

Wybrane zagadnienia technologii i teorii prasowania obwiedniowego

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Grzegorz Samołyk

Wybrane zagadnienia technologii i teorii prasowania obwiedniowego



Politechnika Lubelska
Lublin 2012

Recenzent:

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

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2012

ISBN: 978-83-62596-77-5

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

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

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: ESUS Agencja Reklamowo-Wydawnicza Tomasz Przybylak

www.esus.pl

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

Nakład: 80 egz.

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Maszyny i urządzenia stosowane do kształtowania obwiedniowego ...	11
2.1. Wprowadzenie	11
2.2. Klasyfikacja maszyn obwiedniowych	13
2.3. Rys historyczny rozwoju maszyn obwiedniowych	16
2.3.1. Walcarki obwiedniowe	16
2.3.2. Prasy obwiedniowe	20
2.4. Przyrząd specjalny PSKO-1	30
3. Zarys technologii prasowania obwiedniowego	33
3.1. Zakres stosowania technologii prasowania obwiedniowego	34
3.1.1. Charakterystyka technologii prasowania obwiedniowego	34
3.1.2. Możliwości prasowania obwiedniowego	41
3.2. Projektowanie procesu technologicznego	49
3.2.1. Materiał wsadowy	50
3.2.2. Zalecenia projektowe	54
3.3. Zasady konstrukcji narzędzi	59
3.3.1. Konstrukcja stempla	61
3.3.2. Konstrukcja matrycy dolnej	63
3.3.3. Materiały stosowane na narzędzia	66
4. Analiza kształtowania stożkowego koła zębatego	69
4.1. Wprowadzenie	69
4.2. Projektowanie narzędzi	71
4.3. Modelowanie numeryczne procesu prasowania obwiedniowego	81
4.3.1. Wprowadzenie	81
4.3.2. Charakterystyka modelu numerycznego	83
4.4. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych	85
4.4.1. Siła i praca prasowania obwiedniowego	85
4.4.2. Analiza płynięcia materiału podczas kształtowania wypraski	90

4.4.3.	Analiza parametrów naprężeniowych w wyprasce	110
4.5.	Weryfikacja doświadczalna	119
4.5.1.	Stanowisko badawcze	119
4.5.2.	Siła kształtowania	122
4.5.3.	Kształt wypraski	127
Literatura		133
Wykaz ważniejszych oznaczeń		141
Streszczenie		143
Summary		145

1. WSTĘP

Techniki wytwarzania wyrobów metalowych, które bazują na obróbce plastycznej, znane są ludzkości już od ponad sześciu tysięcy lat. Początkowo, były to sposoby dość „prymitywne”, w których wykorzystywano głównie energię ludzkich mięśni, a wyroby kształtowano poprzez uderzenia prostymi narzędziami. Rozwój cywilizacji przyczynił się również do powstawania bardziej zaawansowanych technologicznie metod kształtowania przedmiotów metalowych. Szczególnym okresem był okres rewolucji przemysłowej, który przyczynił się do wzrostu znaczenia technologii obróbki plastycznej metali.

Obecnie wiedza na temat obróbki plastycznej metali jest bardzo obszerna. Znane są liczne technologie, w których prym wiodą różne sposoby kucia oraz walcowania [4, 18, 43, 77]. Jednak okazuje się, że istnieje nadal kilka technik, które nie do końca są w pełni poznane. Jedną z nich jest technologia kształtowania obwiedniowego odkuwek, w szczególności **prasowanie obwiedniowe** [11, 39, 54, 72]. Pomimo, że jest ono znane już od stu lat oraz w tym czasie opracowano i opatentowano wiele maszyn i urządzeń do kształtowania obwiedniowego (np.: [1, 31, 46, 52, 53, 69, 70, 73÷75, 79]), to popularność prasowania obwiedniowego jest nadal mniejsza, niż innych technologii obróbki plastycznej. Okazuje się, że najważniejszą przyczyną takiego stanu rzeczy jest niedostateczna wiedza na temat warunków realizacji procesu kształtowania odkuwek (wyprasek) tą metodą.

Wiadomo, że kształtowanie obwiedniowe jest obarczone szeregiem ograniczeń. Wiele z nich wynika z podstawowej cechy tej technologii – tj. ruchu obwiedniowego (nazywanego również ruchem wahającym lub precesyjno-nutacyjnym) jednego z narzędzi. Zastosowanie takiego rozwiązania kinematycznego narzędzia pozwala wywołać miejscowy nacisk na kształtowaną wypraszkę, co umożliwia obniżenie wymaganej siły kształtowania co najmniej dziesięciokrotnie. Niestety, niekorzystnym efektem jest wywołanie złożonego i niejednorodnego schematu naprężeń, występującego zarówno w wyprasce, jaki i w samych narzędziach.

Zatem, projektowanie procesu prasowania obwiedniowego sprowadza się przede wszystkim do doboru takich parametrów technologicznych, które

gwarantują uzyskanie poprawnie ukształtowanego wyrobu. Jednocześnie należy podkreślić, że w przypadku prasowania obwiedniowego istotnym zagadnieniem projektowym jest umiejętne skonstruowanie narzędzi oraz dobór materiału, z którego zostaną one wykonane. Wynika to z faktu, że głównym czynnikiem ograniczającym żywotność matryc nie są zjawiska trybologiczne, ale cyklicznie zmieniające się obciążenie zginające, doprowadzające do pęknięć narzędzi.

Nie mniej istotnym aspektem kształtowania obwiedniowego jest to, że proces ten najczęściej przebiega w warunkach kształtowania na zimno, względnie na półgorąco. Powoduje to, że najczęściej obserwowanymi ograniczeniami procesu są również różnego rodzaju wady kształtu wyrobu oraz przedwczesne pęknięcie materiału wypraski [12, 27, 29, 41, 45, 83]. Zagadnienie to zostało szczegółowo omówione np. w opracowaniach własnych [54, 61, 63, 66].

Paradoksem spotykanym w wielu zakładach kuźniczych jest produkcja metodą tradycyjnego kucia matrycowego (z użyciem maszyn uniwersalnych, np. pras korbowych) odkuwek, które należy prasować obwiedniowo. Najczęstszym, niepożądanym efektem takiego rozwiązania technologicznego jest przyśpieszone zużywanie się maszyny kuźniczej. Powodem tego jest wciąż mała popularność prasowania obwiedniowego, wynikająca głównie z braku specjalistycznych opracowań, ujmujących kompleksowo wiedzę o tej technologii. Stąd wynika uzasadnienie prowadzenia prac badawczych nad technologią prasowania obwiedniowego oraz publikowanie wyników tych badań.

Prezentowana monografia jest kontynuacją autorskiej książki pt. *„Podstawy teoretyczne i modelowanie prasowania obwiedniowego”* – [54]. Obydwie publikacje stanowią podsumowanie ważniejszych wyników badań teoretycznych i doświadczalnych realizowanych przez ostatnie lata w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Prace te wykonywano w ramach projektu, który był finansowany ze środków na naukę w latach 2009-2012, jako projekt badawczy nr N N508 439036. Tematem wiodącym wspomnianego projektu były badania teoretyczne i doświadczalne procesów kształtowania wyprasek na zimno, realizowanych sposobem prasowania obwiedniowego. Z uwagi na coraz częstsze stosowanie stopów żelaznych w przemyśle maszynowym, rolniczym, lotniczym, motoryzacyjnym itd., prezentowane wyniki badań dotyczą kształtowania wyrobów, które są wykonywane m.in. ze stopów aluminium.

Niniejsza monografia zawiera usystematyzowaną wiedzę na temat technologii prasowania obwiedniowego. Przedstawiono zarówno charakterystykę metody kształtowania obwiedniowego wyprasek, jak i również zamieszczono informacje na temat maszyn i urządzeń stosowanych do realizacji tej technologii. Szczególną uwagę zwrócono na realizację procesu prasowania obwiedniowego na prasach specjalnych typu PXW (PLASOMAT) [11, 21, 47, 48] oraz z serii T (H.SCHMiD) [1, 9, 71]. Uzupełnieniem treści opracowania jest omówienie zagadnienia wytwarzania wyprasek typu stożkowe koło zębate, w formie osobnego rozdziału. Prezentowane w tym rozdziale wyniki badań własnych dotyczą, zarówno zagadnień technologicznych wytwarzania stożkowych kół zębatach, jak i również poruszają aspekty czysto teoretyczne.

W tym miejscu autor monografii chciałby podziękować wszystkim osobom, które uczestniczyły w realizacji prac badawczych, w szczególności pracownikom Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Szczególne podziękowanie kieruje się pod adresem Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, które przekazało środki finansowe na realizację projektu badawczego nr N N508 439036.

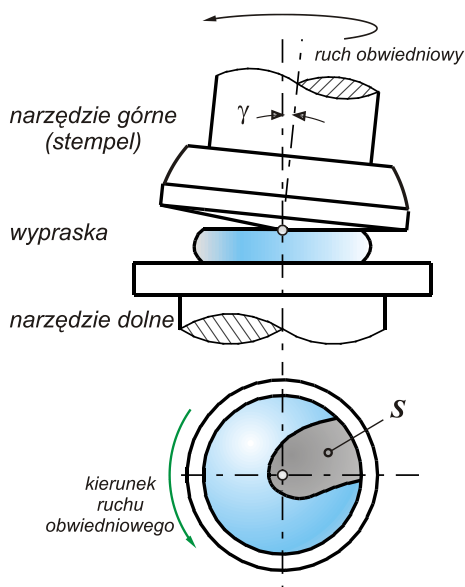
Osobne podziękowania przekazuje się recenzentowi, Panu dr hab. inż. Andrzejowi Gontarzowi, profesorowi Politechniki Lubelskiej, którego cenne uwagi i wskazówki nadały ostateczny kształt tej monografii.

2. MASZyny I URZĄDZENIA STOSOWANE DO KSZTAŁTOWANIA OBWIEDNIOWEGO

2.1. Wprowadzenie

Maszyny oraz urządzenia, które są używane do realizacji procesu kształtowania wyprasek (odkuwek) sposobem prasowania obwiedniowego, charakteryzują się tym, że oś jednego z narzędzi jest odchyłona od osi głównej (pionowej) o pewien kąt γ (rys. 2.1). Kąt ten jest nazywany kątem wahań lub kątem nutacji narzędzia. W praktyce najczęściej spotyka się rozwiązania

techniczne, gdzie ruch obwiedniowy jest wykonywany przede wszystkim przez narzędzie górne (stempel). Natomiast narzędzie dolne, na którym z reguły spoczywa wsad, realizuje ruch postępowy – w efekcie tego wsad jest dosuwany do powierzchni roboczej stempla. Podstawowym efektem takiego rozwiązania kinematycznego (lub podobnego) jest zmniejszenie pola S styku pomiędzy stemplem a kształtowanym materiałem (wypraską). Dzięki temu kształtowanie wypraski przebiega przy znacznie mniejszych siłach (rzędu nawet 10%) [82], niż uzyskiwanych w procesach np. tradycyjnego kucia swobodnego lub matrycowego [5, 21, 42, 54, 60, 76].

