniesieniu do wartości bezwzględnych) niż w końcowej fazie spęczania (dla przemieszczenia matrycy i pojemnika górnego wynoszącego 20 mm).



Ryc. 5.73. Rozkład naprężenia promieniowego (na różnych etapach procesu) na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm

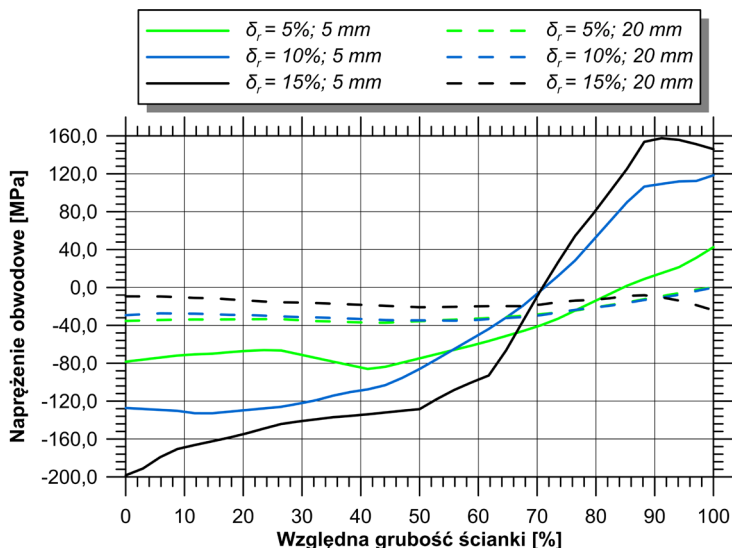
Powyżej omówiony rozkład naprężenia promieniowego wskazuje, że wartości bezwzględne analizowanego parametru w końcowej fazie spęczania są w wymienionych strefach odkuwki niższe od tych występujących na początkowym etapie procesu. Jest to spowodowane tym, iż w początkowej fazie spęczania ma miejsce otwieranie się wykroju i zwiększanie jego swobodnej strefy znajdującej się pomiędzy matrycą a pojemnikiem dolnym. W związku z powyższym wraz ze stopniem zaawansowania procesu odkształcany materiał jest w coraz mniejszym stopniu ograniczany ściankami wykroju. Sprzyja to zarówno spadkowi wartości bezwzględnych naprężenia promieniowego, jak również niezamierzonemu wzrostowi średnicy zewnętrznej spęczanego stopnia. Jeśli w powyższym kontekście mowa o wpływie wartości redukcji δ_r przekroju poprzecznego wsadu, to można zauważyć, że w strefie odkuwki znajdującej się w wykroju pojemnika górnego wartości bezwzględne naprężenia promieniowego rosną wraz ze wzrostem wartości parametru δ_r .



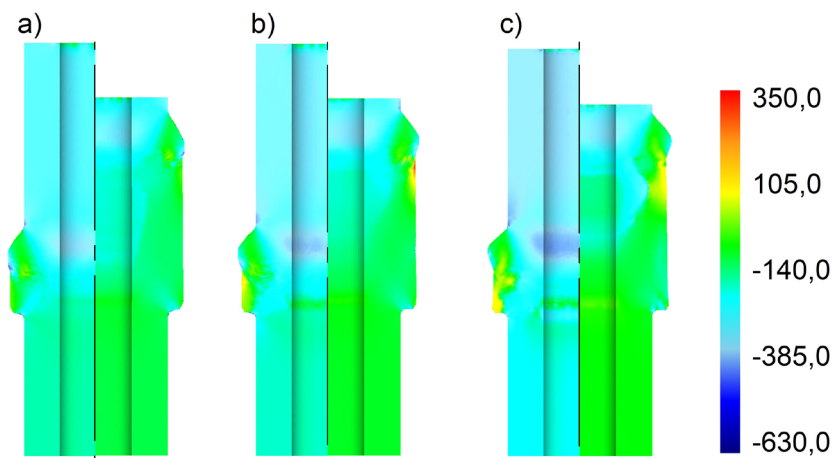
Ryc. 5.74. Rozkład naprężenia obwodowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek (na różnych etapach procesu) uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_r : a) 5%, b) 10%, c) 15%

Na rycinie 5.74 przedstawiono rozkład naprężenia obwodowego w przekroju osiowym odkuwek na wybranych etapach procesu. W strefie materiału znajdującej się w wykroju pojemnika górnego w początkowej fazie spęczania występują naprężenia ściskające o wartości ok. -290 MPa, -320 MPa oraz -350 MPa kolejno dla redukcji przekroju poprzecznego wsadu $\delta_r = 5\%$, 10% i 15% . Natomiast w końcowej fazie spęczania naprężenia te są równe odpowiednio ok. -260 MPa, -270 MPa oraz -280 MPa. Z uwagi na to wraz ze stopniem zaawansowania procesu maleją wartości bezwzględne naprężenia obwodowego w ww. strefie odkuwki, analogicznie do

przypadku naprężenia promieniowego, a ponadto obserwuje się w tej strefie korelację dodatnią parametru δ_r z wartościami bezwzględnymi naprężenia obwodowego.



Ryc. 5.75. Rozkład naprężenia obwodowego (na różnych etapach procesu) na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm



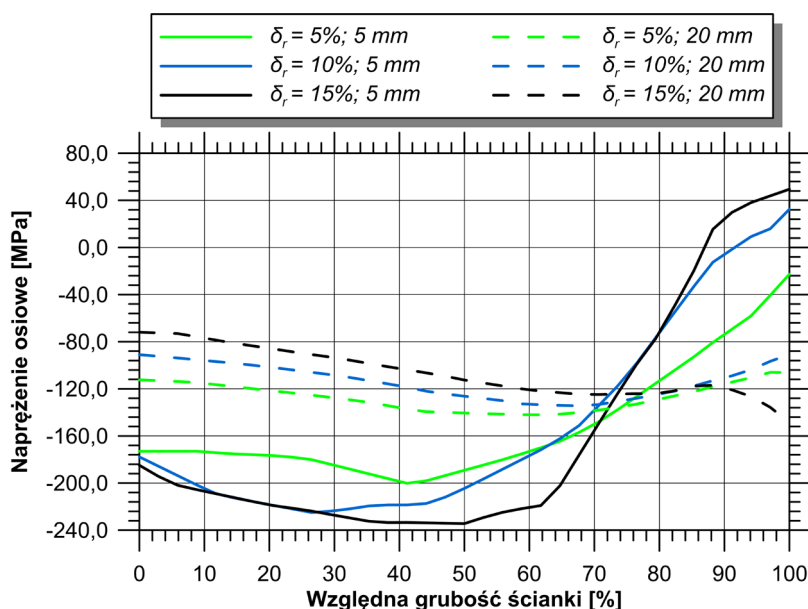
Ryc. 5.76. Rozkład naprężenia osiowego (w MPa) w przekroju osiowym odkuwek (na różnych etapach procesu) uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$, średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu δ_r : a) 5%, b) 10%, c) 15%

Rozkład naprężenia obwodowego na grubości ścianki spęczanego stopnia przedstawiono na rycinie 5.75. W początkowej fazie spęczania obserwuje się zróżnicowany stan naprężenia. Do ok. 70% względnej grubości (g_w) ścianki obserwuje się naprężenia o charakterze ściskającym, natomiast warstwy zewnętrzne stopnia ($g_w = 70\text{--}100\%$) poddawane są rozciąganiu obwodowemu. Można zauważyć, że w obu ww. strefach wyrobu wraz ze wzrostem wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu rosną także wartości bezwzględne naprężenia obwodowego. Podobną zależność można zaobserwować w końcowej fazie procesu, przy czym naprężenia na całej grubości ścianki stopnia mają wówczas charakter ściskający. Ponadto wartości bezwzględne naprężenia są znacznie niższe niż na początku procesu, co świadczy o tym, że do niezamierzonoego wzrostu średnicy zewnętrznej stopnia dochodzi w początkowej fazie ruchu matrycy i pojemnika górnego; potwierdzają to obserwacje w zakresie progresji kształtu odkuwki.

Na podstawie przedstawionego na rycinie 5.76 rozkładu naprężenia osiowego w przekroju odkuwek – w zakresie wartości tegoż naprężenia występujących w strefie materiału wewnątrz wykroju pojemnika górnego – można wyciągnąć wnioski analogiczne do przypadku rozkładu naprężenia obwodowego. Wartości naprężenia osiowego w początkowej i końcowej fazie procesu w ww. strefie odkuwki – uporządkowane wraz ze wzrostem wartości redukcji (δ_r) przekroju poprzecznego wsadu – wynoszą odpowiednio -290 MPa , -320 MPa , -350 MPa oraz -250 MPa , -270 MPa , -290 MPa . Wraz z postępowaniem procesu maleją zatem wartości bezwzględne naprężenia osiowego w ww. strefie odkuwki, widoczna staje się również korelacja dodatnia parametru δ_r z wartościami bezwzględnymi tego naprężenia.

Na podstawie analizy rozkładu naprężenia osiowego na grubości ścianki spęczanego stopnia (ryc. 5.77) można zauważyć identyczną ze wcześniejszymi przypadkami różnorodność pomiędzy początkowym i końcowym etapem procesu. Ponadto w początkowej fazie spęczania wartości bezwzględne naprężenia osiowego rosną wraz ze wzrostem wartości redukcji δ_r przekroju poprzecznego wsadu. To rezultat wzrostu parametru δ_r , który powoduje, że matryca i pojemnik górny są coraz później wprawiane w ruch z uwagi na odpowiedni stopień wypełnienia wykroju matrycy. Wiąże się to z coraz większymi naciskami stempla, co przekłada się na wartość naprężenia osiowego nie tylko w strefie materiału znajdującej się w wykroju pojemnika górnego, ale i w omawianej strefie spęczanego stopnia. Warto również zaznaczyć, że dla $\delta_r = 10$ i 15% zewnętrzne warstwy stopnia w początkowej fazie spęczania są rozciągane – jest to spowodowane ruchem matrycy i stosunkowo dużą redukcją

przekroju poprzecznego wsadu. Nie bez znaczenia są w tym kontekście również siły tarcia występujące na powierzchni trzpienia, który przemieszcza się przeciwbieżnie do ruchu matrycy.



Ryc. 5.77. Rozkład naprężenia osiowego (na różnych etapach procesu) na grubości ścianki odkuwek uzyskanych ze wsadu w postaci rury ($D = 20$ mm, $g = 5$ mm) dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\beta = 40^\circ$ oraz średnicy otworu kalibrującego matrycy $D_k = 24$ mm

W końcowym etapie procesu można z kolei zaobserwować zależność odmienną niż na początku spęczania. Generalnie wraz ze wzrostem wartości redukcji przekroju poprzecznego wsadu wartości bezwzględne naprężenia osiowego maleją. W początkowej fazie ruchu matrycy obserwuje się stan przejściowy stanu naprężenia, jaki występuje pomiędzy etapem procesu, kiedy to matryca jest nieruchoma, oraz stabilną, ustaloną fazą procesu, w której przemieszczają się jednocześnie trzy narzędzia. W związku z powyższym zaobserwowany spadek wartości bezwzględnych naprężenia osiowego w końcowej fazie spęczania (w odniesieniu do początku procesu), jak również korelacje dodatnie i ujemne parametru δ_r i wartości bezwzględnych naprężenia osiowego w początkowej i końcowej fazie procesu, znajdują wytłumaczenie w opisanym już aspekcie wynikającym ze specyfiki procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu.

6. Badania doświadczalne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

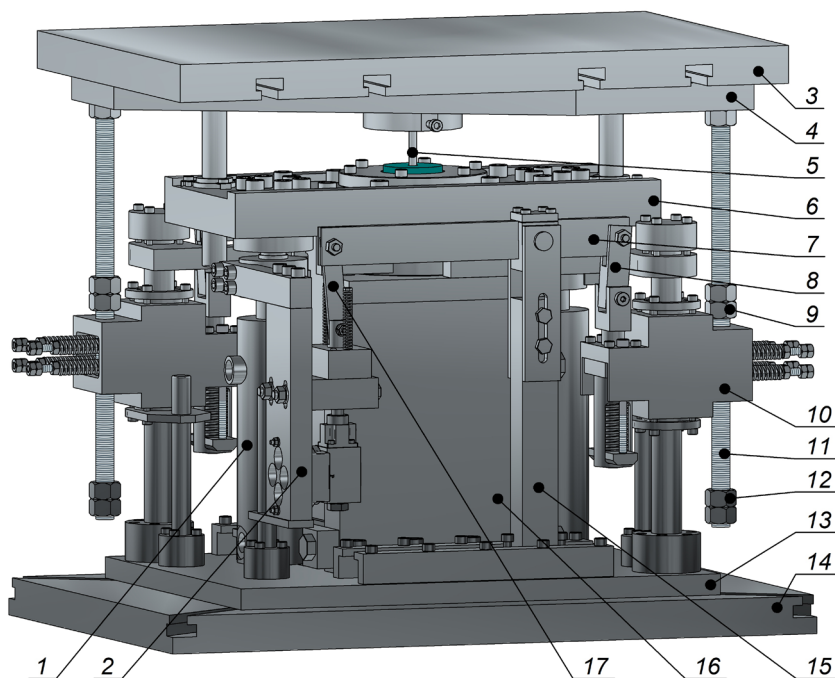
Przeprowadzona analiza numeryczna procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wykazała, że możliwe jest kształtowanie pełnych i drażonych wyrobów stopniowanych. W związku z powyższym podjęto prace mające na celu weryfikację technologii w warunkach laboratoryjnych. Badania takie umożliwiają walidację wyników teoretycznych oraz pozwalają na szczegółową analizę procesu w warunkach rzeczywistych. W tym celu zaprojektowano i wykonano specjalistyczny przyrząd zabezpieczający odpowiednią kinematykę poszczególnych narzędzi. W niniejszym rozdziale przedstawiono zatem budowę i zasadę działania urządzenia wraz z wynikami uzyskanymi w ramach prób stanowiskowych dotyczących kształtowania stopniowanych wyrobów pełnych i drażonych.

6.1. Charakterystyka stanowiska badawczego

W procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu jednocześnie mogą przemieszczać się trzy narzędzia współtworzące wykroń: stempel, pojemnik górny oraz matryca. Prędkość pojemnika górnego i matrycy jest taka sama, a jej wartość zależy od prędkości stempla oraz od wymiarów wykroju narzędzi (zob. zależności (3.1) i (3.2)). Dodatkowo zwrot prędkości stempla jest przeciwny do zwrotu prędkości pojemnika górnego i matrycy.

Taka kinematyka narzędzi sprawia, że stempel oraz pojemnik górny z matrycą muszą być napędzane niezależnie, przeciwnie do siebie i z odpowiednim stosunkiem prędkości. W związku z powyższym przyjęto następujące założenia projektowe dotyczące urządzenia do realizacji badań doświadczalnych:

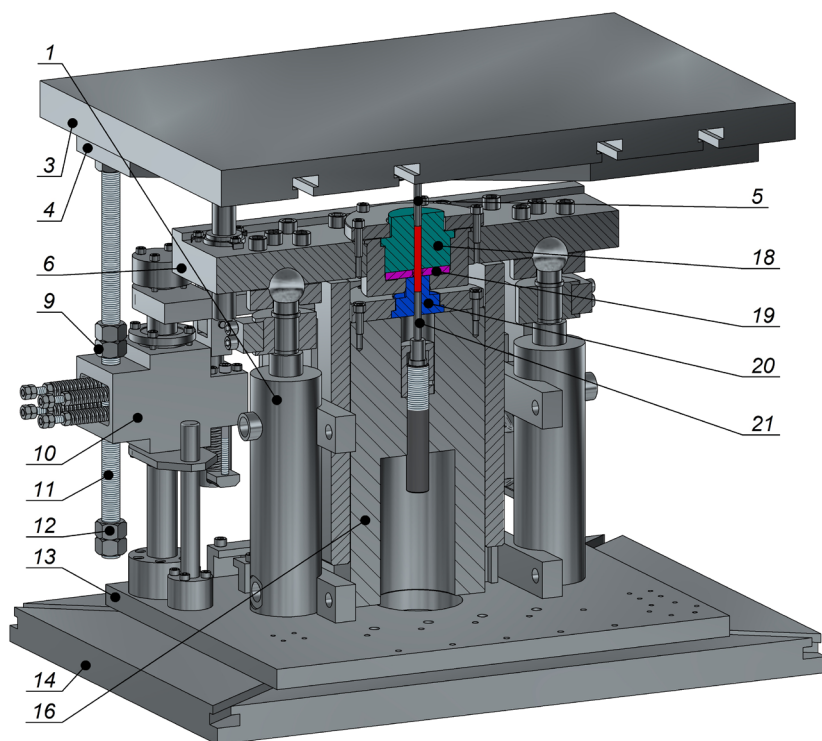
- przyrząd mocowany będzie w przestrzeni roboczej uniwersalnej prasy hydraulicznej,
- stempel napędzany będzie za pomocą suwaka prasy,
- pojemnik górny i matryca będą posiadały własny napęd,
- przemieszczenie stempla, przy którym pojemnik górny i matryca wprowadzane są w ruch, będzie regulowane bezstopniowo,
- prędkość matrycy i pojemnika górnego będzie regulowana bezstopniowo.