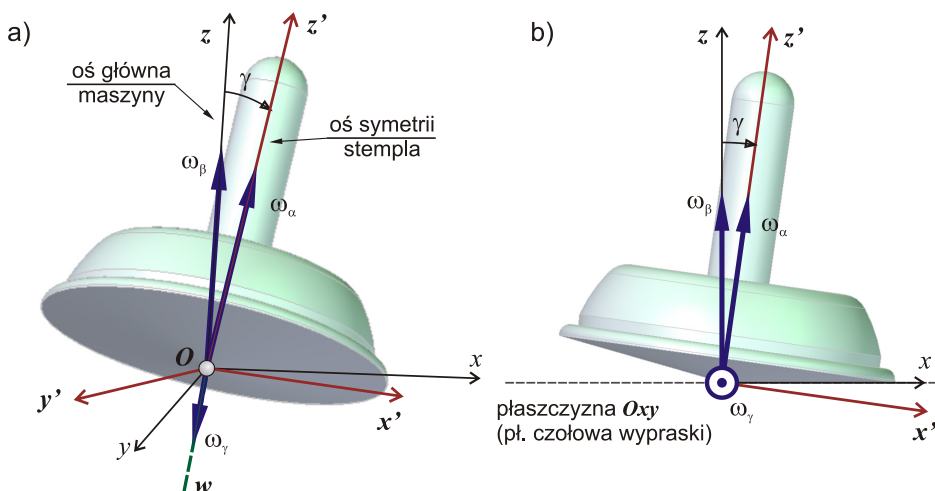


Rys. 2.1. Ogólny schemat procesu prasowania obwiedniowego; a) układ narzędzi i materiału kształtowanego, b) widok górny (na powierzchnię czołową wypraski) pokazujący schematycznie pole S styłu stempel-wypraska

Ruch obwiedniowy wykonywany przez narzędzie w trakcie kształtowania wypraski jest szczególnym przypadkiem ruchu kulistego wokół pewnego punktu. Na kolejnym rys. 2.2 punkt ten oznaczono literą O , przy czym z reguły znajduje się on na powierzchni czołowej kształtowanego materiału [48, 54, 55, 61].

W ogólnym przypadku ruch stempla (lub dowolnego narzędzia) można jednoznacznie określić stosując trzy prędkości kątowe Eulera [38, 54]. Są to (rys. 2.2):

- ω_α – prędkość kątowa obrotu własnego narzędzia wokół własnej osi symetrii; prędkość ta wyraża zmianę kąta α obrotu własnego względem czasu, przy czym kąt ten jest zawarty w płaszczyźnie $Ox'y'$ pomiędzy osią ruchomą $\{x'\}$ oraz półprostą w ;
- ω_β – prędkość kątowa precesji narzędzia wokół osi głównej maszyny $\{z\}$; jej wartość wyraża zmianę kąta β precesji stempla względem czasu, gdzie kąt β jest zawarty w płaszczyźnie Oxy (prostopadłej do osi głównej maszyny) pomiędzy osią stałą $\{x\}$ oraz półprostą w ;



Rys. 2.2. Prędkości kątowe Eulera opisujące ruch narzędzia: a) widok izometryczny, b) widok w płaszczyźnie prostopadłej do półprostej w ; gdzie: $\{x, y, z\}$ – układ współrzędnych związany z maszyną; $\{x', y', z'\}$ – układ współrzędnych związany z narzędziem; O – środek ruchu kulistego; w – półprosta będąca zbiorem punktów przecięcia płaszczyzn Oxy i $Ox'y'$;

- ω_γ – opisuje zmianę kąta nutacji (wychylenia) stempla względem czasu; prędkość kątowna ω_γ jest współliniowa z półprostą w , a kąt γ nutacji narzędzia jest zawarty w płaszczyźnie prostopadłej do tej półprostej, pomiędzy osią główną maszyny (oś $\{z\}$) a osią symetrii stempla (oś $\{z'\}$).

2.2. Klasyfikacja maszyn obwiedniowych

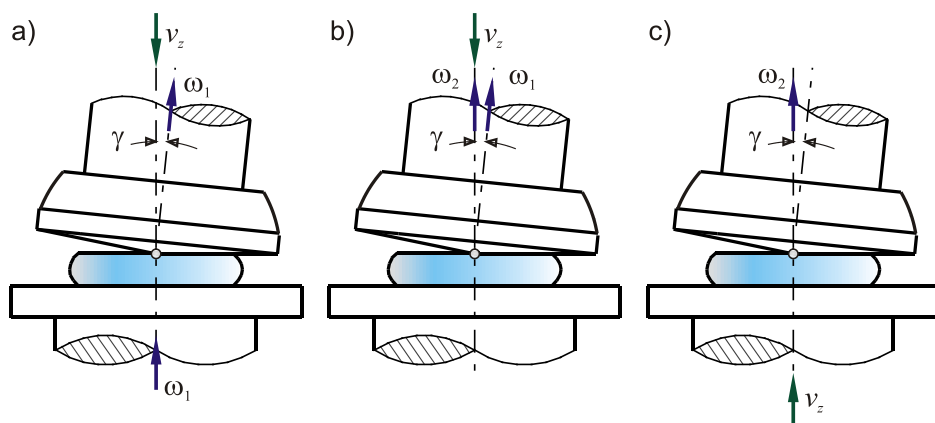
Klasyfikacja podstawowa

Bazując na zagadnieniu prędkości kątowych Eulera oraz uwzględniając dodatkowo ruch postępowy, R. Shivpuri [72] zaproponował klasyfikację maszyn i urządzeń stosowanych do prasowania obwiedniowego wyprasek. Podział ten opiera się na założeniu, że narzędzie (górne lub dolne – rys. 2.1) może wykonywać jeden, dwa lub trzy ruchy określonego typu. W tym celu zdefiniowano następujące rodzaje ruchu narzędzia [51, 72]:

- **ruch rotacyjny** ω_1 – jest zdefiniowany jako ruch obrotowy ciała sztywnego wokół własnej osi symetrii;
- **ruch orbitalny** ω_2 – jest to ruch orbitalny, również nazywany ruchem oscylacyjno-obrotowym (lub wahającym), który jest szczególnym przypadkiem precesji ciała sztywnego wokół osi niebędącej osią symetrii – najczęściej jest to oś główna maszyny;
- **ruch postępowy** v_z – jest zdefiniowany jako ruch prostoliniowy ciała sztywnego, najczęściej wzdłuż osi głównej maszyny – w praktyce ruch ten może być nazywany posuwem lub dosuwem.

W zależności od kombinacji tych ruchów oraz sposobu ich przypisania poszczególnym narzędziom, R. Shivpuri [72] wyróżnia trzy główne grupy maszyn. Zgodnie z rys. 2.3 są to:

- **grupa 1** (rys. 2.3a) – maszyna posiada dwie osie stałe; oba narzędzia (górne i dolne) wykonują ruch rotacyjny ω_1 (wokół tych osi), przy czym jedno z narzędzi wykonuje dodatkowo ruch postępowy v_z ; wsad spoczywa na narzędziu dolnym, które nadaje jemu ruch obrotowy;
- **grupa 2** (rys. 2.3b) – maszyna posiada tylko jedną oś stałą; jedno z narzędzi (najczęściej górne) może wykonywać wszystkie trzy rodzaje ruchu, tj. rotacyjny, orbitalny oraz postępowy – przy czym jedynie ruchy orbitalny i postępowy są wymuszone przez napęd maszyny, natomiast ruch rotacyjny jest swobodny; wsad spoczywa na narzędziu nieruchomym;



Rys. 2.3. Podstawowa klasyfikacja maszyn, stosowanych do kształtowania obwiedniowego wyprasek, bazująca na sposobie realizacji ruchu rotacyjnego ω_1 , orbitalnego ω_2 oraz postępowego v_z przez narzędzie górne lub dolne [72]

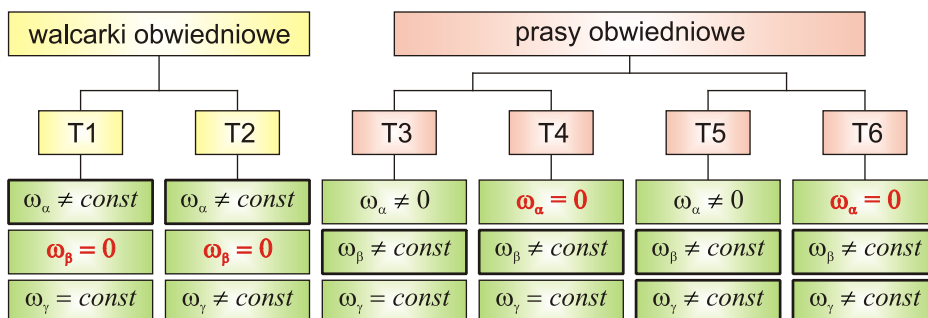
- **grupa 3** (rys. 2.3c) – maszyna posiada tylko jedną oś stałą; narzędzie górne wykonuje tylko ruch orbitalny ω_2 , natomiast narzędzie dolne – ruch postępowy v_z (wzdłuż osi stałej); wsad spoczywa na narzędziu dolnym i jest przez nie dosuwane do powierzchni roboczej stempla.

Maszyny należące do grupy pierwszej można dodatkowo podzielić na dwie podgrupy, w zależności od zastosowanego sposobu napędu narzędzi. W praktyce spotyka się rozwiązania, w których ruch rotacyjny może być wymuszony tylko w jednym lub w obu narzędziach. Zatem w obrębie pierwszej grupy maszyn wyróżnia się dodatkowo [72]:

- **podgrupa 1A** – tylko jedno narzędzie jest napędzane, natomiast narzędzie drugie obraca się swobodnie w sposób wynikający z przekazywanego momentu za pośrednictwem wsadu;
- **podgrupa 1B** – ruch rotacyjny obu narzędzi jest wymuszony przez niezależny napęd maszyny.

Klasyfikacja szczegółowa

Maszyny stosowane do kształtowania obwiedniowego wyprasek (odkuwek) można również sklasyfikować w oparciu o cechy ruchu kulistego wykonywanego przez narzędzie. Ten podział bazuje na prędkościach kątowych



Rys. 2.4. Klasyfikacja maszyn do kształtowania obwiedniowego wyprasek oparta na charakterze prędkości kątowych Eulera [51]; opis w tekście

Eulera (rys. 2.2), przy czym zakłada się, że w trakcie procesu wartość kąta nutacji γ zawsze jest różna od zera. Zgodnie z rys. 2.4 [51], maszyny obwiedniowe można zakwalifikować do jednej z sześciu typów, które oznaczane są umownie symbolami T1÷T6.

Maszyny obwiedniowe z grupy T1 oraz T2 to walcarki rotacyjne, które pod względem swojej budowy zalicza się do maszyn grupy pierwszej (wg klasyfikacji podstawowej). Kształtowanie obwiedniowe wyprasek na tych maszynach jest realizowane metodą walcowania obwiedniowego rotacyjnego (grupa T1) lub rotacyjno-nutacyjnego (grupa T2). Pozostałe odmiany maszyn (rys. 2.4) nazywane są prasami obwiedniowymi. Według J. Richerta [51] oraz autora [54÷56], procesy technologiczne, realizowane na poszczególnych grupach pras obwiedniowych, nazywane są ogólnie prasowaniem obwiedniowym lub prasowaniem wahającą matrycą. Szczegółowy podział metod realizacji tej technologii pozwala wyróżnić prasowanie obwiedniowe:

- precesyjne z rotacją – prasy z grupy T3;
- precesyjne bez rotacji (lub tzw. tradycyjne) – prasy z grupy T4;
- precesyjno-nutacyjne z rotacją – prasy z grupy T5;
- precesyjno-nutacyjne bez rotacji (inaczej: prasowanie wahającą matrycą) – prasy z grupy T6.

Maszyny obwiedniowe typu T3 oraz T4 posiadają układ narzędzi podobny do układu stosowanego w maszynach z grupy drugiej (patrz klasyfikacja podstawowa). Natomiast rozwiązanie kinematyki narzędzi w prasach typu

T4 i T6 jest bardzo podobne jak w maszynach należących do grupy trzeciej. Szczegóły na temat konstrukcji i zasady działania maszyn obwiedniowych z poszczególnych grup zostaną przedstawione w kolejnych podrozdziałach.

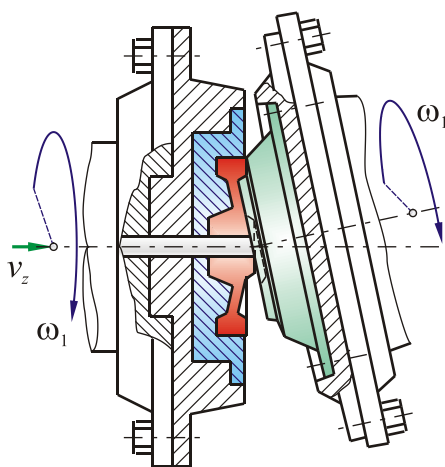
2.3. Rys historyczny rozwoju maszyn obwiedniowych

2.3.1. Walcarki obwiedniowe

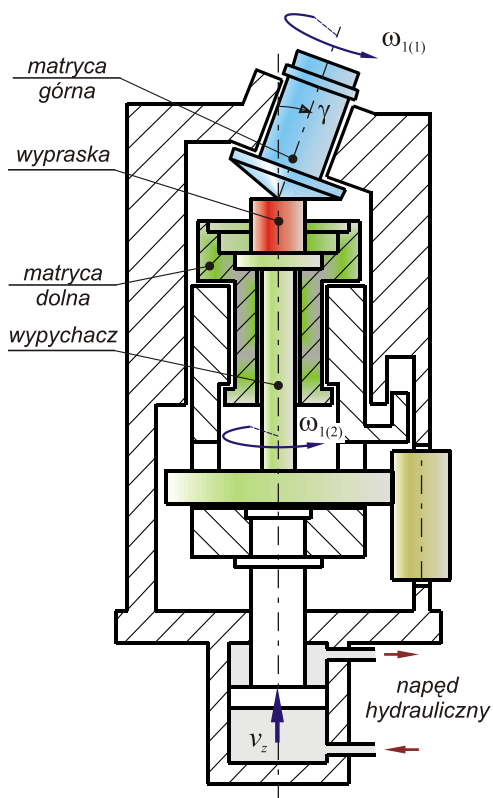
Pierwsza maszyna, służąca do obwiedniowego kształtowania odkuwek, powstała w roku 1918, w amerykańskim zakładzie metalurgicznym „*Midvale Steel and Ordinance Co.*”. Wynalazcą tej walcarki obwiedniowej, był E.E. Slick [37, 74]. Oficjalnie nazywano ją walcarką (do kół) Slicka (rys. 2.5). Pracuje ona w układzie poziomym, a zastosowana w niej kinematyka narzędzi jest zgodna z rozwiązaniem przypisanym dla maszyn podgrupy 1B.

Matryce w walcarce Slicka są napędzane i obracają się z prędkością $\omega_1 = 100 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$. Kąt pochylenia jednego z narzędzi był stały i wynosił $\gamma = 10,7^\circ$. Walcarka ta początkowo służyła do produkcji odkuwek wielkogabarytowych typu tarcza, które były wykonywane z wlewków stalowych. W późniejszym czasie, w fabryce „*Bethelen Steel Co.*” zaczęto używać zmodyfikowanej wersji walcarki obwiedniowej Slicka, która była w pełni zautomatyzowana. Dzięki temu jedną odkuwkę wykonywano w czasie jednej minuty.

Dalszy rozwój konstrukcji tego typu maszyn obwiedniowych przypada na okres drugiej połowy ubiegłego wieku. W latach siedemdziesiątych odnotowuje się wyraźny wzrost zainteresowania metodami kształtowania obwiedniowego oraz wykorzystywania ich do wytwarzania odkuwek na skalę przemysłową. Spowodowało to intensyfikację prowadzo-



Rys. 2.5. Zestaw narzędzi i ich kinematyka w walcarce obwiedniowej Slicka [37]



Rys. 2.6. Walcarka obwiedniowa rotacyjna (grupa 1B, typ T1) według konstrukcji W. Penny'ego [46]; opis w tekście

(matryca i wypychacz) oprócz ruchu rotacyjnego wykonują również ruch postępowy v_z , którego prędkość jest regulowana za pomocą napędu hydraulicznego. Prędkości kątowe $\omega_{1(2)}$ (matryca górna) oraz $\omega_{1(2)}$ (matryca dolna i wypychacz) są tak dobrane, aby był spełniony warunek [46]:

$$\left(\frac{\omega_{1(2)}}{\omega_{1(1)}} \right) = \cos \gamma, \quad (2.1)$$

gdzie oznaczenia są zgodne z rys. 2.6.

nych prac badawczo-rozwojowych. Wymiernym efektem tych prac były zgłoszenia patentowe, które przedstawiały szereg nowatorskich rozwiązań dla maszyn obwiedniowych.

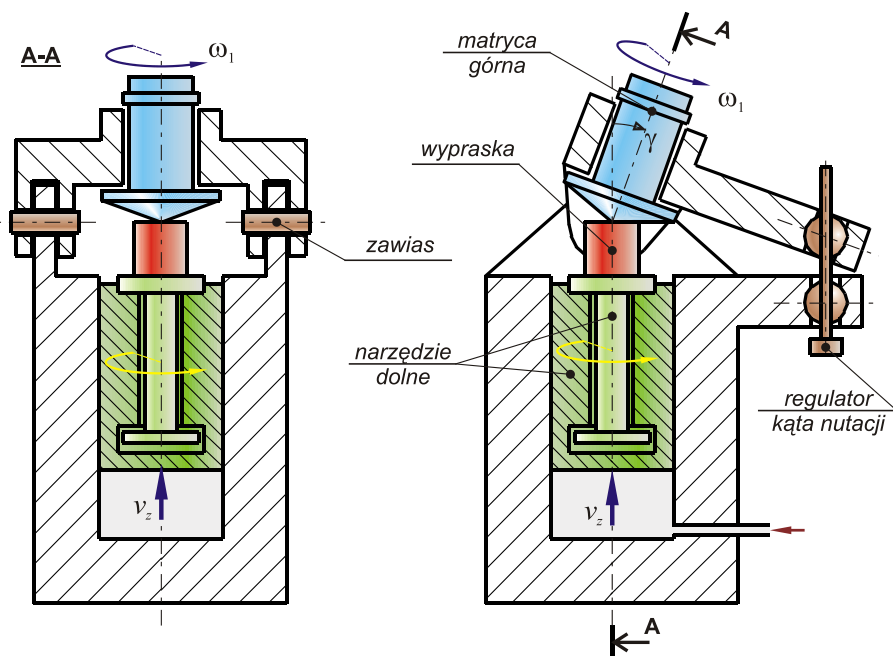
Na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych, zespół pod kierunkiem W. Penny'ego [46, 72] opracowuje prototyp walcarki obwiedniowej rotacyjnej, przeznaczonej do wytwarzania części osiowo-symetrycznych dla przemysłu motoryzacyjnego. Jest to maszyna w układzie pionowym o maksymalnym nacisku 100 kN. Zastosowany układ narzędzi sprawia, że walcarka jest zaliczana do podgrupy 1B. Przykład przedstawiający konstrukcję takiej walcarki obwiedniowej zamieszczono na rys.

2.6. Kąt pochylenia γ matrycy górnej jest stały i wynosi nie więcej niż 15° . Wszystkie narzędzia są wprowadzane w ruch rotacyjny za pomocą jednego źródła napędu. Narzędzia dolne

Inną maszyną, opracowaną w roku 1982 przez W. Penny’ego [46], była walcarka obwiedniowa rotacyjno-nutacyjna (typ T2), której schemat konstrukcji pokazano na kolejnym rysunku 2.7 [46, 51].

Cechą omawianej maszyny jest to, że narzędzie górne wykonuje ruch rotacyjny wymuszony, natomiast narzędzie dolne obraca się w sposób bierny. Zatem układ kinematyczny walcarki kwalifikuje ją do podgrupy 1A (według klasyfikacji podstawowej). Narzędzie dolne, które jest umieszczone w specjalnym cylindrze zasilanym hydraulicznie, wykonuje dodatkowo ruch postępowy v_z w sposób wymuszony.

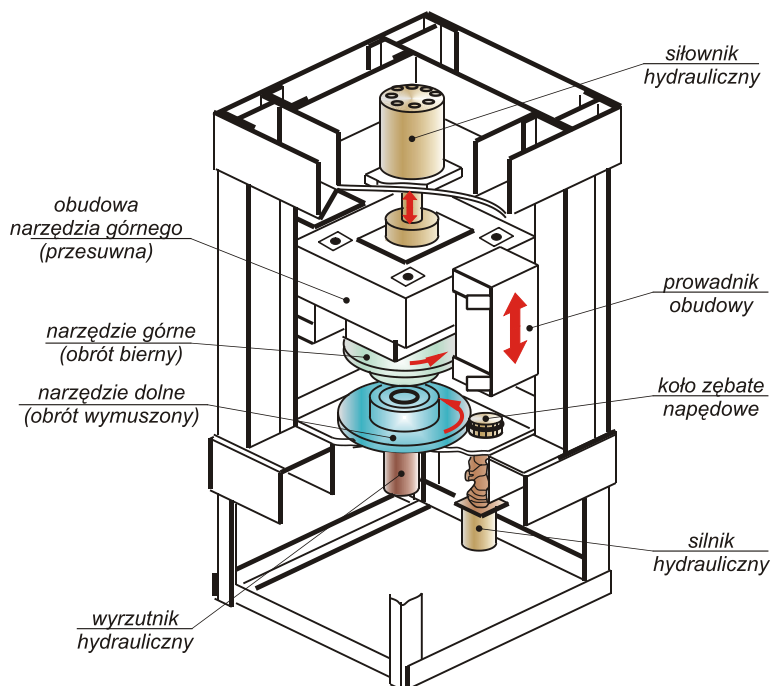
Innowacyjnym rozwiązaniem (na ówczesne czasy), zastosowanym w omawianej maszynie, był sposób zmiany kąta γ pochylenia (nutacji) narzędzia górnego. W tym celu zastosowano specjalny regulator śrubowy, przy czym zawiasy są tak umieszczone, aby ich oś znajdowała się na wysokości powierzchni kontaktu matrycy górnej z wypraską.