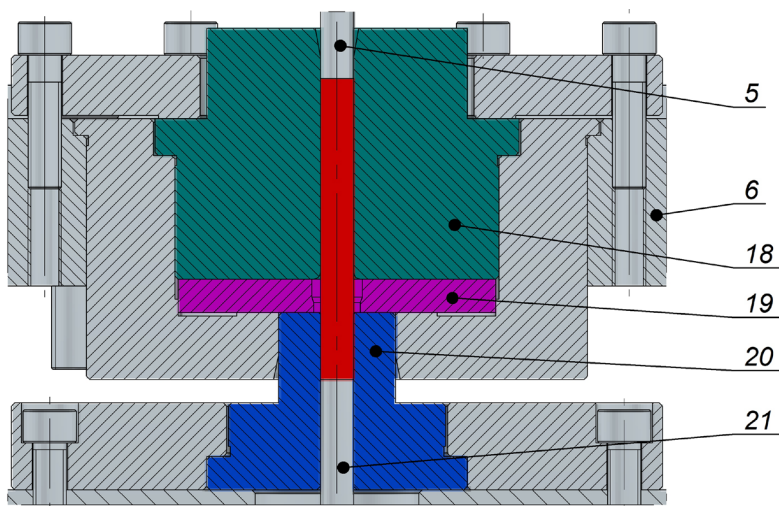
Ryc. 6.1. Model przyrządu do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

W oparciu o powyższe założenia zaprojektowano przyrząd, którego model przedstawiono na rycinie 6.1–6.5. Składa się on z płyty górnej 4 i płyty dolnej 13, które mocowane są odpowiednio do suwaka 3 i stołu 14 prasy hydraulicznej. Bezpośrednio do płyty górnej 4 przymocowany jest stempel 5 oraz dwie śruby 11 z nakrętkami regulacyjnymi górnymi 9 i dolnymi 12. Do płyty dolnej 13

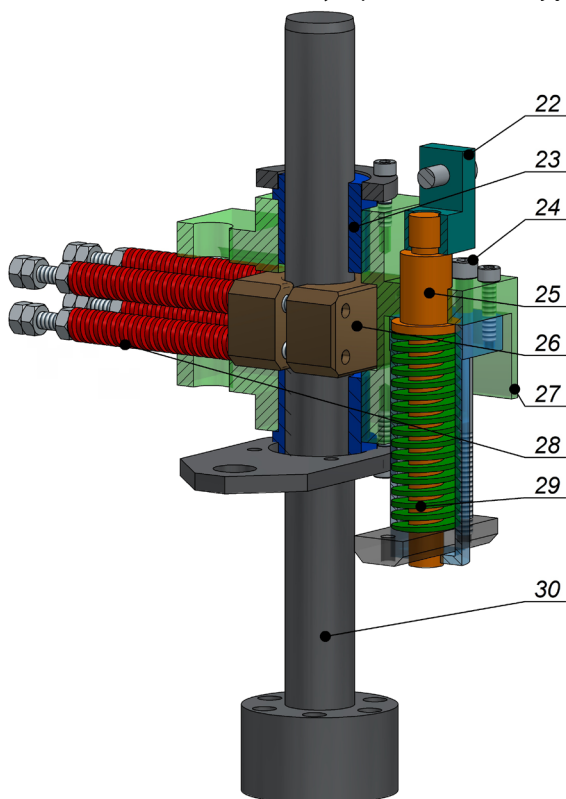
przymocowana jest podstawa 16, do której przykręcone są pojemnik dolny 20 oraz dwa siłowniki dwustronnego działania 1 napędzane za pomocą zasilacza hydraulicznego. Siłowniki 1 wprawiają w ruch płytę pośrednią 6, w której zamocowane są pojemnik górny 18 i matryca 19. W centralnym stopniowanym otworze przelotowym podstawy 16 znajduje się wyrzutnik 21 napędzany za pomocą siłownika hydraulicznego dwustronnego działania stanowiącego wyposażenie prasy hydraulicznej. W przyrządzie znajdują się również po dwa zespoły: rozdzielacza suwakowego 2 i sterowania dźwigni 10 oraz dwie dźwignie dwustronne 7 o bezstopniowej regulacji długości ramion, którą to zapewnia zespół podparcia dźwigni 15. Zespół rozdzielacza 2 połączony jest z tłoczyskiem siłownika 1 napędzającego płytę pośrednią 6. Zespół ten jest połączony z wykorzystaniem dźwigni dwustronnej 7 i dwóch cięgien 8 oraz 17 z zespołem sterowania dźwigni 10.



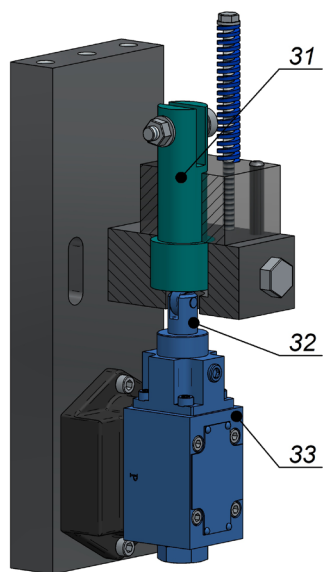
Ryc. 6.2. Model przyrządu do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z przekrojem wybranych komponentów



Ryc. 6.3. Fragment przekroju przyrządu do realizacji procesu spękania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu zawierający narzędzia tworzące wykrój



Ryc. 6.4. Zespół sterowania dźwigni



Ryc. 6.5. Zespół rozdzielacza suwakowego

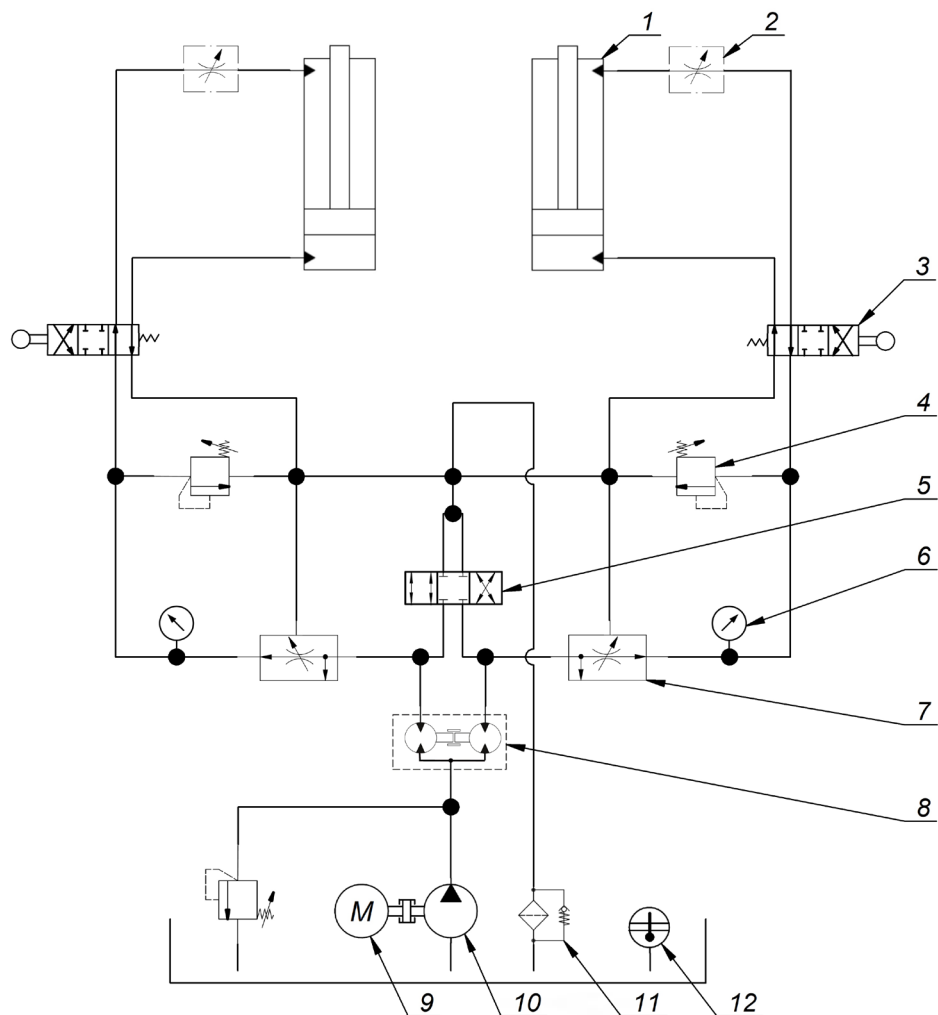
Zespół sterowania dźwigni składa się z korpusu 27, w którym osadzone są dwie tuleje prowadzące 23 oraz dwie panewki 26 dociskane do słupa prowadzącego 30 za pomocą czterech sprężyn 28. Dzięki temu korpus 27 zespołu nie może przemieszczać się samoczynnie, bez dodatkowej siły pochodzącej od nacisku nakrętek regulacyjnych 9 i 12. Zespół sterowania dźwigni posiada również sworzeń 25, który za pośrednictwem uchwytu 22 połączony jest z ciągnem 8 dźwigni dwustronnej 7. Na sworzniu 25 osadzona jest sprężyna 29, której siłę napięcia wstępnego reguluje się za pomocą śrub 24.

Zespół rozdzielacza suwakowego wyposażony został w sterowany mechanicznie rozdzielacz suwakowy 33. Umieszczono go w taki sposób, aby ciągną 17 łączące zespół z dźwignią dwustronną 7 nie było bezpośrednio połączone z suwakiem 32 rozdzielacza 33. Takie rozwiązanie chroni rozdzielacz 33 przed uszkodzeniem. W związku z tym suwak 32 rozdzielacza 33 napędzany jest poprzez uchwyt 31, który za pomocą cięgna 17 połączony jest z dźwignią dwustronną 7.

Nacisk suwaka 3 prasy hydraulicznej na płytę górną 4 przyrządu powoduje przemieszczenie stempla 5 oraz nakrętek regulacyjnych 9 i 12. Wskutek tego materiał wsadu zaczyna wypełniać wykrój matrycy 19, co z kolei rozpoczyna proces kształtowania wyrobu stopniowanego. Położenie stempla 5, przy którym pojemnik górny 18 i matryca 19 zaczynają się przemieszczać, ustalane jest za pomocą nakrętek regulacyjnych górnych 9. Od ich usytuowania zależy moment rozpoczęcia ruchu przez zespół sterowania dźwigni 10. Przemieszczenie owego zespołu powoduje, że wskutek zmiany położenia dźwigni dwustronnej 7 suwak 32 sterowanego mechanicznie rozdzielacza hydraulicznego 33 przemieszcza się przeciwbieżnie do ruchu stempla 5. Inicjuje to przepływ oleju hydraulicznego w odpowiednim kierunku i powoduje, że tłoczysko siłownika hydraulicznego 1 zaczyna wysuwać się z cylindra, wywołując w konsekwencji przemieszczenie pojemnika górnego 18 i matrycy 19.

Po zakończeniu procesu spęczania podnosi się suwak 3 prasy hydraulicznej i zmienia się położenie górnych nakrętek regulacyjnych 9. Następnie ponownie opuszcza się suwak 3 prasy, co powoduje, że przez pewien czas stempel 5 nie wywiera nacisku na materiał wsadu, a pojemnik górny 18 i matryca 19 zwiększają odległość od pojemnika dolnego 20. W momencie pojawienia się kontaktu stempla 5 z odkuwką dochodzi do jej wysunięcia z pojemnika górnego 18 i matrycy 19. Po wyjęciu wyrobu z przestrzeni roboczej przyrządu podnosi się suwak 3 prasy hydraulicznej, a nakrętki regulacyjne dolne 12 wywołują przemieszczenie zespołu sterowania dźwigni 10 przeciwbieżnie do ruchu wykonywanego podczas kształtowania odkuwki. Prowadzi to do zmniejszania odległości pomiędzy matrycą 19 i pojemnikiem dolnym

20 aż do wzajemnego kontaktu tych narzędzi. Zbyt późne zatrzymanie suwaka 3 prasy nie powoduje uszkodzenia żadnego z elementów przyrządu – prowadzi ono tylko do ugięcia sprężyny 29 i przemieszczenia korpusu 27 względem sworznia 25, które to znajdują się w zespole sterowania dźwigni 10.



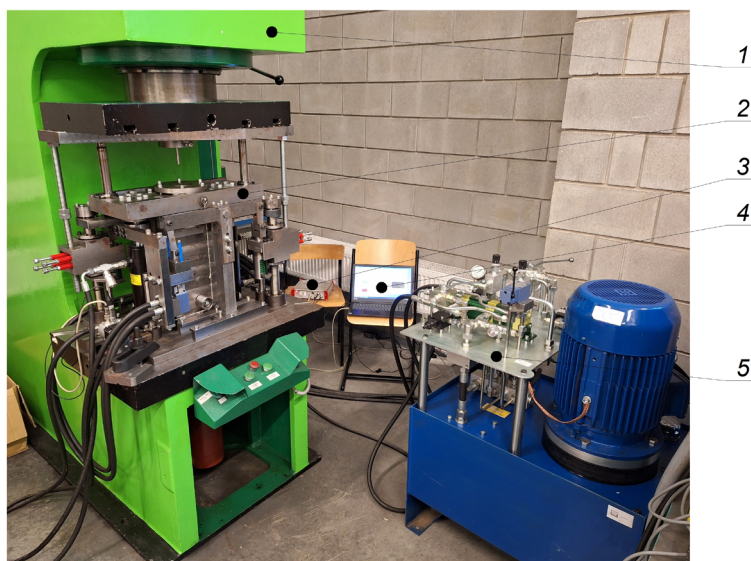
Ryc. 6.6. Schemat zasilacza hydraulicznego: 1 – siłownik hydrauliczny dwustronnego działania, 2 – zawór dławiący, 3 – rozdzielacz suwakowy sterowany mechanicznie, 4 – zawór przelewowy, 5 – czterodrogowy zawór kulowy, 6 – manometr, 7 – regulator przepływu (trójdrogowy), 8 – zębaty dzielnik strumienia, 9 – silnik elektryczny, 10 – pompa zębata, 11 – filtr oleju, 12 – wskaźnik poziomu oleju z termometrem

Regulacji wartości prędkości pojemnika górnego 18 i matrycy 19 dokonuje się poprzez zmianę długości ramion dźwigni dwustronnej 7 oraz za pomocą ustawienia odpowiedniego natężenia przepływu oleju do cylindrów siłowników. Oba parametry posiadają bezstopniową regulację i muszą być do siebie dostosowane. Długość ramion dźwigni 7 ustalana jest poprzez zmianę położenia jej osi obrotu, co realizowane jest za pomocą odpowiedniego położenia zespołu podparcia dźwigni 15. Zespół ten ma możliwość przemieszczania zarówno względem dźwigni 7, jak i płyty dolnej 13 przyrządu. Z kolei regulacja natężenia przepływu oleju możliwa jest dzięki zastosowaniu zasilacza hydraulicznego współpracującego z przyrządem do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu.

Schemat zasilacza hydraulicznego został przedstawiony na rysunku 6.6. Składa się on z pompy zębatej o wydajności $34,2 \text{ cm}^3/\text{obr.}$ i maksymalnym ciśnieniu pracy 19 MPa. Pompa zanurzona jest w zbiorniku o pojemności 160 litrów, a do jej napędu zastosowano silnik elektryczny o mocy 15 kW i prędkości obrotowej 1460 obr./min. Z pompy olej kierowany jest do zębatego dzielnika strumienia, dzięki czemu obiegi hydrauliczne obu siłowników napędzających matrycę i pojemnik górny zasilane są cieczą o takim samym natężeniu przepływu. W zależności od ustawienia czterodrogowego zaworu kulowego olej wychodzący z dzielnika poprzez filtr albo trafia do zbiornika, albo kierowany jest do obiegów zasilających siłowniki. W pierwszym przypadku dokonywany jest rozruch silnika elektrycznego realizowany przy niewielkim obciążeniu pompy hydraulicznej. W trakcie pracy przyrządu olej kierowany jest do obu obiegów hydraulicznych, w których celem płynnej regulacji prędkości tłoczków siłowników zastosowano trójdrogowe regulatory przepływu oraz zawory dławiące. Ponadto w przyrządzie zastosowano również zawory przelewowe, manometry oraz rozdzielacze suwakowe współpracujące z częścią mechaniczną przyrządu.

W celu monitorowania parametrów siłowych oraz kinematycznych procesu kształtowania wyrobów stopniowanych tak przyrząd, jak i prasę, na której jest on montowany, wyposażono w odpowiednie czujniki i przetworniki. Siłę nacisku stempla oraz siłę niezbędną do realizacji ruchu wykonywanego przez pojemnik górny i matrycę wyznaczono na podstawie pomiaru ciśnienia oleju w odpowiednich obiegach hydraulicznych prasy i zasilacza przyrządu. Zmianę położenia stempla oraz matrycy i pojemnika górnego wyznaczono natomiast za pomocą czujników przemieszczenia monitorujących odpowiednio ruch suwaka prasy oraz płyty pośredniej przyrządu. Akwizycja i archiwizacja danych mierzonych przez czujniki i przetworniki odbywa się za pomocą karty pomiarowej oraz komputera z zainstalowaną aplikacją opracowaną w środowisku LabVIEW.

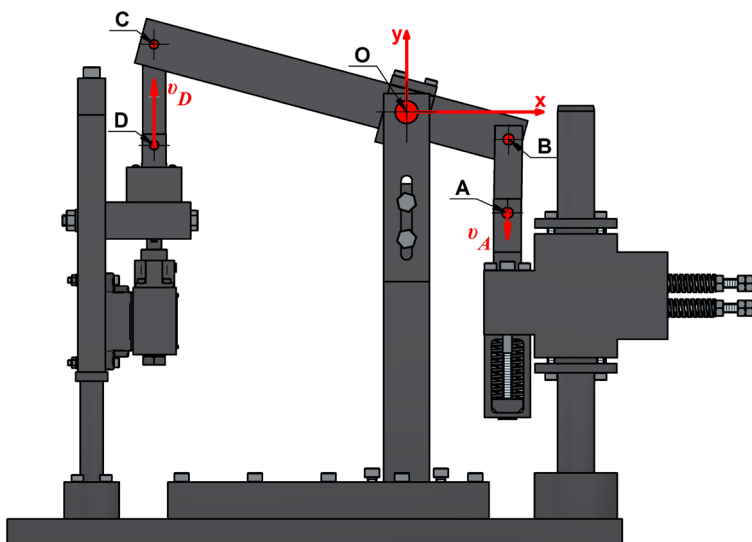
Na rycinie 6.7 przedstawiono widok rzeczywisty stanowiska badawczego do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Składa się ono z prasy hydraulicznej PYE 160 SS oraz umieszczonego w jej przestrzeni roboczej przyrządu do kształtowania wyrobów stopniowanych. Obok prasy znajduje się zasilacz hydrauliczny, karta pomiarowa oraz komputer z aplikacją umożliwiającą zapis mierzonych parametrów procesu kształtowania odkuwki.



Ryc. 6.7. Stanowisko badawcze do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu: 1 – prasa hydrauliczna PYE 160 SS, 2 – przyrząd do realizacji procesu spęczania, 3 – karta pomiarowa, 4 – komputer, 5 – zasilacz hydrauliczny

6.1.1. Analiza kinematyczna narzędzi

W celu uzyskania odpowiedniej kinematyki narzędzi w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu przyrząd wyposażono w układ bezstopniowej regulacji prędkości pojemnika górnego i matrycy. Zmiana prędkości tych narzędzi odbywa się za pomocą regulacji długości ramion dźwigni dwustronnej oraz w wyniku nastawy odpowiedniego natężenia przepływu oleju hydraulicznego. Zakładając, że ruch narzędzi jest zgodny z prędkością poszczególnych punktów mechanizmu pracującego z wykorzystaniem dźwigni dwustronnej, możliwe jest przeprowadzenie analizy kinematycznej stempla i pojemnika górnego wraz z matrycą.