Rys. 2.7. Walcarka obwiedniowa rotacyjno-nutacyjna (grupa 1A, typ T2) według konstrukcji W. Penny’ego [46]; opis w tekście

W roku 1983, filadelfijski zespół badawczy z „Dyna East Corporation” opracował i zbudował laboratoryjną maszynę obwiedniową RF-50. Ogólny wygląd tej walcarki pokazano na rys. 2.8 [72]. Posiada ona spawany korpus ramowy wykonany z kształtowników. Zapewnia on możliwość kształtowania na zimno wyrobów płaskich z dużą dokładnością wymiarową. Oba narzędzia (górne i dolne) mogą wykonywać ruch rotacyjny, ale tylko ruch matrycy dolnej jest wymuszony przez silnik hydrauliczny. Górne narzędzie, znajdujące się w przesuwnej obudowie, jest pochylone o stały kąt nutacji. Obudowa jest napędzana siłownikiem hydraulicznym, a konstrukcja korpusu oraz specjalne pionowe prowadniki gwarantują realizację ruchu postępowego.

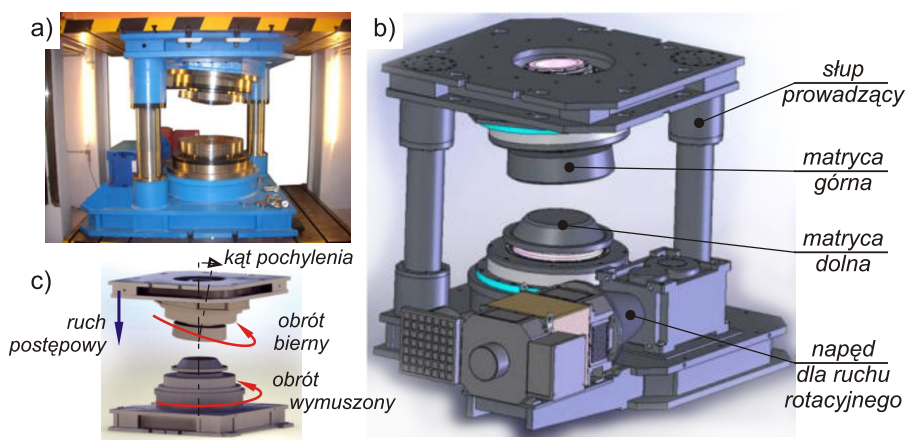
W tym samym roku, w niemieckim zakładzie „Wagner Dortmund” została zbudowana przemysłowa walcarka obwiedniowa, służąca do masowej produkcji wyrobów typu tarcza. Na rynku dostępne były dwa podstawowe modele tej maszyny – walcarka typu AGW-125 oraz AGW-400 o dopuszczalnym nacisku odpowiednio 1250 kN lub 4000 kN. Maszyna ta jest dodat-



Rys. 2.8. Laboratoryjna walcarka obwiedniowa rotacyjna RF-50 [72]; opis w tekście

kowo wyposażona w układ zautomatyzowanego podawania wsadu i odbierania wypraski. Jej konstrukcja jest bardzo podobna do laboratoryjnej walcarki RF-50. Aby zapewnić wymaganą dokładność wykonania wypraski oraz wydajność przy tak dużym nacisku, korpus ramowy doposażono w specjalne ściągnacze oraz zastosowano wymuszony ruch rotacyjny dla obu narzędzi. Wszystkie ruchy narzędzi (tj. rotacyjny i postępowy) są realizowane za pośrednictwem napędu hydraulicznego [72].

Obecnie, powszechnie są stosowane urządzenia do walcowania rotacyjnego, które stanowią oprzyrządowanie pras uniwersalnych. W takich rozwiązaniach napędzane jest tylko narzędzie dolne (ruch rotacyjny) za pomocą silnika elektrycznego. Matryca górna obraca się w sposób bierny, a jej pochylenie jest stałe w trakcie trwania procesu kształtowania. Konstrukcja takiego urządzenia jest zwarta i w jak największym stopniu uproszczona (rys. 2.9) [9].



Rys. 2.9. Przykład urządzenia (grupa 1A, typ T1) służącego do kształtowania obwiedniowego, które jest montowane na prasie uniwersalnej [9];
a) widok ogólny, b) model wirtualny 3D, c) kinematyka narzędzi

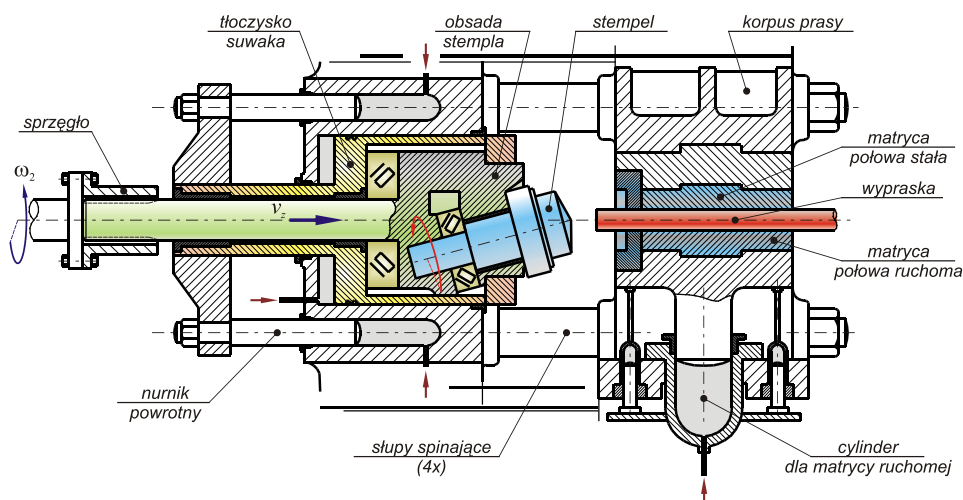
2.3.2. Prasy obwiedniowe

Odrębną grupę maszyn stosowanych do kształtowania obwiedniowego wyprasek stanowią prasy obwiedniowe. Zgodnie z klasyfikacją podaną na rys. 2.4, cechą tych maszyn jest wymuszony ruch precesyjny jednego z na-

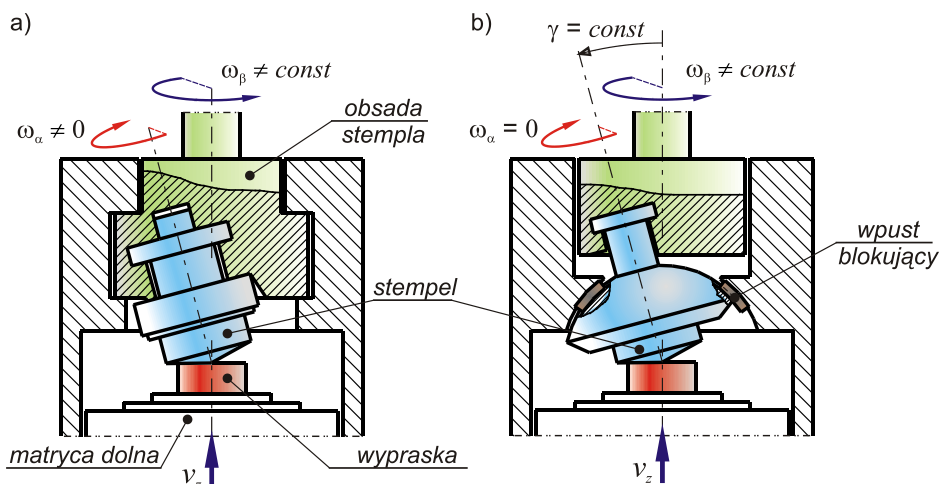
rzędzi. Pierwsza prasa obwiedniowa została skonstruowana przez E.E. Slicka (czyli twórcę walcarki Slicka) w 1920 roku. Zgodnie z opisem patentowym [74], jest to maszyna w układzie poziomym (rys. 2.10), służąca do zakuwania końców wałków. Proces może być realizowany na gorąco lub na zimno. Matryca dzielona, w której umieszcza się wsad (wałek), jest narzędziem stacjonarnym.

Ruch precesyjny stempla wynika z obrotu jego obsady. Ruch ten powoduje również rotację narzędzia, ale o charakterze biernym – tzw. ruch kontrujący. W efekcie takiego układu kinematycznego, nie ma ruchu rotacyjnego wsadu. Zatem, prasa obwiedniowa Slicka jest maszyną typu T3 – tj. prasą precesyjną z rotacją. Natomiast ruch postępowy narzędzia (względne dosunięcie wsadu) uzyskano poprzez umieszczenie obsady stempla tłoczysku siłownika hydraulicznego.

W roku 1929, M.F. Massey [31] opatentował prasę obwiedniową precesyjną bez rotacji. Zastosowany układ kinematyczny narzędzi jest zgodny z typem T4, przy czym, żadne z narzędzi nie wykonuje ruchu obrotowego, nawet w sposób bierny. Różnice pomiędzy prasą Slicka oraz prasą Massey'a pokazano na kolejnym rys. 2.11. Niestety, w obu konstrukcjach kąt γ wychy-

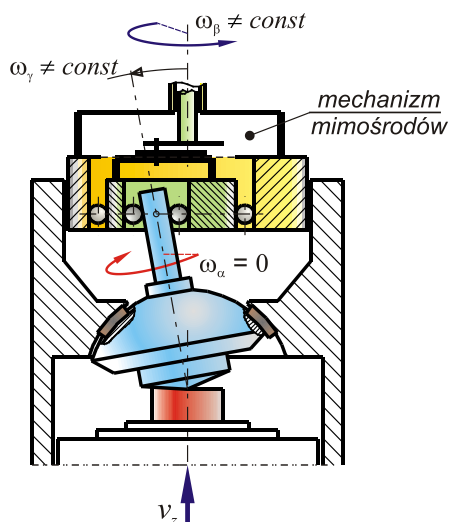


Rys. 2.10. Prasa obwiedniowa Slicka w układzie poziomym, służąca do zakuwania końców wałków, gdzie: v_z – prędkość ruchu postępowego obsady stempla, ω_2 – prędkość ruchu precesyjnego (obrotu wymuszony) [74]; opis w tekście



Rys. 2.11. Porównanie układu i kinematyki narzędzi na przykładzie schematów ideowych prasy Slicka (a) oraz prasy Massey'a (b), gdzie: ω_α – prędkość rotacji (dla prasy Slicka – wynika ona z biernego obrotu stempla, tzw. kontrującego ruch precesyjny; dla prasy Massey'a – jest równa zero, ponieważ obrót stempla jest blokowany), ω_β – prędkość precesji, γ – kąt nutacji, v_z – prędkość ruchu postępowego

lenia stempla jest stały, co powoduje ograniczenie jego ruchu tylko do schematu ruchu obwiedniowego jednokierunkowego. Pierwsza maszyna obwiedniowa według patentu M.F. Massey'a została zbudowana dopiero na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku przez brytyjską firmę „B. & S. Massey Forging Ltd” [72]. Była to prasa Rotaform o nacisku 2000 kN, która jest dostosowana do produkcji masowej odkuwek o masie do 4 kg (stal węglowa). Proces jest realizowany w warunkach prasowania na zimno lub ciepło, a wydajność linii produkcyjnej (w której znajduje się taka prasa) wynosi nawet 250 odkuwek na godzinę. Prasa Rotaform była bardzo popularną maszyną w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku, a technologia kształtowania wyprasek stalowych na ciepło (realizowana na omawianej prasie) najlepiej była opanowana przez brytyjską kuźnię „Stockton Precision Forge”, która *notabene* ściśle współpracowała z producentem prasy. Niestety, szczegóły technologii były objęte tajemnicą handlową.

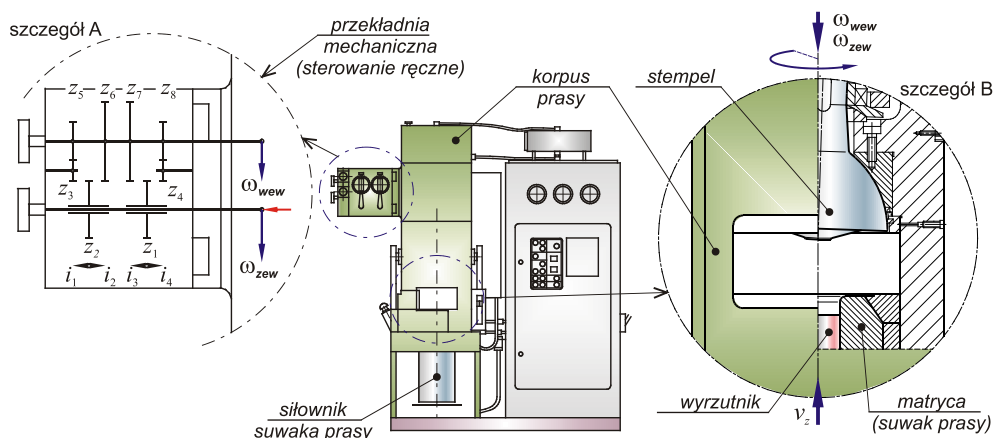


Rys. 2.12. Schemat ideowy prasy Marciniaka, gdzie: ω_α – prędkość rotacji (jest równa zero, ponieważ obrót stempla jest blokowany), ω_β – prędkość precesji (wynika z kombinacji ruchu mimośrodów wewnętrznego i zewnętrznego), ω_γ – prędkość nutacji (również wynika z kombinacji ruchu mimośrodów wewnętrznego i zewnętrznego), v_z – prędkość ruchu postępowego

Wyraźnym sygnałem do zwiększenia popularności technologii prasowania obwiedniowego było opracowanie przez Z. Marciniaka konstrukcji prasy obwiedniowej precesyjno-nutacyjnej, bez rotacji stempla (typ T6) [32÷35]. W roku 1963, przy współpracy z polskim zakładem „PLASOMAT”, wytworzono pierwszą prasę Marciniaka, którą oznaczono jako PXW-100 [11, 21, 47]. Innowacją było zastosowanie mechanizmu dwóch tulei mimośrodkowych (rys. 2.12), których odpowiedni obrót wywołuje jednocześnie ruch precesyjny oraz nutacyjny stempla. Takie rozwiązanie techniczne gwarantuje możliwość uzyskania dowolnego efektu wahania narzędzia. Zatem, z chwilą rozpoczęcia stosowania prasy PXW na skalę przemysłową, możliwości techno-

logiczne procesu prasowania obwiedniowego wzrosły znacząco [11].

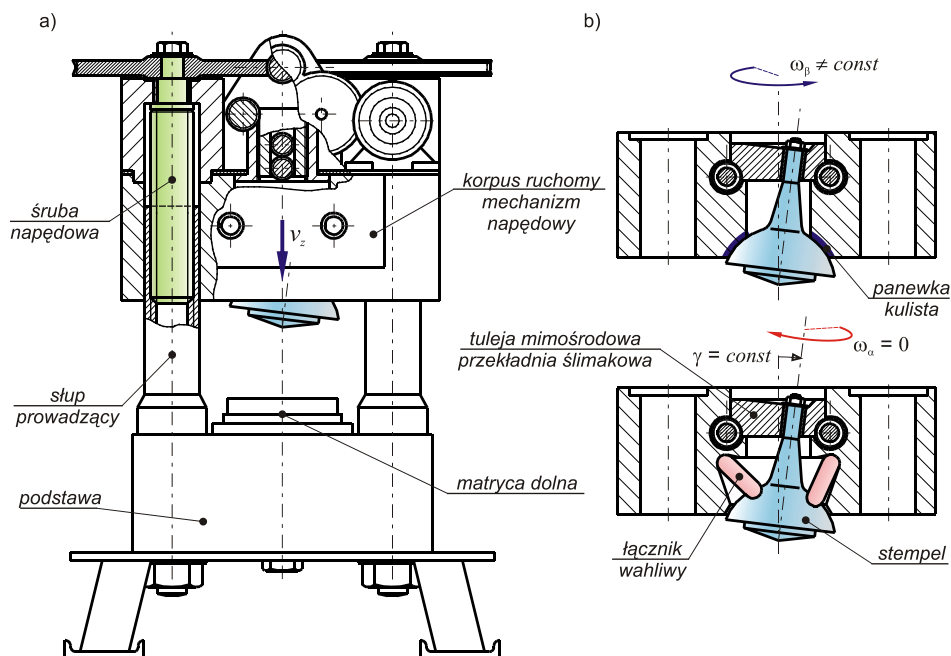
Ogólny schemat przedstawiający wygląd oraz wybrane cechy konstrukcyjne prasy PXW-100A pokazano na kolejnym rysunku 2.13. Jest to maszyna hydrauliczna podwójnego działania z dodatkową przekładnią mechaniczną (rys. 2.13 – szczegół A) napędzającą mechanizm mimośrodków (rys. 2.12). Przekładnia ta przenosi obroty silnika na dwie przekładnie ślimakowe, które wywołują odpowiedni obrót tulei mimośrodkowej zewnętrznej (ω_{zew}) oraz wewnętrznej (ω_{wew}). Efektem tego jest ruch precesyjno-nutacyjny stempla – w przypadku omawianej prasy możliwe są do uzyskania cztery schematy wahania narzędzia, przy maksymalnym jego wychyleniu $\gamma = 2^\circ$.



Rys. 2.13. Schemat prasy PXW-100A, gdzie: z_1 - z_6 – koła zębate w przekładni mechanicznej; i_1 - i_4 – przełożenie reprezentujące odpowiedni schemat wahania stempla; ω_{zew} , ω_{wew} – prędkości obrotowe mimośrodowej tulei zewnętrznej i wewnętrznej

Ruch postępowy narzędzi dolnych (oraz wywierana siła prasowania) realizowany jest przez suwak zasilany hydraulicznie. Suwak ten składa się części zewnętrznej (powodującej ruch matrycy) oraz wewnętrznej, która odpowiada za napęd wyrzutnika. Maksymalna siła prasowania wynosi 1600 kN, przy predkoscí roboczej wynoszącej około $4,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Maksymalny skok suwaka zewnętrznego to 140 mm, natomiast wyrzutnika – 50 mm.

Godne uwagi jest również rozwiązanie konstrukcyjne prasy obwiedniowej, która została opatentowana przez Rosjanina A.N. Silicheva w 1970 roku [73]. Schemat pokazujący tą maszynę zamieszczono na rys. 2.14. Jest to maszyna precesyjna, bez rotacji stempla (typ T4), w której zastosowano stały kąt γ pochylenia stempla (standardowo kąt ten wynosił 3°). Z uwagi na kinematykę narzędzi, prasa Silicheva jest bardzo podobna do pierwszej prasy obwiedniowej Slicka. Znamionną cechą maszyny Silicheva jest mechaniczny napęd, zarówno dla ruchu precesyjnego ω_β stempla, jak i dla ruchu postępowego v_z narzędzia. Mechanizm ten znajduje się z korpusie górnym, który jest częścią ruchomą. Natomiast matryca dolna jest osadzona w nieruchomej podstawie, która dodatkowo jest doposażona w słupy prowadzące.



Rys. 2.14. Prasa obwiedniowa precesyjna (bez rotacji stempła) o napędzie mechanicznym skonstruowana przez A.N. Silichieva [73], gdzie: a) widok ogólny, b) rozwiązanie napędu stempła wraz ze sposobem przenoszenia obciążenia – tj. za pomocą panewki kulistej (schemat górny) lub łączników wahliwych (schemat dolny)

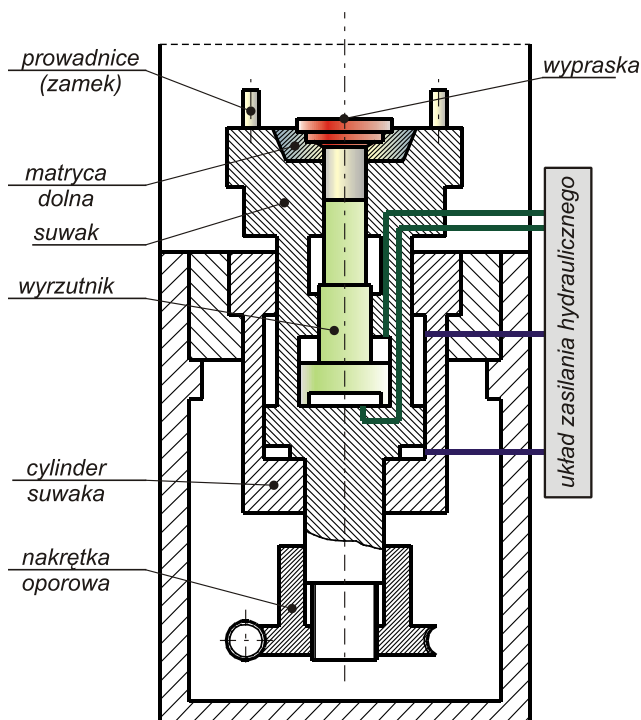
Ruch precesyjny stempła uzyskiwany jest za pośrednictwem przekładni ślimakowej oraz tulei mimośrodowej. Ruch rotacyjny ω_α stempła jest zablokowany. Narzędzie to przenosi obciążenia (rys. 2.14b) albo za pomocą panewki kulistej, albo za pośrednictwem wahliwych łączników.