Ryc. 6.8. Mechaniczny układ regulacji prędkości matrycy i pojemnika górnego w przyrządzie do spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

Na rycinie 6.8 przedstawiono mechaniczny układ regulacji prędkości matrycy i pojemnika górnego w przyrządzie do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Założono, że prędkość stemplu jest zgodna z prędkością punktu A, natomiast prędkość matrycy i pojemnika górnego jest taka sama, jak prędkość punktu D. Z uwagi na budowę przyrządu oba punkty mogą przemieszczać się tylko w kierunku pionowym. Przyjęto prostokątny układ współrzędnych kartezjańskich posiadający początek w osi obrotu dźwigni dwustronnej. Współrzędne poszczególnych punktów mechanizmu można zdefiniować następująco:

$$A = (x_A, y_A), \quad (6.1)$$

$$B = (x_B, y_B), \quad (6.2)$$

$$C = (x_C, y_C), \quad (6.3)$$

$$D = (x_D, y_D), \quad (6.4)$$

$$O = (0, 0). \quad (6.5)$$

Z kolei długości poszczególnych ramion dźwigni i cięgien przyjęto zgodnie z zależnościami 6.6–6.9.

$$|AB| = a, \quad (6.6)$$

$$|BO| = b, \quad (6.7)$$

$$|OC| = c, \quad (6.8)$$

$$|CD| = d. \quad (6.9)$$

Źródłem ruchu w przedstawionym mechanizmie jest przemieszczenie punktu A, który porusza się z prędkością v_A – taką samą, jak suwak prasy hydraulicznej napędzający jednocześnie stempel i korpus zespołu sterowania dźwigni. W związku z tym współrzędną y_A punktu A można zdefiniować jako funkcję czasu t wzorem, w którym y_{A0} oznacza współrzędną punktu A przed rozpoczęciem ru

$$y_A = y_{A0} - v_A \cdot t. \quad (6.10)$$

Współrzędne punktu B są rozwiązaniem układu równań 6.11 składającego się z dwóch równań okręgu – o środku w punkcie O i promieniu równym b oraz okręgu o środku w punkcie A i promieniu o wartość

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = b^2 \\ (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = a^2 \end{cases} \quad (6.11)$$

Wyznaczając z powyższego układu równań wartość współrzędnej x_B punktu B (wzór 6.12) i wstawiając ją do jednego z równań układu, otrzymuje się równanie kwadratowe zmiennej y (równanie 6.13), w którym wyrażenia m_1 i m_2 określają zależności 6.14 i 6.15. Posiada ono dwa rozwiązania, lecz poszukiwaną współrzędną y_B punktu B jest większe z nich, określone zależnością 6.16, w którym wyrażenia m_3 , m_4 , m_5 , m_6 określają zależności 6.17–6.20. Wstawiając zależność 6.16 w miejsce y do wzoru 6.12, otrzymuje się zależność określającą współrzędną x_B punktu B (wzór

$$x_B = \frac{b^2}{2 \cdot x_A} + \frac{x_A}{2} - \frac{y \cdot y_A}{x_A} + \frac{y_A^2}{2 \cdot x_A} - \frac{a^2}{2 \cdot x_A}, \quad (6.12)$$

$$y^2 \cdot \left(1 + \frac{y_A^2}{x_A^2}\right) + y \cdot \left(\left(\frac{y_A \cdot a^2}{x_A^2} - \frac{y_A \cdot b^2}{x_A^2} \right) - \left(y_A + \frac{y_A^3}{x_A^2} \right) \right) + m_1 + m_2 = 0, \quad (6.13)$$

$$m_1 = \frac{b^4}{4 \cdot x_A^2} + \frac{b^2}{2} + \frac{x_A^2}{4} - \frac{a^2 \cdot b^2}{2 \cdot x_A^2} - \frac{a^2}{2} + \frac{a^4}{4 \cdot x_A^2} - b^2, \quad (6.14)$$

$$m_2 = \frac{b^2 \cdot y_A^2}{2 \cdot x_A^2} + \frac{y_A^2}{2} + \frac{y_A^4}{4 \cdot x_A^2} - \frac{a^2 \cdot y_A^2}{2 \cdot x_A^2}. \quad (6.15)$$

$$y_B = \frac{y_A^3 + y_A \cdot m_3 + m_4}{m_5}. \quad (6.16)$$

$$m_3 = x_A^2 + b^2 - a^2, \quad (6.17)$$

$$m_4 = \sqrt{y_A^2 \cdot m_6 - y_A^4 \cdot x_A^2 - 4 \cdot m_1 \cdot x_A^4} \quad (6.18)$$

$$m_5 = 2 \cdot x_A^2 + 2 \cdot y_A^2, \quad (6.19)$$

$$m_6 = a^4 - 2 \cdot a^2 \cdot b^2 + b^4 - x_A^4 - 4 \cdot m_1 \cdot x_A^2, \quad (6.20)$$

$$x_B = \frac{m_3}{2 \cdot x_A} + \frac{y_A^2}{2 \cdot x_A} - \frac{y_A^4 + y_A^2 \cdot m_3 + y_A \cdot m_4}{2 \cdot x_A^3 + 2 \cdot x_A \cdot y_A^2}. \quad (6.21)$$

Znając współrzędne punktu B w przyjętym układzie odniesienia, można określić współrzędne punktu C z następujących zależ

$$x_C = -\frac{c \cdot x_B}{b}. \quad (6.22)$$

$$y_C = -\frac{c \cdot y_B}{b}. \quad (6.23)$$

Z kolei współrzędną y_D punktu D można wyznaczyć z twierdzenia Pitagorasa na podstawie znanych współrzędnych punktu C oraz znanej współrzędnej

x_D punktu D wynikającej z budowy przyrządu i położenia osi obrotu dźwigni dwustronnej. Równanie

$$(x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2 = d^2. \quad (6.24)$$

natomiast poszukiwana współrzędna y_D punktu D określona jest poniższą zależnością i stanowi mniejsze z dwóch rozwiązań po

$$y_D = \frac{-c \cdot y_B - \sqrt{c^2 \cdot y_B^2 - 2 \cdot c \cdot b \cdot x_B \cdot x_D - c^2 \cdot b^2 - b^2 \cdot x_D^2 + b^2 \cdot d^2}}{b}. \quad (6.25)$$

Prędkość pojemnika górnego i matrycy, którą uznano za równą prędkości punktu D, można obliczyć jako pierwszą pochodną po czasie współrzędnej y_D punktu D i zapisać w

$$v_D = \frac{dy_D}{dt} = \frac{c \cdot b \cdot x_D \cdot \frac{dx_B}{dt} - y_B \cdot c^2 \cdot \frac{dy_B}{dt}}{b \cdot \sqrt{c^2 \cdot y_B^2 - 2 \cdot c \cdot b \cdot x_B \cdot x_D - c^2 \cdot b^2 - b^2 \cdot x_D^2 + b^2 \cdot d^2}} - \frac{c \cdot \frac{dy_B}{dt}}{b}, \quad (6.26)$$

w którym

$$\frac{dx_B}{dt} = \frac{-v_s \cdot y_A}{x_A} - m_7 + m_8, \quad (6.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy_B}{dt} = & \frac{-3 \cdot v_s \cdot y_A^2 - v_s \cdot m_3 - \frac{v_s \cdot y_A \cdot m_6 - 2 \cdot v_s \cdot x_A^2 \cdot y_A^3}{m_4}}{m_5} + \\ & + \frac{4 \cdot v_s \cdot y_A \cdot (y_A^3 + y_A \cdot m_3 + m_4)}{m_5^2}, \end{aligned} \quad (6.28)$$

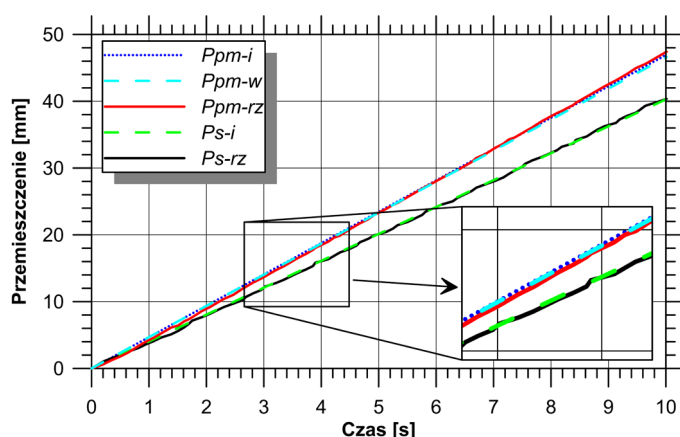
$$m_7 = \frac{-4 \cdot v_s \cdot y_A^3 - 2 \cdot v_s \cdot y_A \cdot m_3 - v_s \cdot m_4 + \frac{y_A \cdot (-2 \cdot v_s \cdot y_A \cdot m_6 + 4 \cdot v_s \cdot y_A^3 \cdot x_A^2)}{2 \cdot m_4}}{2 \cdot x_A^3 + 2 \cdot x_A \cdot y_A^2} \quad (6.29)$$

$$m_8 = \frac{(y_A^4 + y_A^2 \cdot m_3 + y_A \cdot m_4) \cdot (-4 \cdot x_A \cdot v_s \cdot y_A)}{(2 \cdot x_A^3 + 2 \cdot x_A \cdot y_A^2)^2}. \quad (6.30)$$

Na podstawie powyższych zależności przeanalizowano dokładność przemieszczenia poszczególnych narzędzi mocowanych w przyrządzie do realizacji procesu spęczania. Dla przykładowej długości ramion dźwigni dwustronnej wyznaczono wartość przemieszczenia stempla i pojemnika górnego wraz z matrycą. Na rycinie 6.9 poszczególne wartości przemieszczenia oznaczają kolejno:

- P_{pm-i} : teoretyczne przemieszczenie pojemnika górnego i matrycy obliczone przy założeniu stałej prędkości tych narzędzi, wyznaczonej z zależności (3.1) lub (3.2),
- P_{pm-w} : przemieszczenie pojemnika górnego i matrycy wyznaczone na podstawie zależności (6.25),
- P_{pm-rz} : rzeczywiste przemieszczenie pojemnika górnego i matrycy zmierzone doświadczalnie w przyrządzie do realizacji procesu spęczania,
- P_{s-i} : teoretyczne przemieszczenie stempla wyznaczone przy założeniu ruchu ze stałą prędkością,
- P_{s-rz} : rzeczywiste przemieszczenie stempla zmierzone doświadczalnie w przyrządzie do realizacji procesu spęczania,

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że istnieje wysoka zgodność przemieszczenia rzeczywistego poszczególnych narzędzi z wartościami teoretycznymi. Średni błąd położenia pojemnika górnego i matrycy w zakresie analizowanego przemieszczenia wynosi ok. 1%. W związku z powyższym opracowany przyrząd zapewnia odpowiednią kinematykę poszczególnych narzędzi i może zostać wykorzystany do analizy doświadczalnej procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu.



Ryc. 6.9. Przemieszczenie stempla, pojemnika górnego i matrycy wyznaczone teoretycznie i zmierzone doświadczalnie

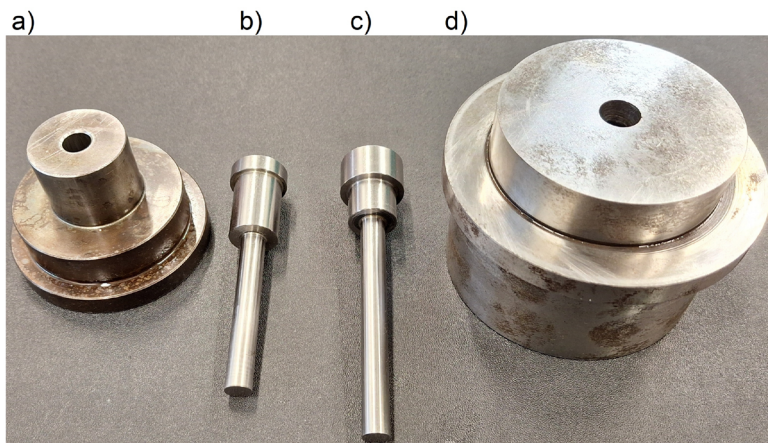
6.2. Badania doświadczalne procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta

Dla wytypowanych wariantów kształtowania przeprowadzono badania doświadczalne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta. Na podstawie wyników obliczeń numerycznych analizowanej technologii stwierdzono, że parametry procesu istotnie wpływają na jakość końca spęczanego stopnia od strony stempla. Na powierzchni czołowej odkuwki może pojawić się niewypełnienie przypominające sfazowaną krawędź bądź otwór o stałej lub zmiennej średnicy i głębokości. Bez względu na to zastosowanie matrycy posiadającej kąt strefy stożkowej o wartości $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcję przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 15\%$ umożliwia jednak uzyskanie wyrobów charakteryzujących się najlepszą (spośród badanych) jakością spęczanego stopnia w ww. zakresie, tj. takich, w których koniec odkuwki jest zbliżony do idealnego – ewentualne niewypełnienie bądź otwór są niewielkie. Z tego powodu do realizacji badań doświadczalnych wytypowano przypadki opisane powyższymi parametrami. Ponadto z myślą o analizie procesu poddano weryfikacji również warianty, w których matryca posiada kąt strefy stożkowej o wartości $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcję przekroju poprzecznego wsadu $\delta_p = 25\%$. Są to parametry, przy zastosowaniu których na końcu spęczanego stopnia powstaje otwór możliwy do usunięcia np. metodą obróbki plastycznej lub ubytkowej.

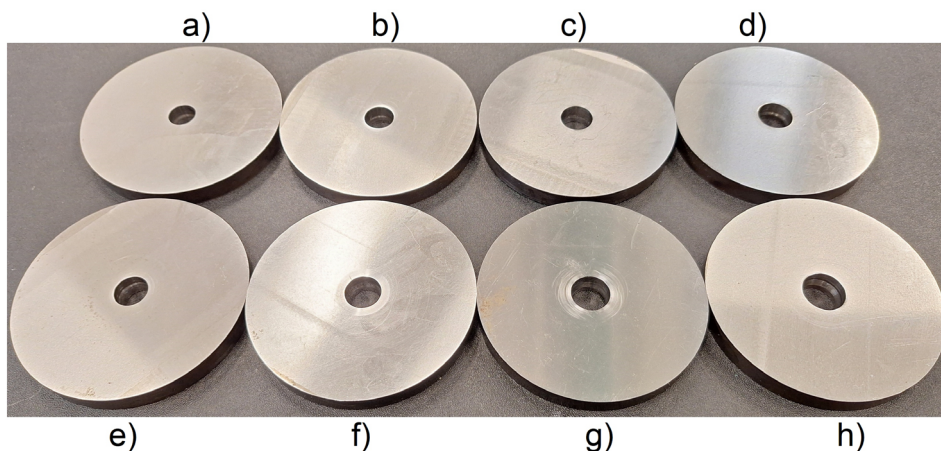
Z uwagi na ograniczenia wynikające z konstrukcji przyrządu do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu analizie poddano przypadki kształtowania, dla których średnica otworu kalibrującego matrycy mieści się w przedziale $d_k = 12\text{--}15\text{ mm}$. Dla tych parametrów można zapewnić odpowiednią wartość prędkości matrycy i pojemnika górnego względem prędkości stempla, co w przyrządzie jest ograniczone poprzez możliwe do zastosowania długości ramion dźwigni dwustronnej. Ponadto przestrzeń robocza (rozumiana jako odległość pomiędzy pojemnikiem dolnym i matrycą) niezbędna do wyjęcia odkuwki po zakończeniu spęczania jest również ograniczona i zależna od dopuszczalnego zakresu ruchu zespołu sterowania dźwigni oraz długości ramion dźwigni dwustronnej – im większa średnica otworu kalibrującego matrycy, tym mniejsza ww. przestrzeń robocza.

W związku z powyższym na potrzeby badań doświadczalnych wykonano narzędzia, które zamontowano w przyrządzie do realizacji procesu spęczania. Na rycinie 6.10 przedstawiono zdjęcie pojemnika dolnego, wyrzutnika, stempla oraz pojemnika górnego, natomiast na rycinie 6.11 pokazano zestaw matryc. Narzędzia te wykonano ze stali narzędziowej NZ3 i ulepszono cieplnie do

twierdności 57 HRC. Powierzchnie kontaktujące się z materiałem odkształcanym polerowano. Poza ww. elementami mającymi kontakt z materiałem odkształcanym wykonano również komponenty, dzięki którym zamocowano przedstawione narzędzia robocze w przyrządzie do realizacji procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu.



Ryc. 6.10. Narzędzia wykorzystane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta:
a) pojemnik dolny, b) wyrzutnik, c) stempel, d) pojemnik górny



Ryc. 6.11. Matryce wykorzystane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta, posiadające kąt pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$, średnicę otworu kalibrującego i redukcję przekroju poprzecznego wsadu równą odpowiednio: a) $d_k = 12$ mm, $\delta_p = 15\%$, b) $d_k = 13$ mm, $\delta_p = 15\%$, c) $d_k = 14$ mm, $\delta_p = 15\%$, d) $d_k = 15$ mm, $\delta_p = 15\%$, e) $d_k = 12$ mm, $\delta_p = 25\%$, f) $d_k = 13$ mm, $\delta_p = 25\%$, g) $d_k = 14$ mm, $\delta_p = 25\%$, h) $d_k = 15$ mm, $\delta_p = 25\%$

Podczas realizacji badań doświadczalnych zastosowano parametry zgodne z tymi, które przyjęto w obliczeniach numerycznych. Zastosowano wsad w postaci odcinka pręta o średnicy 10 mm i długości 80 mm wykonany ze stopu aluminium EN AW-6060. Analogicznie do próbek do badania krzywej płynięcia i warunków tarcia wsad poddano procesowi wyżarzania w temperaturze 415°C w elektrycznym piecu komorowym LAC PK 10/12 R. Próbki nagrzewano i studzono razem z piecem, natomiast czas wygrzewania wynosił dwie godziny. Przyjęto prędkość stempla równą 5 mm/s, natomiast jako środek smarny zastosowano olej. Podczas badań eksperymentalnych rejestrowano parametry siłowe procesu.



Ryc. 6.12. Odkuwki wykonane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta (a), kształtowane z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_p = 15\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego: b) $d_k = 12$ mm, c) $d_k = 13$ mm, d) $d_k = 14$ mm, e) $d_k = 15$ mm



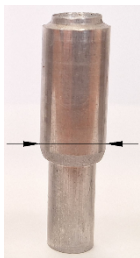
Ryc. 6.13. Odkuwki wykonane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta (a), kształtowane z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_p = 25\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego: b) $d_k = 12$ mm, c) $d_k = 13$ mm, d) $d_k = 14$ mm, e) $d_k = 15$ mm

Odkuwki uzyskane w badaniach doświadczalnych przedstawiono na rycinie 6.12 i 6.13. Wykonane wyroby w zakresie kształtu są zgodne z tymi uzyskanymi w obliczeniach numerycznych. Dla kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_p = 15\%$ można zaobserwować, że czołowa powierzchnia spęczanego stopnia od strony stempla jest niemalże płaska (ryc. 6.12). Jedynym odstępstwem od wyznaczonego numerycznie kształtu odkuwki jest występowanie czołowej wypłytki, która powstaje z uwagi na konieczność zastosowania luzu (którego w obliczeniach nie przyjęto) pomiędzy stemplem, a otworem w pojemniku górnym. W przypadku spęczania z zastosowaniem kąta pochylenia strefy stożkowej matrycy $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_p = 25\%$ (ryc. 6.13) – podobnie jak w obliczeniach numerycznych we wszystkich odkuwkach (w badanym doświadczalnie zakresie średnic otworu kalibrującego

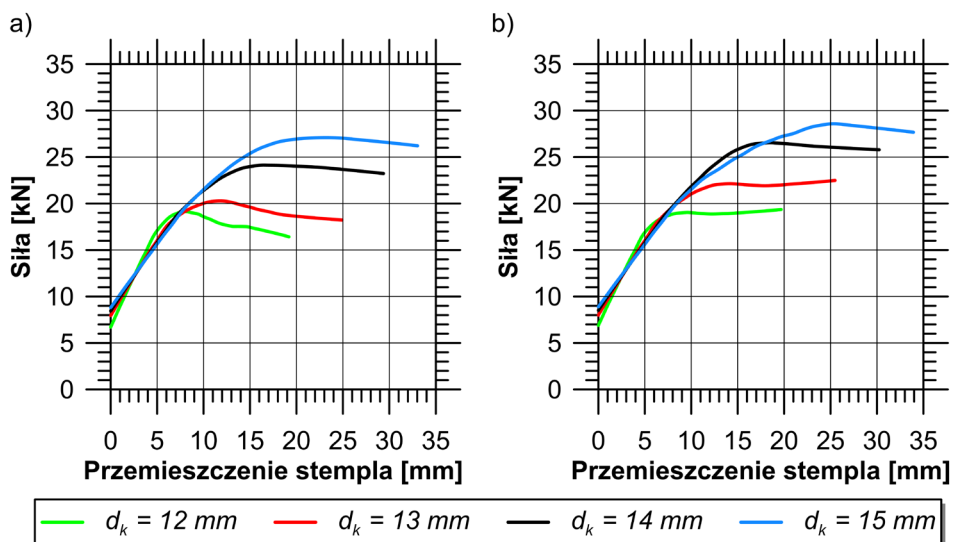
matrycy) – na ich czołowej powierzchni od strony stempla znajduje się otwór o stałej średnicy i głębokości, który (podobnie jak w przypadku wyników teoretycznych) maleje wraz ze wzrostem średnicy otworu kalibrującego matrycy.