Dwie ostatnie dekady ubiegłego wieku to okres, w którym największą popularnością cieszyły się maszyny obwiedniowe, w których stosowano precesyjno-nutacyjny ruch stempła. Oprócz wspomnianej polskiej prasy z serii PXW, również uznanie zdobyła szwajcarska prasa o oznaczeniu zaczynającym się od litery „T”. Produkowana była ona przez szwajcarską fabrykę „H. Schmid Ltd.” [9, 71]. Zastosowany w niej sposób napędu stempła bazuje na rozwiązaniu zaproponowanym przez A. Berneta w 1987 roku [1]. Mianowicie, w prasie tej zastosowano mimośrodowy układ napędu ruchu

stempla – tak jak to pokazano na rys. 2.12. Jednak w odróżnieniu od prasy Marciniaka, tuleje mimośrodowe są napędzane bezpośrednio przez dwa niezależne silniki elektryczne, kontrolowane przez sterownik.

W obu wspomnianych prasach obwiedniowych (tj. PXW-100 oraz T-200) zastosowano hydrauliczny system zasilania narzędzi dolnych. Schemat ideowy, na podstawie patentu A. Barneta [1], pokazano na rys. 2.15. Matryca dolna znajdowała się na ruchomym suwaku prasy, natomiast wewnątrz tego suwaka znajdował się wyrzutnik. Jego podstawowym zadaniem było usuwanie wypraski z matrycy. Ponadto, zastosowana konstrukcja układu suwak-wyrzutnik powodowała, że wypychacz może być również wykorzystywany czynnie w trakcie realizacji procesu technologicznego.

W przypadku prasy Barneta, skok suwaka jest regulowany za pomocą nakrętki oporowej, a zastosowane słupy prowadzące pełnią rolę zamka matryc. W przypadku prasy Marciniaka, skok suwaku jest regulowany poprzez pierścienie oporowe przytwierdzone do czołowej powierzchni suwaka. Dodatkowo, prasa T-200 (produkowana w latach dziewięćdziesiątych XX wie-



Rys. 2.15. Schemat przedstawiający napęd hydrauliczny suwaka prasy obwiedniowej wraz z wyrzutnikiem (zespół narzędzi dolnych) według konstrukcji A. Barneta [1]

ku), jest wyposażona w urządzenia zwiększające stopień mechanizacji procesu technologicznego.

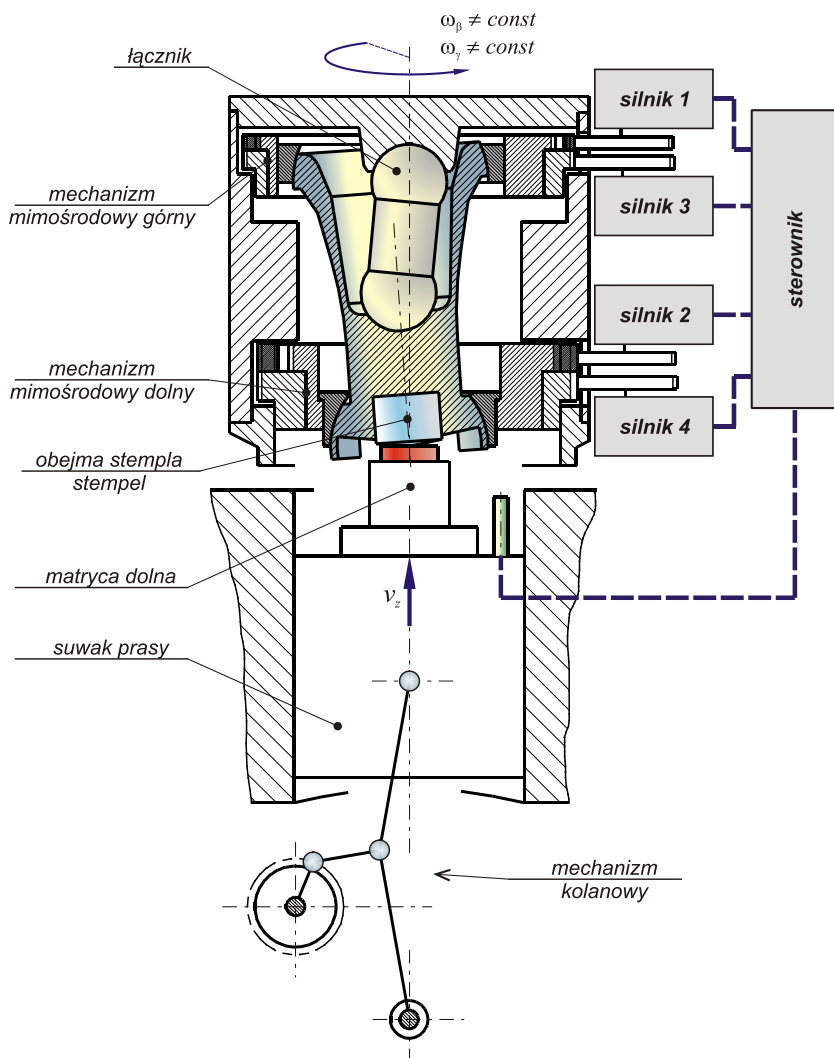
Najbardziej nowoczesne prasy obwiedniowe (T-300 oraz T-630) to maszyny charakteryzujące się wysoką wydajnością, dostosowane do produkcji wielkoseryjnej oraz masowej. Wyposażone są między innymi w urządzenia automatyzujące proces produkcji wypraski oraz nowoczesne systemy sterowania [9, 71]. Przykładowa fotografia przedstawiająca prasę T-630 (o naciśku 6300 kN), została zamieszczona na rys. 2.16.



Rys. 2.16. Nowoczesna prasa z wahającą matrycą (obwiedniowa precesyjno-nutacyjna, typu T6) o oznaczeniu T-630, która jest produkowana przez szwajcarskiego producenta maszyn „H. Schmid Ltd.” [71]; zastosowany mechanizm napędu suwaka bazuje na konstrukcji opracowanej przez A. Berneta

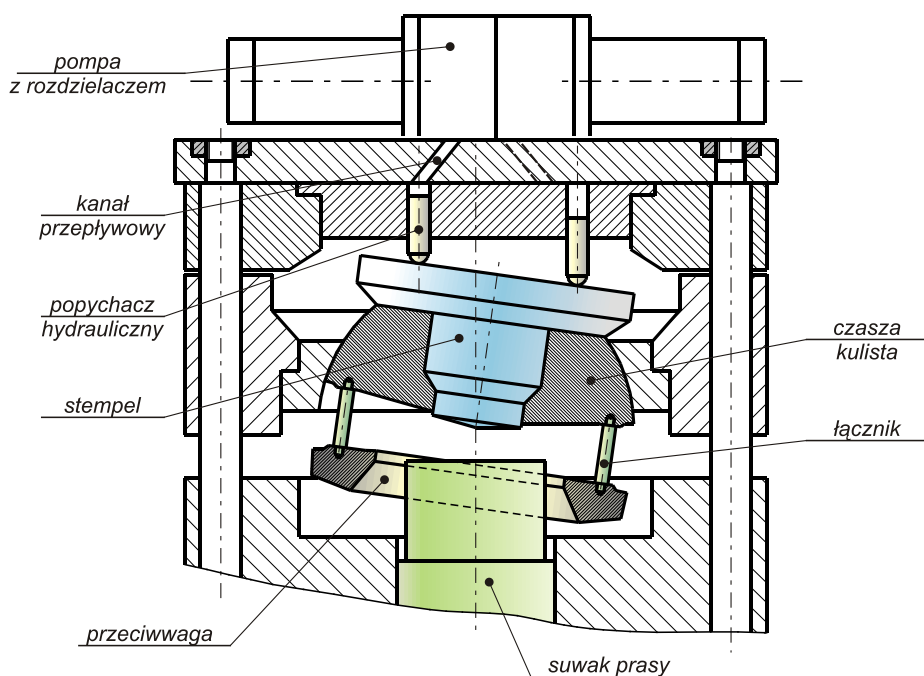
Ostatnie dwudziestolecie to okres, w którym poszukiwano nowych rozwiązań technicznych napędu pras obwiedniowych. W 1991 roku w Japoni, zespół pod kierunkiem T. Sato [68] opatentował maszynę, w której zastosowano ciekawy sposób wymuszenia ruchu precesyjno-nutacyjnego stempla. Schemat przedstawiający prasę Sato pokazano na kolejnym rys. 2.17. Mechanizm napędowy stempla składa się z dwóch niezależnych układów pierścieni i kół mimośrodowych, które są napędzane przez cztery silniki elektryczne. Układ mimośródów wprawia w ruch wahający obejmę stempla.

Obejma ta jest połączona z górną częścią korpusu za pomocą ruchomego łącznika. Jego głównym zadaniem jest przenoszenie obciążenia.



Silniki elektryczne są kontrolowane za pomocą sterownika oraz programu komputerowego. Sterownik dodatkowo czytuje informacje z sensora umieszczonego w dolnym suwaku prasy. Ciekawym rozwiązaniem, nie spotykanym do tej pory, jest napęd suwaka realizowany za pośrednictwem mechanizmu kolanowego. Cechy konstrukcyjne prasy Sato sprawiają, że maszyna ta idealnie nadaje się do kształtowania wyprasek o bardzo małej grubości, przy stosunkowo dużych naciskach.

Innym kierunkiem rozwoju pras obwiedniowych było podjęcie badań innowacyjnych, mających na celu stworzenia bardziej elastycznego, i zarazem prostego, napędu ruchu precesyjno-nutacyjnego stempla. Wielu badaczy zdecydowało się (również Z. Marcianiak) na zastąpienie przekładni mechanicznych odpowiednim układem zasilania hydraulicznego. Spośród wielu



Rys. 2.18. Schemat napędu stempla w prasie obwiedniowej opracowanej przez W. Schlattera [69, 70]; opis w tekście

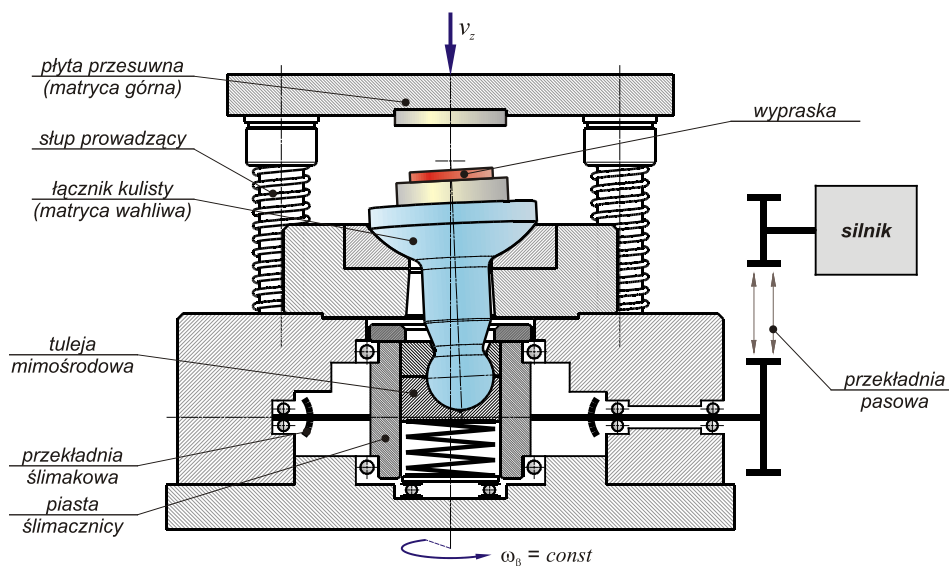
opracowanych rozwiązań technicznych, warto przedstawić propozycję W. Schlattera, która została opatentowana w 1995 roku [69]. Schemat przedstawiający fragment omawianej prasy pokazano na rys. 2.18. Ciekawym rozwiązaniem technicznym jest zastosowanie przeciwwagi dla stempla i czasy kulistej. Zapewnia to bardziej równomierną pracę maszyny oraz minimalne obciążenie popychaczy hydraulicznych (wynikające tylko z realizacji procesu kształtowania wypraski). Popychacze (co najmniej trzy) są zasilane płynem hydraulicznym poprzez kanały przepływowe. Ciśnienie, moment oraz czas działania płynu na dany popychacz jest regulowany przez rozdzielacz. Rozdzielacz jest sterowany albo mechanicznie, albo elektronicznie (numerycznie). Cenną zaletą omawianego sposobu napędu stempla jest to, że zapewnia on uzyskanie dowolnego rodzaju ruchu precesyjno-nutacyjnego.

2.4. Przyrząd specjalny PSKO-1

Przyrząd specjalny PSKO-1, zaprojektowany w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, jest urządzeniem przeznaczonym do kształtowania obwiedniowego wyprasek cylindrycznych lub pierścieniowych w warunkach laboratoryjnych. Może on współpracować z dowolną, uniwersalną prasą hydrauliczną (mechaniczna nie jest zalecana), która posiada określoną wielkość przestrzeni roboczej (stół o wymiarach 600 x 600 mm, wysokość 420 mm oraz skok suwaka 100 mm) oraz nacisk 800 kN.

Uproszczony schemat kinematyczny przyrządu PSKO-1 przedstawiono na rys. 2.19 [52]. Jego konstrukcja umożliwia realizację ruchu precesyjnego matrycy dolnej, która jest przymocowana do łącznika kulistego. Prędkość kątowa ω_{β} matrycy jest stała, a kąt pochylenia łącznika jest ustalany za pomocą tulei mimośrodowej – standardowo kąt ten wynosi $\gamma = 3^{\circ}$. Natomiast matryca górna jest przytwierdzona do ruchomej płyty, która wykonuje ruch postępowy z prędkością v_z . Prędkość ta, oraz siła nacisku, jest zdeterminowana przez suwak prasy.

Ruch precesyjny (tzw. obwiedniowy po okręgu) łącznika kulistego wynika z obrotu tulei mimośrodowej, która jest osadzona w piaście ślimacznicy. W przyrządzie zastosowano zarówno przekładnię ślimakową, jak i przekładnię pasową o łącznym przełożeniu 1:20. Napęd pochodzi od silnika elektrycznego, o mocy 5 kW i obrotach 1440 obr·min⁻¹, który jest sterowany za pomocą falownika wektorowego. Dzięki temu uzyskuje się prędkość ruchu



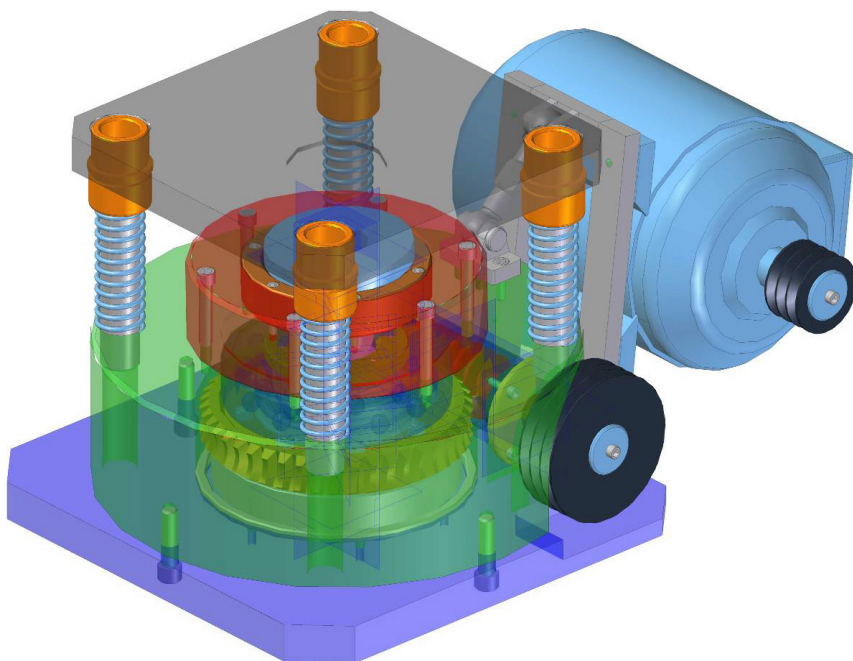
Rys. 2.19. Schemat przyrządu specjalnego PSKO-1 [52]; opis w tekście

precesyjnego narzędzia w zakresie $\omega_p = 50 \div 72 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$. Na podstawie cech kinematycznych, przyrząd zaliczany jest do maszyn obwiedniowych typu T3.

Na kolejnym rysunku 2.20 pokazano ogólny wygląd przyrządu w formie modelu wirtualnego. Całkowita jego masa, obliczona w programie CAD, wynosi ok. 500 kg.

Dodatkowo wykonane obliczenia numeryczne, które opublikowano w pracy własnej [56], dotyczące procesu prasowania obwiedniowego wyprasek w warunkach kształtowania na przyrządzie PSKO-1, pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- przeniesienie ruchu wahającego na matrycę dolną oraz zmiana kształtu powierzchni czołowej tego narzędzia powoduje istotne zmiany w ogólnym charakterze przebiegu kształtowania obwiedniowego wypraski;
- przyrząd specjalny PSKO-1 pozwala na rozszerzenie możliwości technologicznych oraz uzyskiwanie wyprasek o odmiennych własnościach wytrzymałościowych, w porównaniu to schematu tradycyjnego (np. uzyskiwanego na typowych maszynach obwiedniowych), realizowanego przy takich samych parametrach prasowania;



Rys. 2.20. Model wirtualny CAD przyrządu specjalnego PSKO-1

- prasowanie obwiedniowe realizowane na omawianym przyrządzie powoduje zmniejszenie maksymalnej siły kształtowania oraz korzystną zmianę ogólnego charakteru przebiegu tej siły (w funkcji czasu), w porównaniu z metodą tradycyjnego prasowania obwiedniowego.

3. ZARYS TECHNOLOGII PRASOWANIA OBWIEDNIOWEGO

Zagadnienia technologiczne prasowania obwiedniowego zostaną omówione w kontekście procesu realizowanego na prasach specjalnych z wahającą matrycą, których konstrukcja oparta jest na rozwiązaniu zaproponowanym przez Z. Marciniaka oraz A. Berneta [1, 32, 35, 71]. Przedstawicielami tych maszyn są prasa z serii PXW (wg Z. Marciniaka, produkowana przez PLASOMAT) oraz z serii T (wg A. Berneta, produkowana przez H.SCHMiD). Wspólną ich cechą jest m.in. układ narzędzi, składający się z trzech podstawowych obiektów, mianowicie:

- stempla, który wykonuje ruch precesyjno-nutacyjny, przy czym maksymalny kąt jego wychylenia wynosi $\gamma = 2^\circ$;
- matrycy dolnej, wykonującej ruch postępowy;
- wyrzutnika, osadzonego w centralnym otworze matrycy dolnej.

Kolejną wspólną cechą tych maszyn jest to, że podczas realizacji procesu technologicznego, wyrzutnik odgrywa istotną rolę – niejednokrotnie jest on używany również jako narzędzie kształtujące i uczestniczy czynnie w realizacji operacji prasowania wypraski. Typowe parametry wybranych pras obwiedniowych podano w tabeli 3.1. Oprócz prasy T-300, wszystkie podane maszyny umożliwiają realizację procesu kształtowania przy czterech różnych schematach wahania stempla, tj. „po okręgu”, „po prostej”, „po spirali” oraz „po krzywej wielolistnej”. Natomiast podstawową różnicą pomiędzy tymi maszynami jest maksymalny nacisk wywierany przez suwak prasy. Ponadto, wydajność procesu zależy od czasu trwania kształtowania wypraski, który dla omawianych pras przeważnie wynosi nie więcej niż 10 sekund.

W rozdziale tym zostanie podany zarys technologii oraz zasady projektowania wyprasek na przykładzie procesu realizowanego na prasie PXW-100 (względnie PXW-200). Przedstawione informacje stanowią usystematyzowaną wiedzę, pozyskaną na drodze przeglądu i analizy opracowań specjalistycznych, np. [5÷8, 10, 11, 21, 22, 26, 48÷50, 80, 81, 84]. Większość z tych prac skupia się na technologii kształtowania wyprasek wykonanych ze stali. Jednak szereg badań naukowych, w tym również własnych, np. [55÷67], wykazują, że zasady projektowania prasowania obwiedniowego dla wyrobów stalowych można z powodzeniem zastosować również dla wyprasek

wykonanych ze stopów nieżelaznych, ale wykazujących podobne parametry plastyczności w warunkach kucia na zimno (względnie na ciepło).

Tabela 3.1.