Odkuwki uzyskane w badaniach doświadczalnych posiadają również niewielkie niewypełnienie zlokalizowane w strefie spęzonego stopnia od strony pojemnika dolnego. Jest to zjawisko charakterystyczne dla technologii spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu – jak zostało to scharakteryzowane w przypadku analizy wyników teoretycznych. Całkowite wypełnienie odkuwki w omawianym miejscu jest trudne, gdyż przed pełnym wypełnieniem matryca i pojemnik górny zostają bowiem wprowadzone w ruch, co kończy etap kształtowania ww. obszaru odkuwki i prowadzi głównie do przyrostu długości spęzanego stopnia.

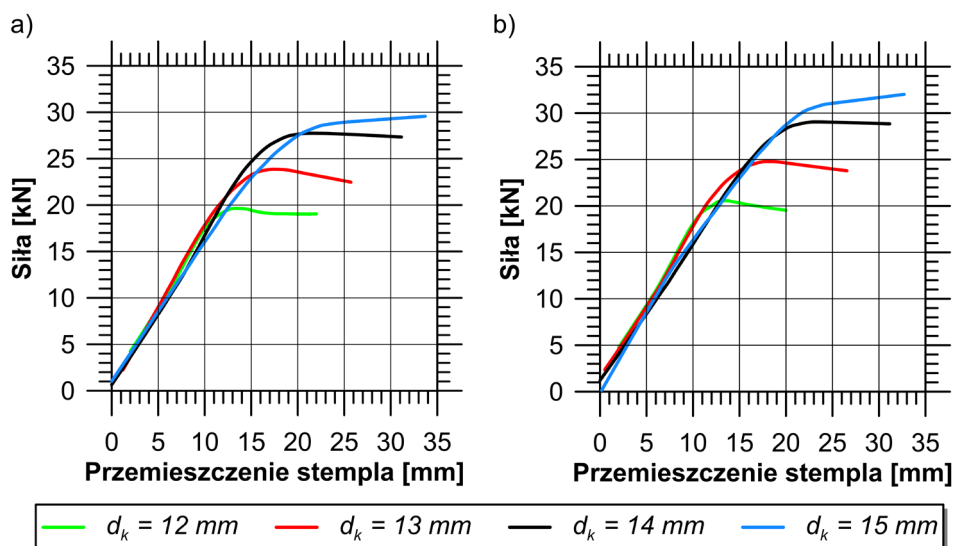
Tabela 6.1. Średnica stopnia odkuwki w strefie znajdującej się od strony pojemnika dolnego

d_k [mm]	Średnica stopnia w strefie znajdującej się od strony pojemnika dolnego				
	$\delta_p = 15\%$		$\delta_p = 25\%$		
	MES [mm]	Doświadczenie [mm]	MES [mm]	Doświadczenie [mm]	
12	$d_k + 0,02$	$d_k + 0,05$	$d_k + 0,04$	$d_k + 0,07$	
13	$d_k + 0,03$	$d_k + 0,06$	$d_k + 0,06$	$d_k + 0,08$	
14	$d_k + 0,04$	$d_k + 0,06$	$d_k + 0,10$	$d_k + 0,08$	
15	$d_k + 0,05$	$d_k + 0,07$	$d_k + 0,16$	$d_k + 0,09$	

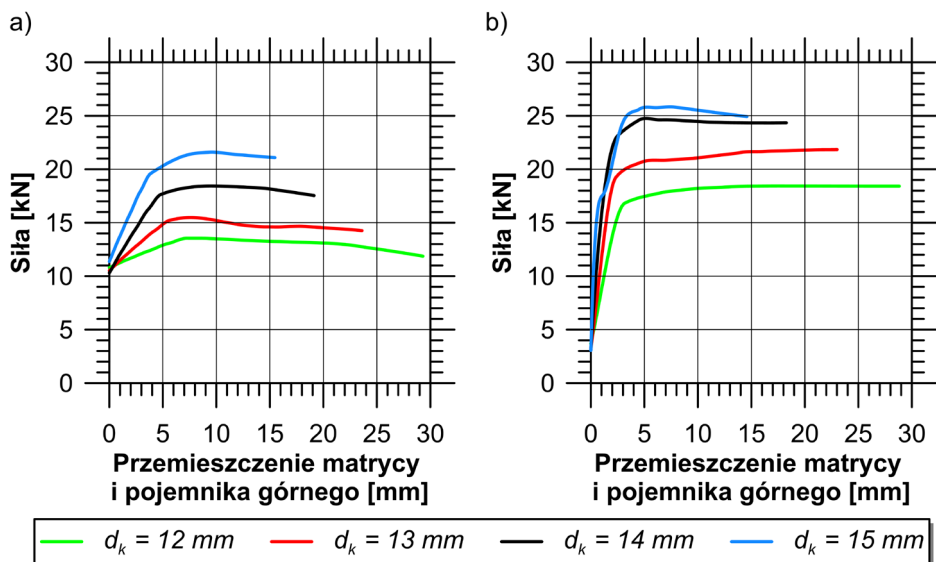
Na podstawie analizy wyników obliczeń numerycznych stwierdzono, że kształtowany stopień w strefie znajdującej się od strony pojemnika dolnego posiada większą średnicę niż średnica d_k otworu kalibrującego matrycy. Zjawisko to zaobserwowano również w odkuwkach uzyskanych w badaniach doświadczalnych. W tabeli 6.1 zestawiono wartości średnicy w ww. strefie spęzanego stopnia. Można zaobserwować, że wartości wyznaczone teoretycznie są zbliżone do wyników rzeczywistych, a różnica średnic zawiera się w przedziale 0,02–0,07 mm. Widoczne jest również, że przyrost omawianej wartości średnicy (ponad wartość d_k) zwiększa się wraz ze wzrostem wartości redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu mającego miejsce w matrycy. Wzrost średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy powoduje coraz to większy przyrost średnicy (ponad wartość oczekiwaną równą d_k) spęzanego stopnia w strefie znajdującej się od strony pojemnika dolnego. Niemniej jednak uzyskane doświadczalnie wartości przyrostu średnicy stopnia (ponad wartość równą d_k) w odniesieniu do średnicy d_k otworu kalibrującego matrycy wynoszą zaledwie do 0,6%.



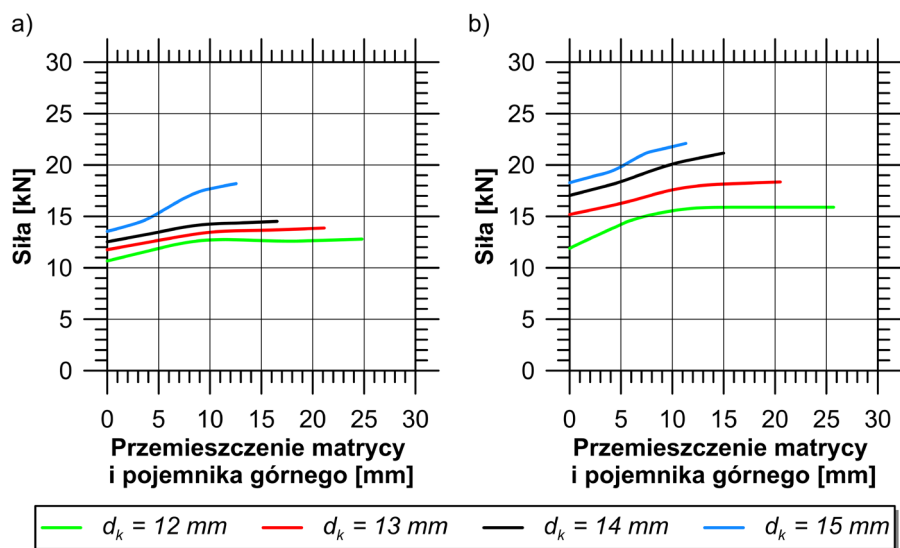
Ryc. 6.14. Przebieg siły przyłożonej do stempla w funkcji jego przemieszczenia dla procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta kształtowanego z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej: a) $\delta_p = 15\%$, b) $\delta_p = 25\%$; wyniki uzyskane z obliczeń numerycznych



Ryc. 6.15. Przebieg siły przyłożonej do stempla w funkcji jego przemieszczenia dla procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta kształtowanego z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej: a) $\delta_p = 15\%$, b) $\delta_p = 25\%$; wyniki uzyskane w badaniach doświadczalnych



Ryc. 6.16. Przebieg sumarycznej siły przyłożonej do matrycy i pojemnika górnego w funkcji przemieszczenia tych narzędzi dla procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta kształtowanego z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej: a) $\delta_p = 15\%$, b) $\delta_p = 25\%$; wyniki uzyskane z obliczeń numerycznych



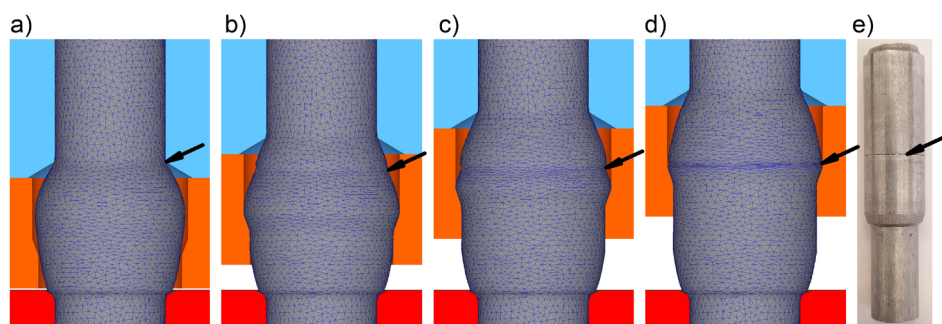
Ryc. 6.17. Przebieg sumarycznej siły przyłożonej do matrycy i pojemnika górnego w funkcji przemieszczenia tych narzędzi dla procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta kształtowanego z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\alpha = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej: a) $\delta_p = 15\%$, b) $\delta_p = 25\%$; wyniki uzyskane w badaniach doświadczalnych

Parametry siłowe procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu wyznaczone w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie obliczeń numerycznych przedstawiono na rycinie 6.14–6.17. Krzywe zawierają informacje zebrane od początku realizacji procesu do momentu zakończenia jednoczesnego ruchu stempla, matrycy i pojemnika górnego. Dane źródłowe, które próbkowano z częstotliwością 50 Hz, przedstawiono w formie wykresów uzyskanych wskutek aproksymacji wartości sił z poszczególnych punktów pomiarowych za pomocą modeli wielomianowych, jakie przypisano do podzbiorów danych.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno wzrost średnicy otworu d_k kalibrującego matrycy, jak i wartości redukcji δ_p przekroju poprzecznego wsadu powodują, że rośnie maksymalna wartość siły przyłożonej do stempla, a także sumarycznej siły przyłożonej do matrycy i pojemnika górnego. W odniesieniu do przebiegu siły przyłożonej do stempla widoczna jest jego korelacja z etapami realizacji procesu: początkowo – kiedy to przemieszcza się tylko stempel – jej wartość wzrasta niemalże liniowo, dalszy niewielki spadek obserwowany jest po wprowadzeniu w ruch matrycy i pojemnika górnego. Wynika to z faktu, iż coraz mniejsza długość wsadu znajduje się w pojemniku górnym, co przekłada się na mniejszy udział sił tarcia w tej strefie. Analogiczny przebieg wykazują wyznaczone numerycznie, przyłożone do matrycy i pojemnika górnego siły sumaryczne, z kolei przebiegi te określone w badaniach doświadczalnych wskazują na niemalże nieustanny wzrost wartości omawianej siły. Dodatkowo wartości sił wyznaczonych w próbach stanowiskowych różnią się od sił określonych teoretycznie. Przyczyn powyższych rozbieżności należy upatrywać w różnicach pomiędzy rzeczywistymi warunkami realizacji procesu, a tymi, jakie przyjęto w modelu numerycznym. Kluczowym czynnikiem są warunki tarcia z uwagi na fakt, że powierzchnia kontaktu wsadu z narzędziami jest stosunkowo duża, wskutek czego siły tarcia mają istotny wpływ na całkowite wartości sił przyłożonych do stempla i matrycy z pojemnikiem górnym. W przeciwieństwie do modelu numerycznego w rzeczywistości warunki tarcia są zmienne. Może dochodzić np. do utraty ciągłości warstwy olejowej pomiędzy wsadem i narzędziami. Poza warunkami kontaktu przyczyną ww. rozbieżności może być również nieznacznie inny moment wprowadzenia w ruch matrycy i pojemnika górnego w początkowej fazie procesu. Wpływa to na stopień wypełnienia wykroju matrycy, a zatem na wielkość powierzchni kontaktu wsadu z tym narzędziem, co w konsekwencji przekłada się m.in. na udział sił tarcia w procesie. Ponadto należy mieć na uwadze również rozbieżności w wymiarach wykroju narzędzi i wsadu. Na potrzeby symulacji komputerowych przyjęto wymiary nominalne, jednak w warunkach rzeczywistych

wymiary wykroju i wsadu mogą być nieznacznie inne z uwagi na przyjęte tolerancje wymiarów. Kolejnym nieuwzględnionym w obliczeniach czynnikiem jest zjawisko odkształceń sprężystych narzędzi, przyrządu i prasy hydraulicznej zastosowanych w badaniach doświadczalnych oraz własne opory ruchu prasy i przyrządu. Powyższe czynniki są bardzo trudne do uwzględnienia w modelu numerycznym, a ich koincydencja wpływa na wyniki badań doświadczalnych.

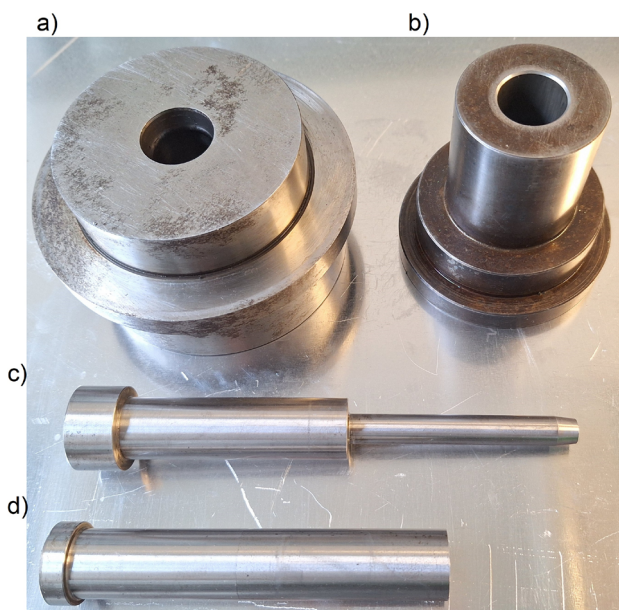
Na podstawie badań doświadczalnych związanych z procesem spęczniania z zastosowaniem wsadu w postaci pręta zdefiniowano wadę odkuwki, jaka może powstać podczas jej kształtowania. Do zakucia widocznego na rycinie 6.18e może dojść na powierzchni bocznej spęczanego stopnia w wyniku zbyt wczesnego wprowadzenia w ruch matrycy i pojemnika górnego. Z analizy MES wynika, że w początkowej fazie ruchu tych narzędzi brak kontaktu materiału odkształcanego z powierzchnią wykroju matrycy (ryc. 6.18a) może spowodować, że na późniejszym etapie procesu dojdzie do powstania zakucia pomiędzy strefą materiału spęczoną przed wprowadzeniem w ruch matrycy i pojemnika górnego a materiałem opuszczającym otwór pojemnika górnego (ryc. 6.18b–d). Tworzy się ono wskutek oddziaływania dwóch czynników – wejście odkształcanego materiału w kontakt ze stożkową powierzchnią wykroju matrycy dopiero po wprowadzeniu jej w ruch hamuje płynięcie materiału w kierunku osiowym (w stronę pojemnika dolnego), a ponadto materiał opuszczający wykrój pojemnika górnego ma mniejszy przekrój poprzeczny niż uprzednio odkształcony materiał w strefie matrycy. W pierwszej kolejności odkształceniu ulegają zatem strefy materiału znajdujące się w pobliżu pojemnika górnego, w związku z czym pomiędzy strefą materiału odkształconą przed rozpoczęciem ruchu matrycy i po wprowadzeniu w ruch tego narzędzia dochodzi do niekorzystnego płynięcia materiału, które prowadzi do powstania zakucia.



Rys. 6.18 Odkuwka z zakuciem powstałym w strefie kształtowanego stopnia: a)–d) wybrane etapy symulacji numerycznej procesu spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, e) odkuwka uzyskana w badaniach doświadczalnych

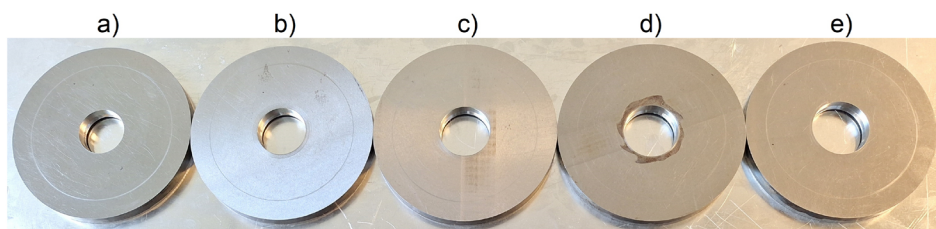
6.3. Badania doświadczalne procesu spęczania z zastosowaniem wsadu w postaci rury

Badania doświadczalne procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci rury zostały przeprowadzone dla wybranych wariantów kształtowania. Wytypowano je na podstawie uzyskanych wyników obliczeń numerycznych badanej technologii. Weryfikację w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono z wykorzystaniem matryc o różnych średnicach D_k otworu kalibrującego, posiadających kąt pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$ oraz zapewniających redukcję przekroju poprzecznego wsadu równą $\delta_r = 10\%$. Dla wskazanych parametrów uzyskuje się odkuwki o stosunkowo dobrej jakości powierzchni czołowej znajdującej się od strony stempla, tzn. niewypełnienie przypominające sfazowaną krawędź jest niewielkie (mniejsze niż np. dla $\delta_r = 5\%$). Ponadto dla parametru $\delta_r = 10\%$ nie zaobserwowano zjawiska zakucia na zewnętrznej powierzchni spęczanego stopnia, do którego (przy pewnej średnicy D_k otworu kalibrującego) może dojść przy wykorzystaniu matrycy posiadającej parametr δ_r o wartości równej 15%.



Ryc. 6.19. Narzędzia wykorzystane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci rury:
a) pojemnik górny, b) pojemnik dolny, c) stempel, d) wyrzutnik

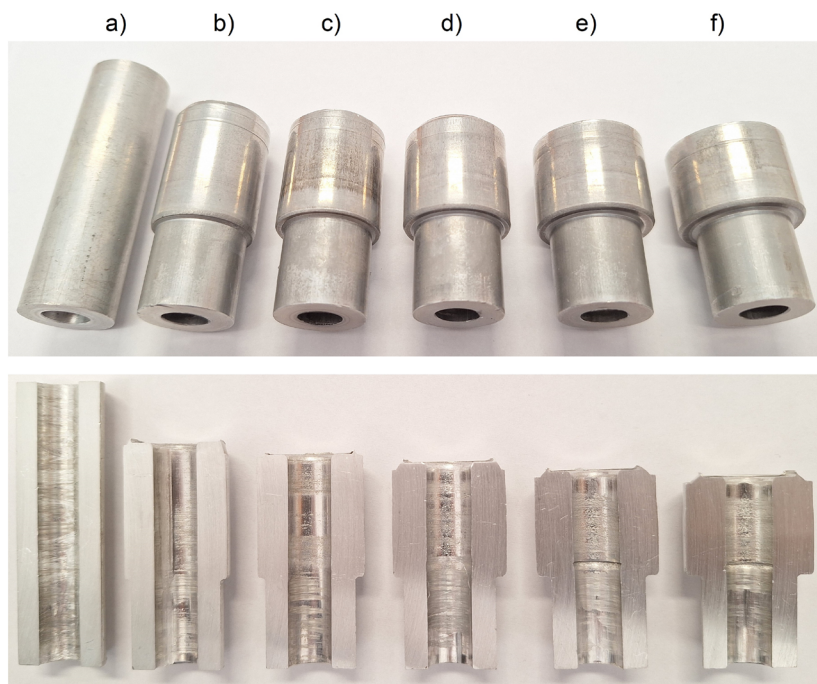
Badania doświadczalne procesu przeprowadzono zgodnie z parametrami geometrycznymi i kinematycznymi zastosowanymi w obliczeniach numerycznych. Jako wsad wykorzystano odcinki rur o średnicy zewnętrznej równej 20 mm, grubości ścianki 5 mm i długości 65 mm. Wykonano je ze stopu aluminium EN AW 6060 i wyżarzono w taki sam sposób (415°C/dwie godziny), jak próbki do badania krzywej płynięcia, warunków tarcia oraz prób spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci pręta. Na potrzeby realizacji badań wykonano narzędzia, które montowano w przyrządzie przedstawionym w rozdziale 6.1. Na rycinie 6.19 zaprezentowano pojemnik górny, pojemnik dolny, stempel oraz wyrzutnik, natomiast na rycinie 6.20 matryce posiadające średnicę otworu kalibrującego w zakresie $D_k = 23\text{--}27$ mm. Powyższe komponenty wykonano ze stali narzędziowej NZ3 i ulepszono cieplnie do twardości 57 HRC. Powierzchnie kontaktujące się z materiałem odkształcanym polerowano. Podczas prób stanowiskowych jako środek smarny zastosowano olej i przyjęto prędkość stempla równą 5 mm/s. Prędkość matrycy i pojemnika górnego była zależna od zastosowanej matrycy, a jej wartość regulowano za pomocą odpowiedniego ustawienia długości ramion dźwigni dwustronnej przyrządu do spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu (zob. rozdz. 6.1).



Ryc. 6.20. Matryce wykorzystane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci rury, posiadające kąt pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$, redukcję przekroju poprzecznego wsadu równą $\delta_r = 10\%$ oraz średnicę otworu kalibrującego równą odpowiednio:
 a) $D_k = 23$ mm, b) $D_k = 24$ mm, c) $D_k = 25$ mm, d) $D_k = 26$ mm, e) $D_k = 27$ mm

Odkuwki uzyskane w badaniach doświadczalnych przedstawiono na rycinie 6.21. W zakresie kształtu wykazują dużą zgodność z wynikami obliczeń numerycznych. Uzyskany wyrób drążony ze stopniem zewnętrznym charakteryzuje się grubością ścianki o dwóch różnych wartościach (występujących w strefie stopnia i w nieodkształconej części dolnej) przy zachowaniu niemalże stałej średnicy otworu. W wypadku średnic otworu kalibrującego matrycy $D_k = 26$ i 27 mm w dolnej części stopnia na powierzchni otworu występuje

widoczne zakucie. Rezultat ten jest zgodny z wynikami badań wstępnych przedstawionych w rozdziale 4.4. Zakucie to zaczyna powstawać w początkowej fazie procesu, przed wprawieniem w ruch matrycy i pojemnika górnego; nie tworzy się zaś przy zastosowaniu mniejszych wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy – w zakresie $D_k = 23\text{--}25\text{ mm}$ – przy czym średnicę $D_k = 25\text{ mm}$ należy uznać za wartość graniczną, ponieważ materiał w dolnej części stopnia nieznacznie traci kontakt z trzpieniem.



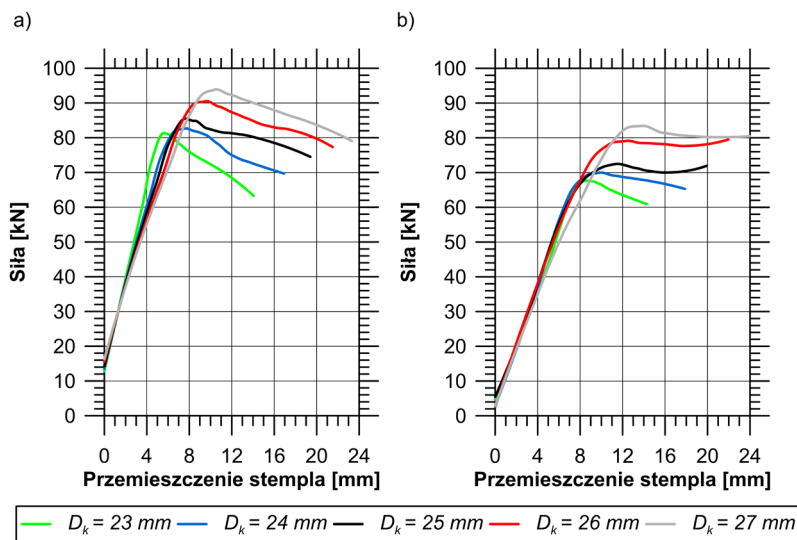
Ryc. 6.21. Odkuwki wykonane w badaniach doświadczalnych procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci rury (a), kształtowane z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$, redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_r = 10\%$ oraz średnicy otworu kalibrującego:
b) $D_k = 23\text{ mm}$, c) $D_k = 24\text{ mm}$, d) $D_k = 25\text{ mm}$, e) $D_k = 26\text{ mm}$, f) $D_k = 27\text{ mm}$

Podobnie jak w przypadku obliczeń numerycznych uzyskane odkuwki charakteryzują się nieznacznie większą wartością średnicy w dolnej części stopnia w porównaniu z oczekiwaną wartością definiowaną przez średnicę otworu kalibrującego matrycy. Jak wykazały badania – zarówno teoretyczne, jak i doświadczalne – podczas spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu dochodzi do niezamierzonego wzrostu średnicy zewnętrznej odkuwki.

W tabeli 6.2 przedstawiono wartości tych średnic mierzone przy dolnej podstawie kształtowanego stopnia. Zgodnie z wynikami obliczeń wraz ze wzrostem średnicy otworu kalibrującego matrycy zwiększa się też wartość bezwzględna przyrostu średnicy kołnierza. Pomiar średnic rzeczywistych wyrobów nie wykazuje takiej zależności, niemniej jednak odchyłki wymiarów (w odniesieniu do nominalnej wartości średnicy otworu kalibrującego matrycy) są stosunkowo niewielkie i warunkach rzeczywistych nie przekraczają 1,7%.

Tabela 6.2. Średnica stopnia odkuwki drążonej w strefie znajdującej się od strony pojemnika dolnego

D_k [mm]	Średnica stopnia w strefie znajdującej się od strony pojemnika dolnego	
	MES [mm]	Doświadczenie [mm]
23	$D_k + 0,23$	$D_k + 0,17$
24	$D_k + 0,26$	$D_k + 0,40$
25	$D_k + 0,43$	$D_k + 0,40$
26	$D_k + 0,66$	$D_k + 0,29$
27	$D_k + 1,06$	$D_k + 0,21$



Ryc. 6.22. Przebieg siły przyłożonej do stempla w funkcji jego przemieszczenia dla procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z zastosowaniem wsadu w postaci rury kształtowanego z wykorzystaniem matrycy o kącie pochylenia strefy stożkowej $\beta = 40^\circ$ oraz redukcji przekroju poprzecznego wsadu równej $\delta_r = 10\%$: a) wyniki uzyskane z obliczeń numerycznych, b) wyniki uzyskane w badaniach doświadczalnych

Przebiegi zmienności siły przyłożonej do stempla w funkcji jego przemieszczenia przedstawiono na rycinie 6.22. Dane zawierają informacje od początku procesu do momentu zakończenia jednoczesnego ruchu stempla, matrycy i pojemnika górnego. Wykresy wykonano na bazie danych źródłowych, które poddano aproksymacji za pomocą modeli wielomianowych przypisanych do podzbiorów danych.

Przebiegi sił wyznaczone teoretycznie i doświadczalnie pod względem jakościowym wykazują stosunkowo dobrą zgodność. W początkowej fazie procesu, kiedy to przemieszcza się tylko stempel, przyrost siły jest niemal liniowy. Wprawienie matrycy i pojemnika górnego w ruch powoduje spadek wartości siły przyłożonej do stempla, co wiąże się ze zmniejszeniem długości fragmentu wsadu znajdującego się w pojemniku górnym. Ponadto wraz z postępem spęczniania zmniejsza się powierzchnia kontaktu odkształcanego materiału z trzpieniem, czego skutkiem jest mniejszy udział sił tarcia w procesie.

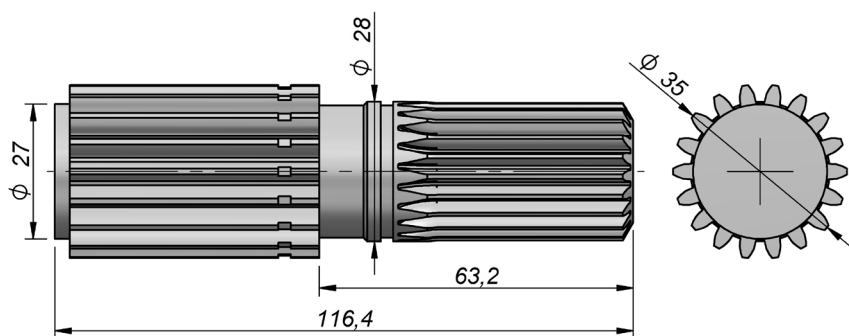
Pod względem ilościowym wartości sił uzyskane w obliczeniach numerycznych są wyraźnie wyższe od tych wyznaczonych doświadczalnie. Jedną z przyczyn tego zjawiska (poza wymienionymi podczas analizy sił kształtowania wsadu w postaci pręta) może być fakt, iż w symulacjach materiał wsadu kontaktuje się z trzpieniem na całej długości odkuwki, zaś na podstawie obserwacji próbek rzeczywistych (zob. ryc. 6.21) można stwierdzić, że powierzchnia otworu odkuwek nie jest jednorodna – widoczne są i strefy błyszczące, i matowe. Na tej podstawie można wnioskować, że strefy błyszczące kontaktowały się z trzpieniem, zaś matowe nie. Z tego względu w warunkach rzeczywistych powierzchnia kontaktu wsadu z trzpieniem jest mniejsza niż w obliczeniach numerycznych, co wpływa na wartości sił kształtowania.

7. Przykład zastosowania technologii spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

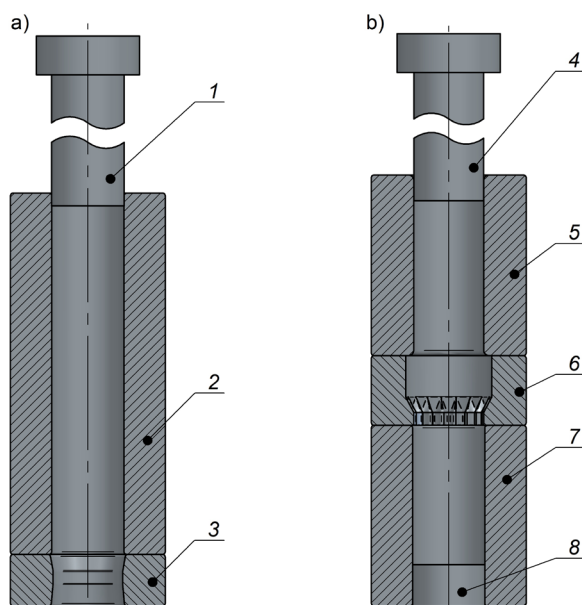
Technologia spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu może być stosowana do kształtowania odkuwek stopniowanych ze wsadu zarówno w postaci pręta, jak i rury. Metoda ta może zostać wykorzystana jako jedyna do plastycznego kształtowania części albo dołączyć do szeregu etapów wielooperacyjnego procesu kształtowania odkuwki. W niniejszym rozdziale przedstawiono dwa przykłady zastosowania omawianej technologii. Wytypowano odkuwki, których wykonanie wymaga więcej niż jednej operacji, a dla których wsadem w pierwszym przypadku jest odcinek pręta, zaś w drugim – fragment rury.

7.1. Kształtowanie odkuwki wału przeniesienia napędu

Proces spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu może być stosowany do wytwarzania odkuwek stopniowanych wykonanych m.in. z pręta. W zależności od kształtu przekroju poprzecznego matrycy w części kalibrującej możliwe są do uzyskania wyroby nie tylko o stopniach walcowych, ale m.in. także takie posiadające uzębienie. Przykładem takiego produktu jest wał przeniesienia napędu stosowany w przekładniach planetarnych napędzających przednie koła ciągników rolniczych (ryc. 7.1). Uzębienie widoczne z lewej strony części posiada 18 zębów o module równym 1,75 mm i współpracuje ono z kołami obiegowymi przekładni.



Ryc. 7.1. Wybrane wymiary wału przeniesienia napędu



Ryc. 7.2. Schemat narzędzi wykorzystanych w procesie kształtowania odkuwki wału przeniesienia napędu: a) wyciskanie współbieżne, b) spęczniania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu; opis w tekście

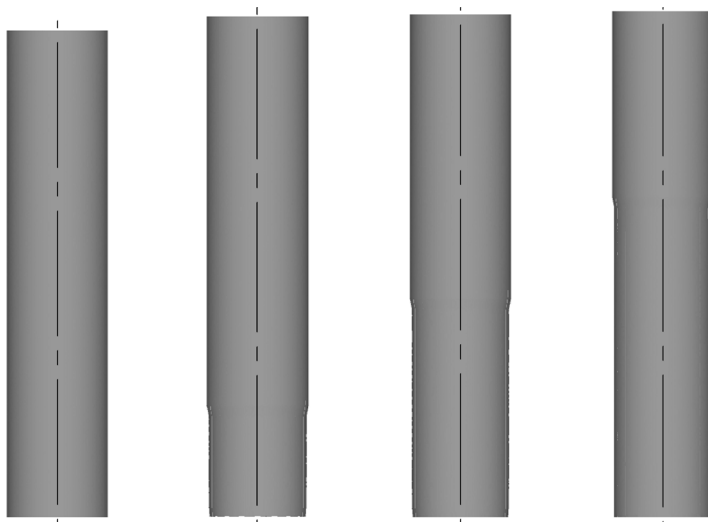
Przyjęto, że odkuwka powyższej części wykonana zostanie w dwóch kolejnych etapach:

- pierwszy polega na wyciskaniu współbieżnym, którego schemat przedstawiono na rycinie 7.2a – po umieszczeniu wsadu w postaci odcinka pręta w pojemniku 2 w ruch wprowadzany jest stempel 1, co powoduje, że materiał wyciskany jest przez matrycę 3, dzięki czemu uzyskuje się przedkuwkę o dwóch średnicach na długości,

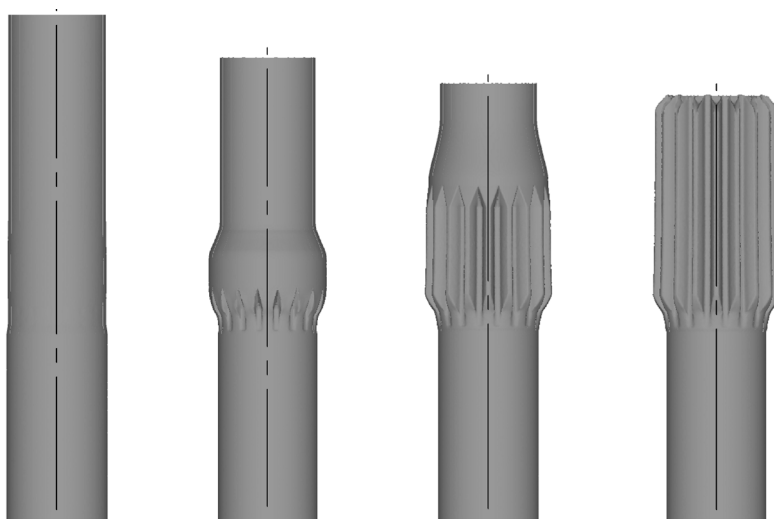
- drugi polega na spęczaniu ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu (ryc. 7.2b) – fragment przedkuwki o większej średnicy umieszczany jest w wykroju pojemnika dolnego 7, który od dołu zamknięty jest za pomocą wyrzutnika 8; pozostała część przedkuwki znajduje się w strefie wykroju matrycy 6 i pojemnika górnego 5; nacisk stempla 4 na materiał odkształcany powoduje wypełnianie wykroju matrycy, co zapewnia uzyskanie uzębienia w spęczanej strefie odkuwki, zaś ruch tego narzędzia oraz pojemnika górnego (przeciwbieżny do ruchu stempla) umożliwia przyrost długości kształtowanego stopnia.

Przedstawiony proces wykonania odkuwki wału przeniesienia napędu zweryfikowano za pomocą obliczeń numerycznych zrealizowanych metodą elementów skończonych w programie Deform-2D/3D. Przyjęto wsad w postaci odcinka pręta o średnicy $\varnothing 28$ mm i długości równej 135 mm. Jako materiał odkształcany zastosowano stal 42CrMo4, której model pobrano z bazy programu. W obliczeniach zastosowano symetrię cykliczną i wykonano je dla wycinka odkuwki (zawierającego jeden ząb) o kącie wierchołkowym równym 20° . Dzięki takiemu podejściu uzyskano stosunkowo dobre zagęszczenie siatki elementów skończonych w strefie kształtowanego uzębienia. Proces dyskretyzacji wsadu przeprowadzono za pomocą elementów tetragonalnych czterowęzłowych w liczbie ok. 150 tys. Zastosowano współczynnik wymiany ciepła pomiędzy wsadem, a narzędziami o wartości $10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pierwszą operację (z uwagi na niewielką redukcję średnicy wsadu) zrealizowano w warunkach obróbki plastycznej na zimno w temperaturze 20°C , drugą – w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, stosując początkową temperaturę wsadu 1100°C i narzędzi równą 250°C . Warunki kontaktu pomiędzy ww. obiektami opisano za pomocą modelu tarcia stałego o wartości czynnika tarcia równej 0,1 oraz 0,3 odpowiednio dla pierwszej i drugiej operacji. Prędkość stempla podczas wyciskania współbieżnego wynosiła 50 mm/s, zaś podczas spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu 100 mm/s. Ponadto prędkość matrycy podczas spęczania wynosiła 309,64 mm/s.

Progresję kształtu odkuwki wału przeniesienia napędu w procesie wyciskania współbieżnego przedstawiono na rycinie 7.3. W procesie tym kształtowany jest (wskutek redukcji średnicy wsadu) fragment odkuwki, z którego wykonany zostanie stopień posiadający 18 zębów o module 1,75 mm (zob. ryc. 7.1). Z kolei nieodkształcona część przedkuwki stanowić będzie stopień o długości 63,2 mm (zob. ryc. 7.1), który finalnie wykonany będzie metodą wykańczającej obróbki ubytkowej, której zostanie poddana cała odkuwka.



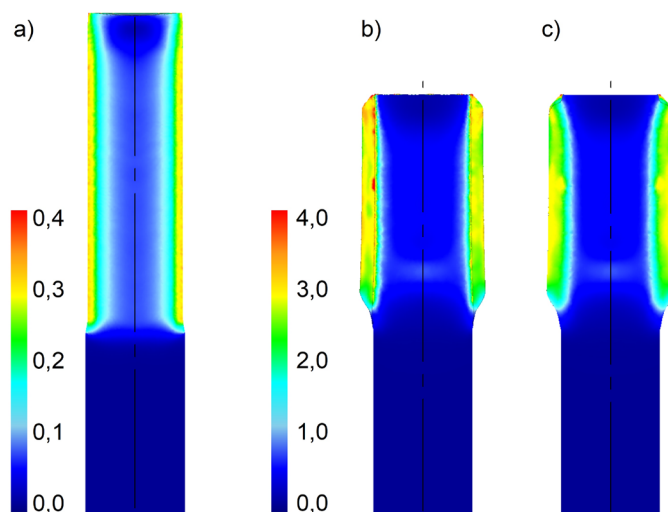
Ryc. 7.3. Progresja kształtu odkuwki wału przeniesienia napędu w procesie wyciskania współbieżnego



Ryc. 7.4. Progresja kształtu odkuwki wału przeniesienia napędu w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

W procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu kształtowany jest uzębiony stopień odkuwki o największej średnicy (zob. ryc. 7.4). W początkowej fazie przemieszcza się tylko stempel, który powoduje, że odkształcany materiał stopniowo wypełnia wykrój matrycy. Wykrój ten posiada uzębienie wewnętrzne, które kształtuje uzębienie zewnętrzne odkuwki. Po wprowadzeniu

w ruch pojemnika górnego i matrycy następuje przyrost długości spęczanego stopnia, zaś w końcowej fazie procesu (polegającej na wypychaniu wyrobu z matrycy) w dalszym ciągu kształtowany jest stopień z uzębieniem, co umożliwia nadanie odkuwce ostatecznego kształtu.

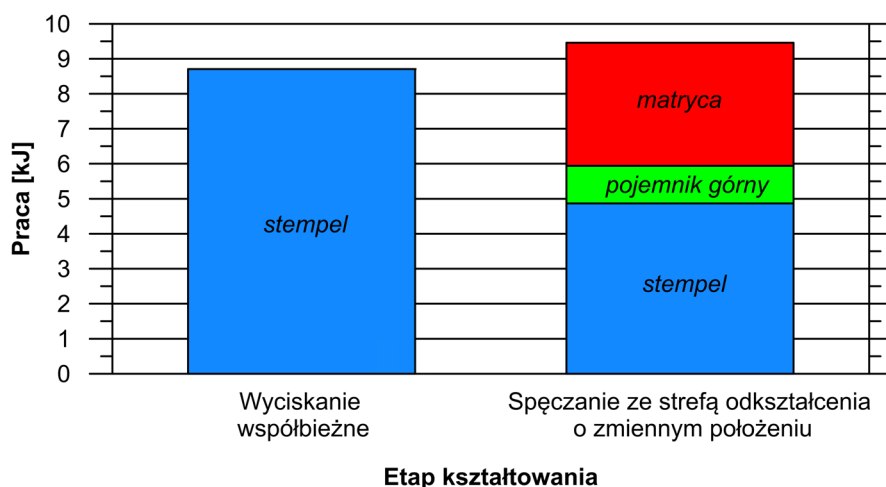


Ryc. 7.5. Rozkład intensywności odkształcenia (w przekroju osiowym) na różnych etapach kształtowania odkuwki wału przeniesienia napędu; wyrób po procesie: a) wyciskania współbieżnego, b) spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu – przekrój przez wręby, c) spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu – przekrój przez zęby

Na rycinie 7.5 przedstawiono rozkład intensywności odkształcenia w poszczególnych etapach kształtowania odkuwki analizowanej części. W procesie wyciskania współbieżnego maksymalne wartości badanego parametru sięgają do 0,4 i zlokalizowane są przy powierzchni zewnętrznej wyciśniętego stopnia. Wartości te są stosunkowo niewielkie, co wynika z faktu, iż w tej operacji średnica wsadu redukowana jest o 1 mm. Drugi etap kształtowania (polegający na spęczaniu ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu) powoduje, że wartości odkształcenia w ww. strefie rosną do ok. 4, koncentrując się w strefie zębów i wrębów, co wynika z przyjętego schematu kształtowania.

Analizę zaproponowanej technologii przeprowadzono również pod kątem jej energochłonności. Na rycinie 7.6 przedstawiono pracę sił przyłożonych do poszczególnych narzędzi. Nawet pomimo tego, że pierwsza operacja realizowana jest w warunkach obróbki plastycznej na zimno, to charakteryzuje się nieznacznie mniejszą energochłonnością (o ok. 8%) niż druga, realizowana na gorąco. Wynika to z faktu, iż w trakcie spęczania uzyskiwane są dużo większe

odkształcenia niż podczas wyciskania, a dodatkowo w trakcie trwania tego procesu przemieszczają się trzy narzędzia, które wymagają przyłożenia do nich sił o odpowiednich wartościach.



Ryc. 7.6. Energochłonność poszczególnych etapów kształtowania odkuwki wału przeniesienia napędu

7.2. Kształtowanie odkuwki tulei obrotowej

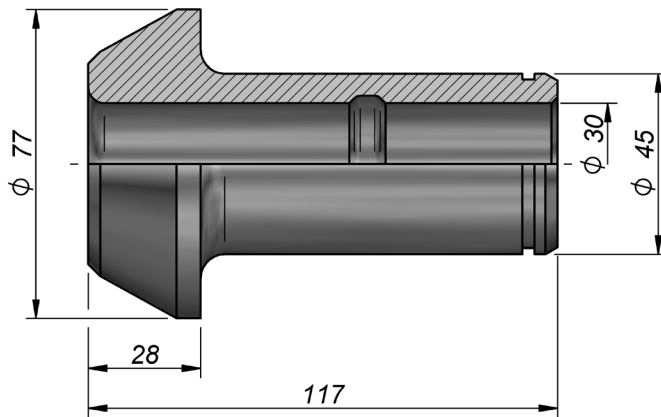
Możliwości aplikacyjne technologii spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu z wykorzystaniem wsadu w postaci rury zostały przedstawione na przykładzie tulei obrotowej. Tuleja, którą przedstawiono na rycinie 7.7, wykorzystywana jest w przemyśle górniczym i służy do mocowania noży obrotowych, których zadaniem jest urabianie różnego rodzaju skał.

Założono, że odkuwka tulei obrotowej zostanie wykonana w trzech następujących etapach:

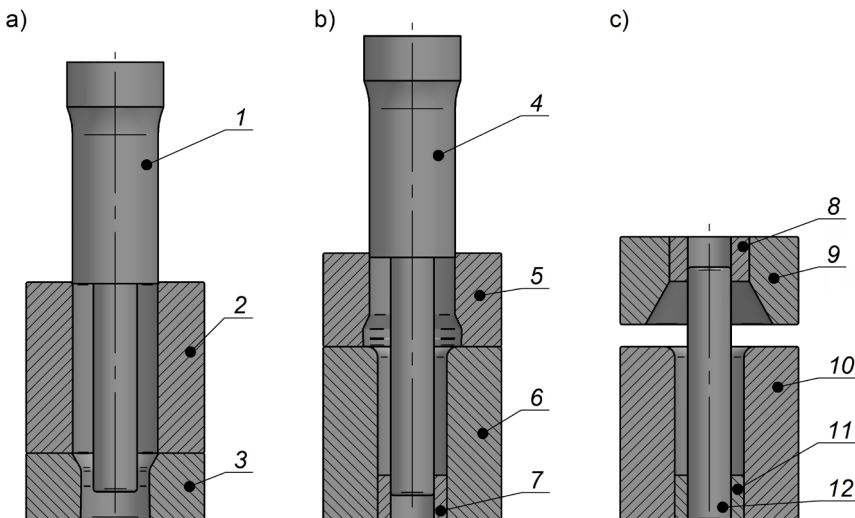
- pierwszy etap kształtowania polega na wyciskaniu współbieżnym zgodnie ze schematem przedstawionym na rycinie 7.8a; po umieszczeniu odcinka rury w pojemniku 2 w ruch wprowadzany jest stempel 1, co przy udziale matrycy 3 prowadzi do redukcji grubości ścianki wsadu na określonej długości,
- w drugim etapie odkuwka kształtowana jest metodą spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu (zob. ryc. 7.8b); narzędzia stosowane w tej operacji to: stempel 4, pojemnik górny 5, pojemnik dolny 6

oraz wyrzutnik 7; wskutek nacisku stempla na materiał odkształcany, połączonego z jednoczesnym ruchem pojemnika górnego (w kierunku przeciwnym do ruchu stempla), dochodzi do zwiększenia grubości ścianki odkuwki na określonej długości przy zachowaniu stałej średnicy wewnętrznej na całej długości wyrobu,

- ostatni etap kształtowania polega na spęczaniu w wykroju stożkowym (ryc. 7.8c); w tej operacji stempel 8 i matryca górna 9 przemieszczają się z taką samą prędkością, podczas gdy matryca dolna 10, wyrzutnik 11 oraz trzpień 12 pozostają nieruchome.

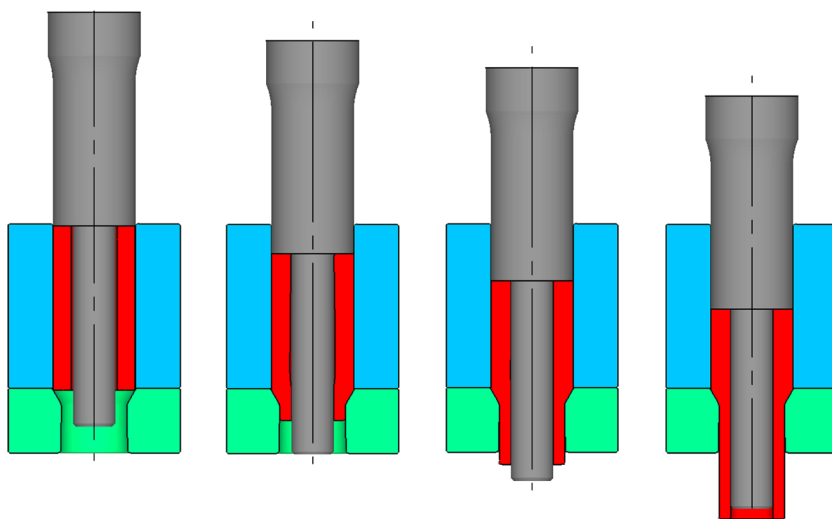


Ryc. 7.7. Tuleja obrotowa



Ryc. 7.8. Schemat narzędzi wykorzystanych do realizacji procesu: a) wyciskania współbieżnego, b) spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, c) spęczania w wykroju stożkowym

Weryfikację przyjętej koncepcji kształtowania odkuwki tulei obrotowej przeprowadzono w oparciu o obliczenia numeryczne. Wykonano je w programie Deform-2D/3D, wykorzystującym metodę elementów skończonych. Założono, że wyrób kształtowany będzie w warunkach osiowosymetrycznego stanu naprężenia i odkształcenia. Jako wsad przyjęto odcinek rury wykonanej ze stali 42CrMo4 o średnicy zewnętrznej $\varnothing 57$ mm i grubości ścianki 12,5 mm; model materiałowy stopu pobrano z bazy programu. Proces dyskretyzacji wsadu przeprowadzono za pomocą elementów czworokątnych, czterowęzłowych. Przyjęto, że wyrób będzie kształtowany w warunkach obróbki plastycznej na zimno, przyjęto więc początkową temperaturę wsadu i narzędzi równą 20 °C. Warunki kontaktu pomiędzy ww. elementami opisano modelem tarcia stałego, dla którego czynnik tarcia zdefiniowano na poziomie 0,1; współczynnik przewodzenia ciepła pomiędzy tymi obiektami uznano za równy 10 kW/(m² · K). Prędkość stempla w każdej operacji wynosiła 50 mm/s, natomiast pojemnika górnego w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu – 116,58 mm/s.

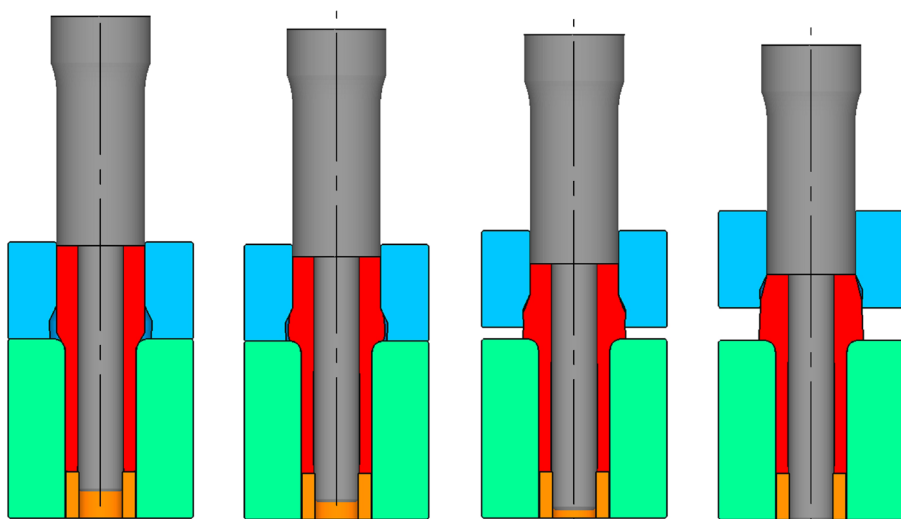


Ryc. 7.9. Progresja kształtu odkuwki tulei obrotowej w procesie wyciskania współbieżnego

Progresję kształtu odkuwki tulei obrotowej w procesie wyciskania współbieżnego przedstawiono na rycinie 7.9. W początkowej fazie wyciskania, gdy materiał odkształcany wypełnia strefę stożkową matrycy, dochodzi zarazem do wzrostu grubości ścianki wsadu. Z uwagi na fakt, iż średnica trzpienia jest mniejsza od średnicy wewnętrznej wsadu, natomiast średnica otworu w pojemniku odpowiada średnicy zewnętrznej wsadu, to wzrost grubości ścianki

odbywa się wskutek płynięcia materiału w kierunku osi symetrii wyrobu i narzędzi. Kontynuacja procesu polega przede wszystkim na redukcji grubości ścianki wsadu i kształtowaniu części trzonowej odkuwki, z której wykonany zostanie stopień tulei obrotowej o średnicy zewnętrznej równej $\varnothing 45$ mm.

Uzyskana wypraska stanowi wsad do drugiej operacji, w której metodą spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu ukształtowana zostanie część kołnierzowa odkuwki (zob. ryc. 7.10). W operacji tej dochodzi do wzrostu średnicy zewnętrznej odkuwki, ale tylko w strefie kołnierza, przy zachowaniu stałej średnicy wewnętrznej na całej długości wyrobu.

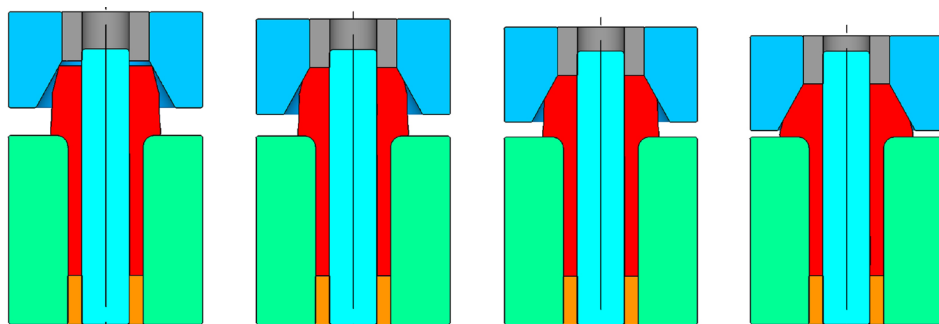


Ryc. 7.10. Progresja kształtu odkuwki tulei obrotowej w procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu

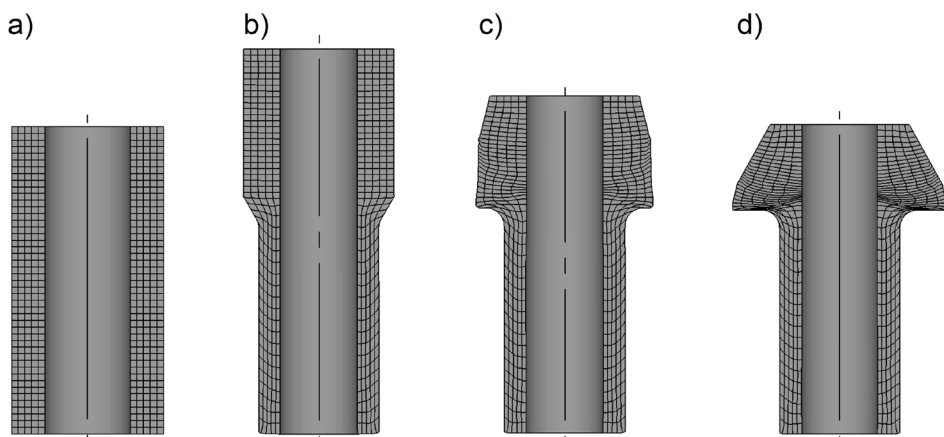
Ostateczny kształt kołnierza odkuwki uzyskiwany jest w toku trzeciej operacji polegającej na spęczaniu w wykroju stożkowym (zob. ryc. 7.11). Fragment odkuwki podlegający odkształceniu ma w ramach tego zabiegu na tyle dużą grubość ścianki w odniesieniu do jego wysokości i średnicy zewnętrznej, że podczas spęczania nie dochodzi do jej lokalnego wyboczenia, które mogłoby przyczynić się do powstania zakucia.

Widok siatki koordynacyjnej na poszczególnych etapach kształtowania odkuwki tulei obrotowej przedstawiono na rycinie 7.12. Po procesie wyciskania współbieżne pionowe linie siatki stały się równoległe do zarysu zewnętrznego części. Z kolei poziome linie siatki w części trzonowej w strefie przypowierzchniowej odchyliły się ku górze. Po procesie spęczania ze strefą

odkształcenia o zmiennym położeniu można zaobserwować, że przy podstawie dolnej kołnierza odkuwki pionowe linie siatki są nieco bardziej odchylone na zewnątrz wyrobu niż w górnej jego części. Jak wykazały wcześniejsze analizy procesu, układ linii w dolnej części kołnierza tworzony jest w początkowej fazie spęczania (przed wprawieniem w ruch pojemnika górnego), kiedy to materiał znacząco płynie w kierunku promieniowym. W odniesieniu do układu siatki koordynacyjnej po procesie spęczania w wykroju stożkowym, tj. układu w uformowanej odkuwce, można stwierdzić, że największe zagęszczenie linii siatki w kierunku osiowym występuje w części kołnierza w strefie o największej średnicy zewnętrznej, czyli w pobliżu jego dolnej podstawy.

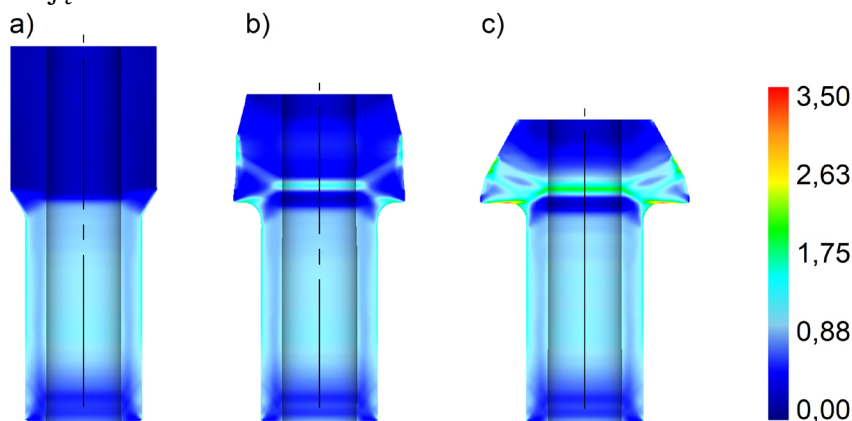


Ryc. 7.11. Progresa kształtu odkuwki tulei obrotowej w procesie spęczania w wykroju stożkowym



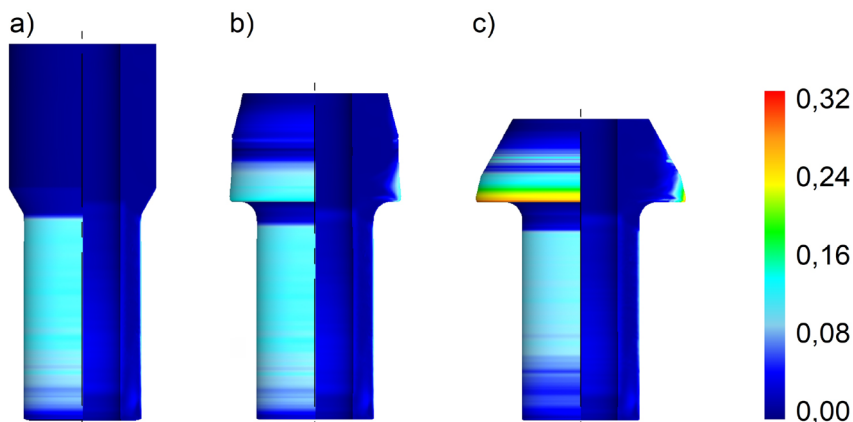
Ryc. 7.12. Widok siatki koordynacyjnej na różnych etapach kształtowania odkuwki tulei obrotowej: a) wsad, b) odkuwka po procesie wyciskania współbieżnego, c) odkuwka po procesie spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, d) odkuwka po procesie spęczania w wykroju stożkowym

Układ linii siatki koordynacyjnej jest ściśle związany z rozkładem intensywności odkształcenia, który przedstawiono na rycinie 7.13. Po procesie wyciskania współbieżnego największe wartości intensywności odkształcenia koncentrują się w części trzonowej odkuwki – to typowy rozkład dla tak zrealizowanej operacji. Z kolei po zastosowaniu procesu spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu w części kołnierzowej pojawiają się wartości odkształcenia zbliżone do tych ze strefy trzonowej odkuwki. W obszarach, gdzie doszło do większego odchylenia linii siatki koordynacyjnej, obserwuje się również koncentrację odkształcenia. W gotowej odkuwce rozkład intensywności odkształcenia jest zbliżony do tego, jaki uzyskano po operacji drugiej. W górnej części kołnierza odkuwki wartości odkształcenia są najmniejsze, co wynika z przyjętej technologii wykonania części, geometrii wsadu i wyrobu; w pozostałych strefach pozostają zbliżone.

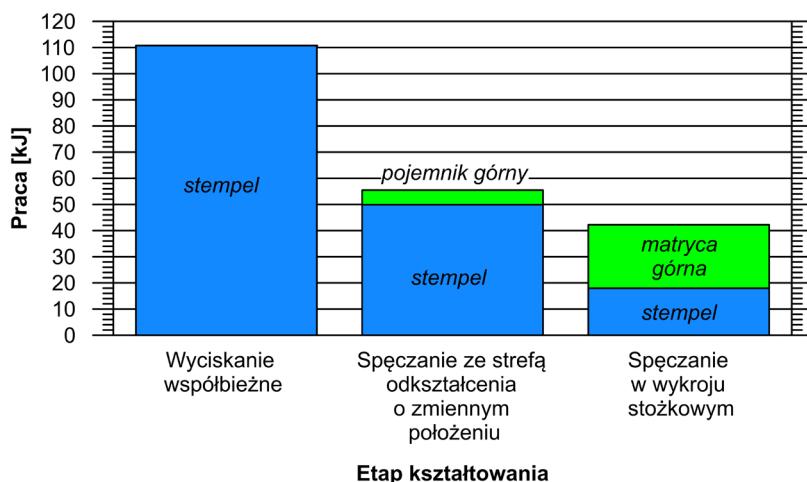


Ryc. 7.13. Rozkład intensywności odkształcenia na różnych etapach kształtowania odkuwki tulei obrotowej; wyrób po procesie: a) wyciskania współbieżnego, b) spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, c) spęczania w wykroju stożkowym

Z uwagi na fakt, iż analizowana odkuwka tulei obrotowej kształtowana jest w warunkach obróbki plastycznej na zimno istotne jest, aby podczas procesu wytwarzania nie doszło do utraty spójności materiału. Z tego względu na rycinie 7.14. przedstawiono rozkład wartości całki wg znormalizowanego kryterium pęknięcia Cockcrofta-Lathama na różnych etapach kształtowania. Po pierwszej i drugiej operacji maksymalne wartości całki są zbliżone, z kolei po trzeciej obserwuje się ich wzrost przede wszystkim w strefie kołnierza o największej średnicy. Maksymalne wartości całki występujące w gotowej odkuwce sięgają do ok. 0,3, podczas gdy wartość krytyczna wynosi ok. 0,5, co oznacza, że ryzyko utraty spójności materiału jest niewielkie.



Ryc. 7.14. Rozkład wartości całki wg znormalizowanego kryterium pękania Cockcrofta-Lathama na różnych etapach kształtowania odkuwki tulei obrotowej; wyrób po procesie: a) wyciskania współbieżnego, b) spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, c) spęczania w wykroju stożkowym



Ryc. 7.15. Energochłonność poszczególnych etapów kształtowania odkuwki tulei obrotowej

Poszczególne etapy kształtowania odkuwki tulei obrotowej porównano pod względem energochłonności rozumianej jako praca sił przyłożonych do poszczególnych narzędzi. Z przedstawionych na rycinie 7.15 danych wynika, że najbardziej energochłonny jest proces wyciskania współbieżnego. Poza tym spęczanie ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu jest o ok. 31% bardziej energochłonne od spęczania w wykroju stożkowym. Należy mieć na uwadze, że w drugiej operacji redukcja długości odkuwki jest o 70% większa niż w trzeciej.

8. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych dotyczących nowej, autorskiej technologii kształtowania wyrobów stopniowanych polegającej na spęczaniu ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu. Analizę procesu rozpoczęto od obliczeń wykonanych metodą elementów skończonych. W celu budowy modelu numerycznego wykonano badania wstępne, które pozwoliły na określenie zależności naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia badanego materiału, wyznaczenie warunków tarcia oraz analizę zjawiska wyboczenia wsadów drążonych i pełnych. Z kolei na potrzeby weryfikacji doświadczalnej technologii zaprojektowano i wykonano specjalistyczny przyrząd zapewniający odpowiednią kinematykę narzędzi (niezbędną do prawidłowej realizacji procesu), który montowany jest w przestrzeni roboczej uniwersalnej prasy hydraulicznej. Wybrane komponenty przyrządu napędzane są za pomocą suwaka prasy, natomiast pozostałe elementy ruchome przemieszczają się wskutek przyłożenia do nich siły wywieranej przez siłowniki hydrauliczne dwustronnego działania. Przemieszczenie tych ostatnich jest zsynchronizowane z przemieszczeniem suwaka prasy, co zapewnia odpowiedni stosunek prędkości narzędzi kontaktujących się z odkształcanym materiałem. Badania dotyczące procesu zostały ukierunkowane na określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych na przebieg spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu, jakość wyrobu oraz na wykazanie możliwości

aplikacyjnych nowej technologii. Zrealizowane prace stały się podstawą do sformułowania następujących wniosków końcowych:

- metodą spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu możliwe jest kształtowanie wyrobów stopniowanych ze wsadu zarówno w postaci odcinka pręta, jak i fragmentu rury,
- realizację procesu zapewnia zastosowanie specjalistycznego przyrządu montowanego w przestrzeni roboczej uniwersalnej prasy hydraulicznej. Odpowiednią kinematykę narzędzi zapewnia mechaniczne połączenie suwaka prasy z układem regulacji prędkości matrycy i pojemnika górnego,
- dzięki modułowej konstrukcji przyrządu i wymianie tylko podstawowych komponentów składowych możliwe jest kształtowanie stopniowanych odkuwek pełnych i drażonych przy zastosowaniu różnych parametrów,
- kluczowymi parametrami technologicznymi procesu są średnica otworu kalibrującego matrycy i kąt pochylenia jej strefy stożkowej oraz wartość redukcji przekroju poprzecznego wsadu. Parametry te mają wpływ na kształt i wymiary odkuwki, rozkład wartości intensywności odkształcenia i temperatury, stan naprężenia, układ siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym wyrobu oraz parametry siłowe procesu,
- do zjawisk ograniczających technologii zaliczyć można: możliwość wyboczenia wsadu w początkowej fazie procesu; niewypełnienie wykroju skutkujące brakiem materiału w skrajnych końcach kształtowanego stopnia; możliwość powstania zakucia na powierzchni bocznej stopnia; niezamierzony wzrost średnicy zewnętrznej odkuwki,
- metoda spęczania ze strefą odkształcenia o zmiennym położeniu może zostać wykorzystana do plastycznego kształtowania części jako jedyna albo w szeregu etapów wielooperacyjnego procesu kształtowania odkuwki. Wskazuje to na jej elastyczność oraz zwiększa zakres jej zastosowania, umożliwiając wytwarzanie wyrobów o złożonej geometrii.

Literatura

- [1] Abd-Eltwab A.A. *et al.*: *An investigation into forming internally-spline sleeves by ball spinning*. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 134, 399–410.
- [2] Aliiev I.S. *et al.*: *The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129, 1345–1353.
- [3] Al-Sabur R. *et al.*: *Analysis of surface texture and roughness in composites stiffening ribs formed by SPIF process*. Materials, 2023, 16, 1–11.
- [4] Alves L.M. *et al.*: *Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250, 182–189.
- [5] Bajor T., Krakowiak M., Szota P.: *Numerical analysis of AZ61 magnesium alloy extrusion process by modified equal channel angular extrusion (ECAE) method*. Metalurgija, 2014, 53, 485–488.
- [6] Balawender T., Zwolak M., Bąk Ł.: *Experimental analysis of mechanical characteristics of KOBO extrusion method*. Archives of Metallurgy and Materials, 2020, 65, 615–619.
- [7] Bednarczyk I., Kuc D.: *The influence of the deformation method on the microstructure and properties of magnesium alloy Mg-Y-RE-Zr*. Materials, 2022, 15, 1–15.
- [8] Bednarczyk I. *et al.*: *The influence of extrusion process on the microstructure and mechanical properties of magnesium alloys*. Archives of Metallurgy and Materials, 2017, 62, 545–550.
- [9] Bell C. *et al.*: *A state of the art review of hydroforming technology. Its applications, research areas, history, and future in manufacturing*. International Journal of Material Forming, 2020, 13, 789–828.

- [10] Bulzak T., Pater Z., Tomczak J.: *Numerical and experimental analysis of a cross wedge rolling process for producing ball studs*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17, 729–737.
- [11] Bulzak T. et al.: *Study of CNC skew rolling of hollow rail axles with a mandrel*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, 24, 1–15.
- [12] Bulzak T. et al.: *A comparative study of helical and cross-wedge rolling processes for producing ball studs*. Materials, 2019, 12, 1–11.
- [13] Cao X. et al.: *Exploratory experiment and numerical simulation investigation on a novel flexible skew rolling of hollow shafts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116, 3391–3403.
- [14] Centeno G. et al.: *Towards the characterization of fracture in thin-walled tube forming*. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 119, 12–22.
- [15] Che X. et al.: *An investigation on the microstructure and texture of an AZ80 cup-shaped piece processed by rotating backward extrusion*. Materials, 2020, 13, 1–11.
- [16] Che X. et al.: *Numerical and experimental analysis of rotating backward extrusion as a new SPD process*. Metals and Materials International, 2020, 26, 1786–1796.
- [17] Chen S. et al.: *A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners*. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 137, 1–14.
- [18] Chu G. et al.: *Axial hydro-forging sequence for variable-diameter tube of 6063 aluminum alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 272, 87–99.
- [19] Chu G.N. et al.: *Tube hydro-forging – a method to manufacture hollow component with varied cross-section perimeters*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265, 150–157.
- [20] Cristino V.A. et al.: *Theory of single point incremental forming of tubes*. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 287, 1–8.
- [21] Deng J. et al.: *Numerical simulation and experimental study on two-stage flow forming for thin-walled tubular parts with deep longitudinal outer ribs*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125, 2517–2533.
- [22] Długosz P. et al.: *The influence of conventional or KOBO extrusion process on the properties of AZ91 (MgAl₉Zn₁) alloy*. Materials, 2021, 14, 1–15.
- [23] Dobkowska A. et al.: *Corrosion behavior of fine-grained Mg-7.5Li-3Al-1Zn fabricated by extrusion with a forward-backward rotating die (KoBo)*. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10, 811–820.
- [24] Dond S.K. et al.: *Determination of magnetic coupling and its influence on the electro-magnetic tube forming and discharge circuit parameters*. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54, 19–27.
- [25] Duflou J.R. et al.: *Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects*. International Journal of Material Forming, 2018, 11, 743–773.
- [26] Ekinovica S. et al.: *Assessment of the surface topography of Al 99.5% tubular products formed by cold flow forming technology*. Procedia Engineering, 2015, 132, 389–396.
- [27] Gao P. et al.: *A new spinning-extrusion forming technology for the inner-ribbed component*. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 279, 1–15.
- [28] Ghiotti A. et al.: *Severe plastic deformation by constrained backward flowforming*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2022, 71, 253–256.

- [29] Gontarz A., Winiarski G.: *Numerical and experimental study of producing flanges on hollow parts by extrusion with a movable sleeve*. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60, 1917–1921.
- [30] Gronostajski Z. *et al.*: *Recent development trends in metal forming*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19, 898–941.
- [31] Gryc A., *et al.*: *Physical modelling of plastic deformation conditions for the rolling process of AZ31 bars in a three high skew rolling mill*. Metalurgija, 2014, 53, 489–492.
- [32] Grzancic G. *et al.*: *Innovative machine design for incremental profile forming*. Key Engineering Materials, 2014, 622–623, 413–419.
- [33] Grzancic G., Hiegemann L., Khalifa N.B.: *Investigation of new tool design for incremental profile forming*. Procedia Engineering, 2017, 207, 1767–1772.
- [34] Grzancic G. *et al.*: *Analytical prediction of wall thickness reduction and forming forces during the radial indentation process in incremental profile forming*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267, 68–79.
- [35] Guan Y. *et al.*: *A novel combined process of flaring-upsetting for forming end flanges on thin-walled tubes*. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84, 927–936.
- [36] Han X. *et al.*: *An innovative radial envelope forming method for manufacturing thinwalled cylindrical ring with inner web ribs*. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 286, 1–14.
- [37] Hawryluk M. *et al.*: *An integrated vision control system for the evaluation of the shape-dimensional accuracy and quality of valve forgings used in motor truck engines*. Measurement, 2023, 210, 1–12.
- [38] Hawryluk M. *et al.*: *Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel*. Wear, 2023, 528–529, 1–20.
- [39] Hawryluk M. *et al.*: *Development and implementation of die forging technology eliminating flange welding operations in conveyor driver forging*. Materials, 2024, 17, 1–18.
- [40] Hawryluk M., Suliga M., Więclaw M.: *Application of physical modeling with the use of soft model materials for the analysis and optimization of metal extrusion processes*. Physical Mesomechanics, 2022, 25, 57–71.
- [41] Hou X. *et al.*: *Modeling and analysis of multi-pass progressive flanging force of copper tube end*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121, 4703–4712.
- [42] Hu H *et al.*: *AZ31 magnesium alloy tube manufactured by composite forming technology including extruded-shear and bending based on finite element numerical simulation and experiments*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115, 2395–2402.
- [43] Ishkina S. *et al.*: *Influence of process fluctuations on residual stress evolution in rotary swaging of steel tubes*. Materials, 2019, 12, 1–13.
- [44] Jafarzadeh H., Faraji G., Dizaji A.F.: *Analysis of lateral extrusion of gear-like form parts*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26, 3243–3252.
- [45] Ji H. *et al.*: *A new method for manufacturing hollow valves via cross wedge rolling and forging: Numerical analysis and experiment validation*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240, 1–11.

- [46] Ji H. *et al.*: *Constitutive relationship of 4Cr9Si2 and technological parameters on the inner bore of cross wedge rolling for preform hollow valves*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86, 2621–2633.
- [47] Ji H. *et al.*: *Cross-wedge rolling of a 4Cr9Si2 hollow valve: explorative experiment and finite element simulation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77, 15–26.
- [48] Kadkhodayan M., Erfani-Moghadam A.: *An investigation of the optimal load paths for the hydroforming of T-shaped tubes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61, 73–85.
- [49] Kalyuzhnyi V.L. *et al.*: *Investigation of hot combined extrusion of steel hollow conical parts*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46, 1–14.
- [50] Khodadadi M., Khalili K., Ashrafi A.: *Studying the effective parameters on teeth height in internal gear flowforming process*. International Journal of Engineering, 2020, 33, 2563–2571.
- [51] Knapieński M. *et al.*: *Analysis of copper welding parameters during the manufacture of tubular profiles using unconventional extrusion processes*. Materials, 2024, 17, 1–14.
- [52] Kocańda A.: *Development of orbital forging processes by using Marciniak rocking-die solutions*. Springer Vieweg: 60 Excellent Inventions in Metal Forming, 2015, 319–324.
- [53] Kochański A., Sadłowska H.: *Rapid tube hydroforming – The innovative casting-forming method for rapid prototyping*. Manufacturing Technology, 2020, 20, 195–199.
- [54] Kowalik M. *et al.*: *Non-symmetrical direct extrusion—analytical modelling, numerical simulation and experiment*. Materials, 2021, 14, 1–21.
- [55] Ku T.W.: *A combined cold extrusion for a drive shaft: A parametric study on tool geometry*. Materials, 2020, 13, 1–19.
- [56] Ku T.W.: *A study on two-stage cold forging for a drive shaft with internal spline and spur gear geometries*. Metals, 2018, 8, 1–18.
- [57] Ku T.W.: *Numerical and experimental investigations on residual stress and hardness within a cold forward extruded preform*. Materials, 2023, 16, 1–23.
- [58] Ku T.W., Kang B.S.: *Hardness-controlled tool fabrication and application to cold forging of inner race with skewed ball grooves*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74, 1337–1354.
- [59] Ku T.W., Kang B.S.: *Tool design and experimental verification for multi-stage cold forging process of the outer race*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15, 1995–2004.
- [60] Ku T.W., Kang B.S.: *Tool design for inner race cold forging with skew-type crossball grooves*. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214, 1482–1502.
- [61] Ku T.W., Kim L.H., Kang B.S.: *Multi-stage cold forging and experimental investigation for the outer race of constant velocity joints*. Materials and Design, 2013, 49, 368–385.
- [62] Kut S., Nowotyńska I.: *The effect of the extrusion ratio on load and die wear in the extrusion process*. Materials, 2023, 16, 1–15.
- [63] Kwapisz M. *et al.*: *Analysis of the alternate extrusion and multiaxial compression process*. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60, 149–152.

- [64] Kwapisz M. *et al.*: *Analysis of the effect of the tool shape on the stress and strain distribution in the alternate extrusion and multiaxial compression process*. Archives of Metallurgy and Materials, 2011, 56, 487–493.
- [65] Lachowicz M.M. *et al.*: *Metallographic evaluation of increased susceptibility to intermediate embrittlement of engine valve forgings made of NCF 3015 high nickel and chromium steel*. Materials, 2023, 16, 1–21.
- [66] Leśniak D. *et al.*: *Latest advances in extrusion processes of light metals*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, 24, 1–53.
- [67] Lin L. *et al.*: *Manufacturing large shafts by a novel flexible skew rolling process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118, 2833–2851.
- [68] Lin P. *et al.*: *Transfer mechanisms of folding defect for thin-walled tube end flanges formed by flaring-upsetting hybrid process*. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125, 321–336.
- [69] Lis K.: *An analysis of the effect of skew rolling parameters on the surface quality of C60 steel parts using classification models*. Materials, 2024, 17, 1–13.
- [70] Liu Y. *et al.*: *Material flow in infeed rotary swaging of tubes*. Materials, 2021, 14, 1–18.
- [71] Liu Z. *et al.*: *Numerical simulation and experiment study on hot extrusion process of 18Ni (250) maraging steel large fan shaft for aero-engines*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126, 2371–2386.
- [72] Luo W. *et al.*: *Study on compound spinning technology of large thin-walled parts with ring inner ribs and curvilinear generatrix*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98, 1199–1216.
- [73] Lyu W. *et al.*: *Rib filling behavior in flow forming of thin-walled tube with helical grid-stiffened ribs*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119, 2877–2894.
- [74] Lyu W. *et al.*: *Improvement of rib-grid structure of thin-walled tube with helical grid-stiffened ribs based on the multi-mode filling behaviors in flow forming*. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296, 1–12.
- [75] Ma J. *et al.*: *Residual contact pressure and elastic recovery of an assembled camshaft using tube hydroforming*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 32, 287–298.
- [76] Magrinho J.P. *et al.*: *On the formability limits of thin-walled tube inversion using different die fillet radii*. Thin-Walled Structures, 2019, 144, 1–11.
- [77] Maj P *et al.*: *Flow forming and heat-treatment of Inconel 718 cylinders*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 253, 64–71.
- [78] Michalczyk J., Wiewiórowska S.: *Thermomechanical analysis of the possibility of using new methods of complex extrusion for manufacturing the inner toothing of spline sleeves*. Archives of Metallurgy and Materials, 2020, 65, 1447–1453.
- [79] Milenin A. *et al.*: *Numerical optimization and practical implementation of the tube extrusion process of Mg alloys with micromechanical analysis of the final product*. Key Engineering Materials, 2016, 716, 55–62.
- [80] Movahedinia H. *et al.*: *An investigation on flaring process of thin-walled tubes using multistage single point incremental forming*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, 867–880.

- [81] Nakeenopakun N., Olarnrithinun S., Aue-u-lan Y.: *Development of a combined bulging-piercing technique to reduce forming load for a long semihollow stepped part*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121, 2063–2082.
- [82] Niknejad A., Moeinifard M.: *Theoretical and experimental studies of the external inversion process in the circular metal tubes*. Materials and Design, 2012, 40, 324–330.
- [83] Ou Z. *et al.*: *A new method of processing magnesium alloy thin-walled tube by direct extrusion and corrugated equal channel angular extrusion*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122, 4029–4039.
- [84] Paćko M. *et al.*: *T-shape connector hydroforming process analysis*. Key Engineering Materials, 2016, 716, 994–1002.
- [85] Pang H., Lowrie J., Ngaile G.: *Development of a non-isothermal forging process for hollow axle shafts*. Procedia Engineering, 2017, 207, 454–459.
- [86] Pang H., Ngaile G.: *Development of a non-isothermal forging process for hollow power transmission shafts*. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47, 22–31.
- [87] Pang H., Ngaile G.: *Development of a non-isothermal forging process for hollow power transmission shafts*. Procedia Manufacturing, 2018, 26, 1509–1516.
- [88] Pater Z.: *A comparison of two-roll and three-roll cross wedge rolling processes*. Advances in Science and Technology Research Journal, 2023, 17, 252–266.
- [89] Pater Z. *et al.*: *Producing hollow drive shafts by rotary compression*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15, 917–924.
- [90] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails*. Procedia Manufacturing, 2017, 11, 466–473.
- [91] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Analysis of a cross wedge rolling process for producing drive shafts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, 3075–3083.
- [92] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Multi-variant analysis of the cross wedge rolling process for producing railcar axles*. Advances in Science and Technology Research Journal, 2023, 17, 208–219.
- [93] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *New forming possibilities in cross wedge rolling processes*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18, 149–161.
- [94] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Novel cross wedge rolling method for producing railcar axles*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128, 3403–3413.
- [95] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Problems of forming stepped axles and shafts in a 3-roller skew rolling mill*. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9, 10434–10446.
- [96] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Li Z.: *Analysis of the use of variable angular parameter tools in cross-wedge rolling*. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83, 768–786.
- [97] Pater Z. *et al.*: *Forming of rail car axles in a CNC skew rolling mill*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20, 1–13.
- [98] Pawłowski B. *et al.*: *Failure analysis of shock absorber tubes*. Engineering Failure Analysis, 2017, 82, 533–539.

- [99] Phan T.H.L., Luyen T.T., Nguyen D.T.: *A study utilizing numerical simulation and experimental analysis to predict and optimize flange-forming force in open-die forging of C45 billet tubes*. Applied Sciences, 2023, 13, 1–17.
- [100] Presz W.: *Material flow in ultrasonic orbital microforming*. Metals, 2019, 9, 1–13.
- [101] Presz W.: *Ultrasonic orbital microforming- a new possibility in the forming of micro-parts*. Metals, 2018, 8, 1–14.
- [102] Psyk V. et al.: *Electromagnetic forming. A review*. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211, 787–829.
- [103] Puchlerska S. et al.: *Statistical analysis and optimisation of data for the design and evaluation of the shear spinning process*. Materials, 2021, 14, 1–22.
- [104] Qiu X.M. et al.: *A three-dimensional model of circular tube under quasi-static external free inversion*. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 75, 87–93.
- [105] Qiu X.M. et al.: *An improved theoretical model of a metal tube under free external inversion*. Thin-Walled Structures, 2014, 80, 32–37.
- [106] Samołyk G.: *Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear*. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213, 1692–1702.
- [107] Samołyk G.: *Podstawy teoretyczne i modelowanie prasowania obwiedniowego*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2012.
- [108] Samołyk G.: *Studies on stress and strain state in cold orbital forging a AlMgSi alloy flange pin*. Archives of Metallurgy and Materials, 2013, 58, 1183–1189.
- [109] Samołyk G.: *Studium procesu prasowania obwiedniowego tulei kołnierzowych*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2016.
- [110] Samołyk G.: *Wybrane zagadnienia technologii i teorii prasowania obwiedniowego*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2012.
- [111] Samołyk G., Tomczak J., Bartnicki J.: *Cold forming of AlCu4MgSi alloy by orbital forging*. Archives of Metallurgy and Materials, 2012, 57, 205–209.
- [112] Sawicki S., Szota P., Dyja H.: *Analysis of the bimetallic bars rolling during a skew rolling*. Archives of Materials Science and Engineering, 2008, 32, 53–56.
- [113] Şchiopu V., Luca D.: *A new net-shape plating technology for axisymmetric metallic parts using rotary swaging*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85, 2471–2482.
- [114] Shen J. et al.: *Theoretical study and prediction of the inner hole reduction and critical mandrel diameter in cross wedge rolling of hollow shaft*. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 294, 1–16.
- [115] Shen J. et al.: *Numerical and experimental research on cross wedge rolling hollow shafts with a variable inner diameter*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19, 1497–1510.
- [116] Shu C. et al.: *Microstructure evolution of three-roll skew-rolling formed hollow axles with uniform wall thickness*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121, 4069–4085.
- [117] Shu X.D. et al.: *Forming and uniformity of shaft parts without a stub bar by axial closed–open-type cross-wedge rolling*. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27, 1054–1063.

- [118] Skorulski G., Łukaszewicz A.: *Selected aspects in numerical analysis of cold extrusion of tubes using CAE system*. Proceedings of 21st International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 2022, 1–7.
- [119] Stefanik A. et al.: *Analysis of the aluminum bars in three-high skew rolling mill rolling process*. Solid State Phenomena, 2015, 220–221, 892–897.
- [120] Stefanik A. et al.: *Changes in the properties in bimodal Mg alloy bars obtained for various deformation patterns in the RSR rolling process*. Materials, 2022, 15, 1–16.
- [121] Stefanik A., Szota P., Mróz S.: *Analysis of the effect of rolling speed on the capability to produce bimodal-structure AZ31 alloy bars in the three-high skew rolling mill*. Archives of Metallurgy and Materials, 2020, 65, 329–335.
- [122] Szota P. et al.: *Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy*. Metalurgija, 2021, 60, 36–38.
- [123] Szpunar M. et al.: *Thermo-mechanical numerical simulation of friction stir rotation-assisted single point incremental forming of commercially pure titanium sheets*. Materials, 2024, 17, 1–16.
- [124] Szyndler J. et al.: *Through scale material flow investigation in novel incremental bulk forming process*. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 287, 1–11.
- [125] Śliwa R.E. et al.: *Metal forming of lightweight magnesium alloys for aviation applications*. Archives of Metallurgy and Materials, 2017, 62, 1559–1566.
- [126] Tian D. et al.: *A novel process for axial closed extrusion of ring part with mesh-like ribs*. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 165, 1–18.
- [127] Tian T. et al.: *Effect of rotary swaging on mechanical behaviors of axle steel rod*. Materials, 2024, 17, 1–18.
- [128] Tian T. et al.: *Effect of rotary swaging and annealing on mechanical properties and microstructure evolution of aeroengine high-temperature alloy steel tube*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135, 351–365.
- [129] Tian T. et al.: *Processing and microstructure analysis on the precision rotary swaging of inner-stepped aero-engine shaft*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122, 3199–3216.
- [130] Tian Y. et al.: *Influences of expanding angles on extrusion-shearing-expanding processing of AZ31 magnesium alloy thin-walled tubes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118, 751–758.
- [131] Tomczak J.: *Studium procesów obciskania obrotowego odkuwek drążonych*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2016.
- [132] Tomczak J., Bulzak T., Pater Z.: *Theoretical and experimental analysis of rotary compression of ball pins hollow forgings*. Advances in Science and Technology Research Journal, 2016, 10, 109–117.
- [133] Tomczak J. et al.: *Design and technological capabilities of a CNC skew rolling mill*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21, 1–17.
- [134] Tomczak J. et al.: *Skew rolling of bimetallic rods*. Materials, 2021, 14, 1–15.
- [135] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *A theoretical and experimental analysis of rotary compression of hollow forgings formed over a mandrel*. Strength of Materials, 2017, 49, 555–564.

- [136] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *The influence of hollow billet thickness in rotary compression*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82, 1281–1291.
- [137] Trzepieciński T.: *Recent developments and trends in sheet metal forming*. Metals, 2020, 10, 1–54.
- [138] Wang F.J. et al.: *Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes*. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214, 1597–1604.
- [139] Wang J. et al.: *Study on forming quality of three-roll skew rolling hollow axle*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128, 1089–1100.
- [140] Wang M. et al.: *Analysis and prediction of shrinkage cavity defects of a large stepped shaft in open-die composite extrusion based on machine learning*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127, 2723–2735.
- [141] Wen T et al.: *Characterization of deformation behavior of thin-walled tubes during incremental forming: a study with selected examples*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78, 1769–1780.
- [142] Wen T. et al.: *Outwards and inwards crimping of tube ends by single-point incremental forming*. Procedia Engineering, 2017, 207, 854–859.
- [143] Wen X., Tan J., Li X.: *Optimization of spinning process parameters for the large-diameter thin-walled cylinder based on the drum shape*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108, 2315–2335.
- [144] Wen X., Tan J., Li X.: *Research on the drum suppression method for long-distance reverse thinning spinning of the ultra-thin-walled cylinder*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107, 1909–1926.
- [145] Winiarski G.: *Narzędzie do wyciskania stopnia wału drążonego*. Nr zgłoszenia patentowego: 442843. Biuletyn Urzędu Patentowego: Wynalazki i Wzory Użytkowe, 2024, 21, 14.
- [146] Winiarski G.: *Narzędzie do wyciskania stopnia wału pełnego*. Nr zgłoszenia patentowego: 442846. Biuletyn Urzędu Patentowego: Wynalazki i Wzory Użytkowe, 2024, 21, 13.
- [147] Winiarski G. et al.: *Effect of tool kinematics on tube flanging by extrusion with a moving sleeve*. Advances in Science and Technology Research Journal, 2019, 13, 210–216.
- [148] Winiarski G., Gontarz A.: *Kształtowanie kołnierzy w wyrobach drążonych metodą wyciskania z ruchomą tuleją*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2017.
- [149] Wojtaszek M. et al.: *Application of processing maps and numerical modelling for identification of parameters and limitations of hot forging process of 80MnSi8-6 steel*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23, 1–22.
- [150] Wójcik M., Skrzat A.: *Coupled thermomechanical Eulerian-Lagrangian analysis of the KOBO extrusion process*. Archives of Metallurgy and Materials, 2022, 67, 1185–1193.
- [151] Xia Q. et al.: *A study of manufacturing tubes with nano/ultrafine grain structure by stagger spinning*. Materials and Design, 2014, 59, 516–523.
- [152] Xiong Q. et al.: *Design and implementation of tube bulging by an attractive electro-magnetic force*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273, 1–8.

- [153] Xu C. *et al.*: *Tube necking extrusion principle and forming process of trailer rear axle*. Procedia Engineering, 2014, 81, 634–640.
- [154] Xu W. *et al.*: *Numerical simulation and experimental study on multi-pass stagger spinning of internally toothed gear using plate blank*. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229, 450–466.
- [155] Xu Y. *et al.*: *Numerical and experimental study on large deformation of thin-walled tube through hydroforming process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87, 1885–1890.
- [156] Yang C. *et al.*: *Dieless incremental hole-flanging of thin-walled tube for producing branched tubing*. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214, 2461–2467.
- [157] Yang C., Ma J., Hu Z.: *Analysis and design of cross wedge rolling hollow axle sleeve with mandrel*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239, 346–358.
- [158] Yang C.C., Liu C.H.: *The study of multi-stage cold forming process for the manufacture of relief valve regulating nuts*. Applied Sciences, 2023, 13, 1–12.
- [159] Yang L., Hu G., Liu J.: *Investigation of forming limit diagram for tube hydroforming considering effect of changing strain path*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79, 793–803.
- [160] Yang L., Zhao Q.: *Forming limit diagrams for tubes with non-uniform thickness in hydro-bulging*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103, 901–911.
- [161] Yu H. *et al.*: *Electromagnetic forming of aluminum circular tubes into square tubes: Experiment and numerical simulation*. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31, 613–623.
- [162] Zeng X. *et al.*: *Die filling mechanism in flow forming of thin-walled tubular parts with cross inner ribs*. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58, 832–844.
- [163] Zhang Q. *et al.*: *Rotary swaging forming process of tube workpieces*. Procedia Engineering, 2014, 81, 2336–2341.
- [164] Zhang S. *et al.*: *Simulation and experiment of reduction of equal-diameter hollow shafts with three-roll skew rolling*. Procedia Manufacturing, 2020, 50, 183–186.
- [165] Zhao G. *et al.*: *Uneven plastic deformation behavior of high-strength cast aluminum alloy tube in multi-pass hot power backward spinning*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88, 907–921.
- [166] Zhao H., Hu H.J., Liang P.C.: *Influence of extrusion method on the microstructure and mechanical properties of formed magnesium alloy tubes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127, 3979–3987.
- [167] Zhou W. *et al.*: *A comparative study on deformation mechanisms, microstructures and mechanical properties of wide thin-ribbed sections formed by sideways and forward extrusion*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 168, 1–18.
- [168] Zhou W. *et al.*: *Analysis and modelling of a novel process for extruding curved metal alloy profiles*. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138–139, 524–536.
- [169] Zhou W. *et al.*: *Feasibility studies of a novel extrusion process for curved profiles: Experimentation and modelling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 126, 27–43.

- [170] Zhu H. *et al.*: *The development of a novel forming limit diagram under nonlinear loading paths in tube hydroforming*. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 172, 1–10.
- [171] Zhu S. *et al.*: *Flange forming at an arbitrary tube location through upsetting with a controllable deformation zone*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273, 1–10.
- [172] Zhu S. *et al.*: *Investigation of a tailored blank for the elimination of forging laps during cup sidewall upsetting*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109, 2311–2324.
- [173] Zhu S. *et al.*: *Thickening of cup sidewall through sheet-bulk forming with controllable deformation zone*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262, 597–604.
- [174] Zhu Y. *et al.*: *Die structure optimization for eliminating premature folding of sidewall upsetting with a controllable deformation zone*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105, 1411–1424.
- [175] Zhuang X. *et al.*: *Sheet bulk forming of thin-walled components with external gearing through upsetting using controllable deformation zone method*. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34, 1–14.
- [176] Zwolak M., Śliwa R.: *Analysis of the influence of dies geometry on the process extrusion force and properties of the extrudate obtained in the process of cold extrusion of 7075 aluminum alloy by the KOBO method*. Materials Science Poland, 2024, 42, 92–106.
- [177] Zwolak M. *et al.*: *Possibility of deformation of billet with various internal structure in KOBO extrusion*. Key Engineering Materials, 2022, 926, 511–522.