Wybrane parametry technologiczne pras obwiedniowych [9, 10, 21, 47, 71, 72]

	PXW-100	PXW-200	T-300	T-630
max. siła prasowania, kN	1600	2000	3000	6300
max. średnica wyrobu, mm	Ø100	Ø150	Ø250	Ø300
prędkość wahań stempla, min ⁻¹	150 / 200	400	<i>b.d.</i>	<i>b.d.</i>
max. kąt wychylenia stempla	2°			
max. prędkość suwaka, mm·s ⁻¹	4,2	24	28	<i>b.d.</i>
wydajność produkcji, szt.·min ⁻¹	4÷7	6÷8	15	8

3.1. Zakres stosowania prasowania obwiedniowego

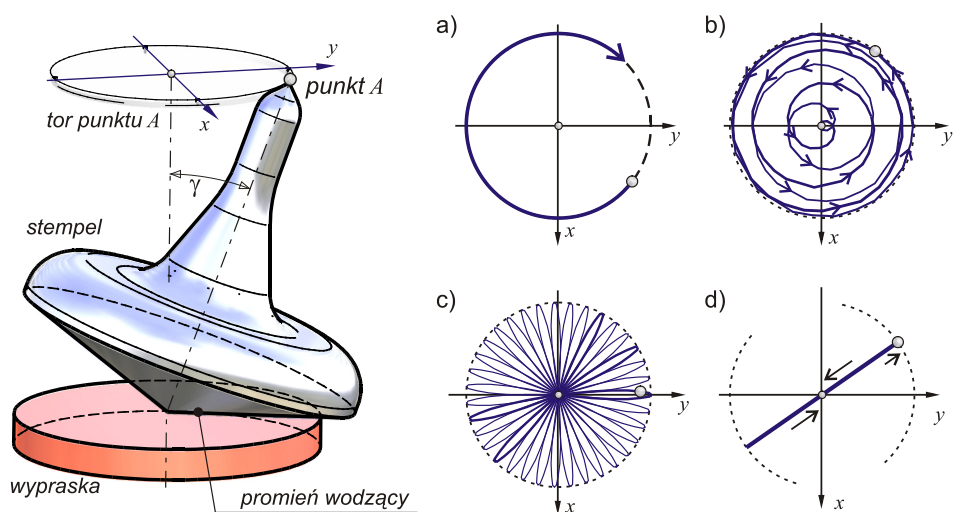
3.1.1. Charakterystyka technologii prasowania obwiedniowego

Ruch wahający stempla

Prasowanie obwiedniowe wyprasek na prasach z serii PXW lub T, w zależności od potrzeb technologicznych, jest realizowane przy jednym z czterech podstawowych rodzajów wahań stempla. Rodzaje ruchu tego narzędzia pokazano schematycznie na rys. 3.1. Umownie jest on przedstawiany za pomocą toru punktu A znajdującego się na osi symetrii narzędzia.

Wybór rodzaju ruchu dla stempla związany jest przede wszystkim z kształtem wypraski. W praktyce spotyka się następujące rodzaje ruchów wahających, które można uzyskać na prasie PXW, mianowicie:

- ruch precesyjny przy stałym kącie (z przedziału $\gamma = 0 \div 2^\circ$) wychylenia stempla, który nazywany jest ruchem według schematu „po okręgu” (rys. 3.1a) – przy tym rodzaju wahań, nacisk jest skupiony wzdłuż promienia wodzącego, znajdującego się na powierzchni czołowej zgniatanej wypraski; nacisk ten przemieszcza się po całej powierzchni czołowej, zgodnie z ruchem okrężnym; ponieważ przy tym rodzaju wahań stempla materiał przemieszcza się w kierunku promieniowym i obwodowym, ruch ten jest odpowiedni do kształtowania wyprasek kołowo-symetrycznych;



Rys. 3.1. Schematy ruchu wahającego stempla, na przykładzie prasy z serii PXW, gdzie: a) ruch „po okręgu”, b) ruch „po spirali”, c) ruch „po krzywej wielolistej”, d) ruch „po prostej”

- ruch precesyjno-nutacyjny, zwany wahaniami stempla według schematu „po spirali” (rys. 3.1b) – nacisk narzędzia na wypraskę, skupiony wzdłuż promienia wodzącego, przemieszcza się nie tylko zgodnie z ruchem okrężnym, ale również wędruje po tym promieniu na zewnątrz oraz do środka materiału; ten rodzaj ruchu narzędzia umożliwia skuteczne płynięcie materiału w kierunku promieniowym, przy jednoczesnym, cyklicznie powracającym momencie dogniatania centralnej części wypraski; ten typ ruchu jest polecany dla kształtowania wyprasek, które posiadają skomplikowane wgłębienia w części centralnej;
- ruch precesyjno-nutacyjny, zwany wahaniami według schematu „po krzywej wielolistej” (rys. 3.1c) – wywołuje on przede wszystkim promieniowe płynięcie materiału, co jest szczególnie korzystne przy kształtowaniu wyprasek posiadających promieniowe występy lub uzębienia (uźebrowania) – np. koła zębate, tarcze uźebione, tarcze sprzęgające itp.;
- ruch nutacyjny, zwany wahaniami według schematu „po prostej” (rys. 3.1d) – stempel waha się w jednej płaszczyźnie, odchylając się od pionu maksymalnie o kąt $\gamma = 2^\circ$; materiał płynie promieniowo, w kierunku za-

wartym w płaszczyźnie wahań narzędzia; ten rodzaj ruchu stempla jest polecany w przypadku kształtowania wyprasek o osi wydłużonej lub posiadających kołnierze wydłużone.

W przypadku zastosowania ruchu „po okręgu”, narzędzia należy projektować dla przewidywanego kąta γ wahania stempla. Natomiast dla pozostałych przypadków, stempel jest projektowany dla maksymalnego kąta wychylenia – tj. $\gamma = 2^\circ$.

Dla ułatwienia identyfikacji typu wahań narzędzia, autor zaproponował symbole reprezentujące poszczególne schematy ruchu [54]. Zatem przyjęto, że oznaczenia (T), (S), (R) oraz (P) oznaczają typ ruchu wahającego, przedstawionego odpowiednio na rys. 3.1a, b, c oraz d.

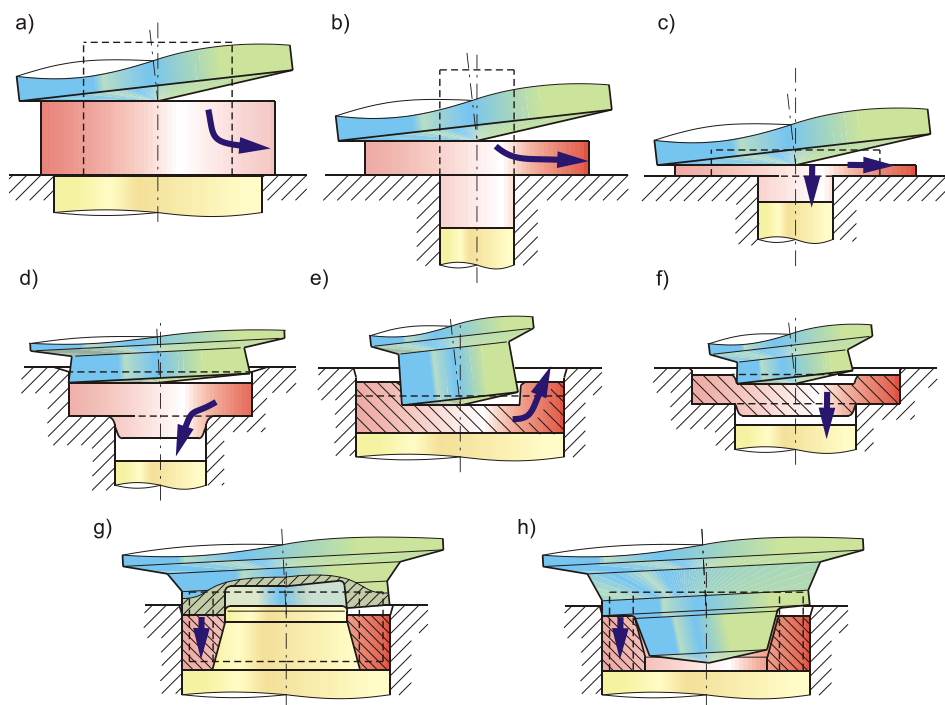
Zasadnicze metody kształtowania

Proces technologiczny prasowania obwiedniowego wypraski, który jest realizowany na prasach typu PXW (lub z serii T), może odbywać się według ośmiu zasadniczych metod. Pokazano je na rys. 3.2, a szczegółowy ich opis zamieszczono w opracowaniu własnym [54]. Metody te opisano zgodnie z przyjętą klasyfikacją ze względu na charakter płynięcia materiału.

W praktyce, dominującymi sposobami kształtowania wypraski poprzez prasowanie obwiedniowe są spęczanie oraz wyciskanie. W przypadku spęczania wyróżnia się dwie metody zasadnicze, tj.: **prasowanie swobodne** (rys. 3.2a) oraz **prasowanie kołnierza** (rys. 3.2b). W obu przypadkach materiał płynie w kierunku promieniowym, przy czym metoda druga charakteryzuje się tym, że średnica początkowa wsadu jest taka sama jak średnica wypychacza. Dzięki temu, materiał wsadowy można umieścić w otworze centralnym matrycy dolnej, co w rezultacie zapewnia naturalne jego pozycjonowanie i nie wymaga się dodatkowych czynności przygotowawczych, np. nawiercania wsadu.

Popularnymi metodami zasadniczymi są również **wyciskanie współbieżne** (rys. 3.2d) oraz **wyciskanie przeciwbieżne** (rys. 3.2e). W tych przypadkach, proces technologiczny jest realizowany w sposób, w którym materiał płynie osiowo zgodnie (lub przeciwnie) do kierunku względnego przemieszczania się stempla. Natomiast płynięcie materiału w kierunku promieniowym jest ograniczane przez ścianki narzędzia.

Spotykanymi metodami zasadniczymi w prasowaniu obwiedniowym wyprasek walcowych są również: **kształtowanie obrzeża** (rys. 3.2c) oraz **przesadzanie** (rys. 3.2f). W pierwszym przypadku, średnica początkowa wsadu



Rys. 3.2. Zasadnicze metody kształtowania wypraski [54], gdzie: linia przerywana przedstawia zarys wsadu, a strzałka reprezentuje kierunek płynięcia materiału

jest większa od średnicy otworu centralnego matrycy. Materiał płynie w kierunku promieniowym oraz osiowo – tj. w kierunku otworu centralnego narzędzia. W rezultacie uzyskuje się zwiększenie średnicy zewnętrznej wypraski kosztem zmniejszenia grubości obrzeża wyrobu. Grubość części środkowej wyrobu pozostaje niezmienną (efekt przemieszczenia się materiału w centralnej części wypraski do otworu matrycy). W przypadku przesadzania, proces kształtowania wypraski jest realizowany na tej zasadzie, że następuje osiowe przemieszczenie materiału w określonych strefach, względem innych stref wyrobu. Pozwala to uzyskać wypraskę o grubości stałej, niezmienną w stosunku do wartości początkowej (grubości wsadu).

W przypadku, gdy materiał wsadowy ma postać tulei lub pierścienia (tzw. „plastra” ciętego z rury), proces prasowania obwiedniowego jest realizowany według metody zasadniczej, nazywanej **prasowaniem pierścienia**.

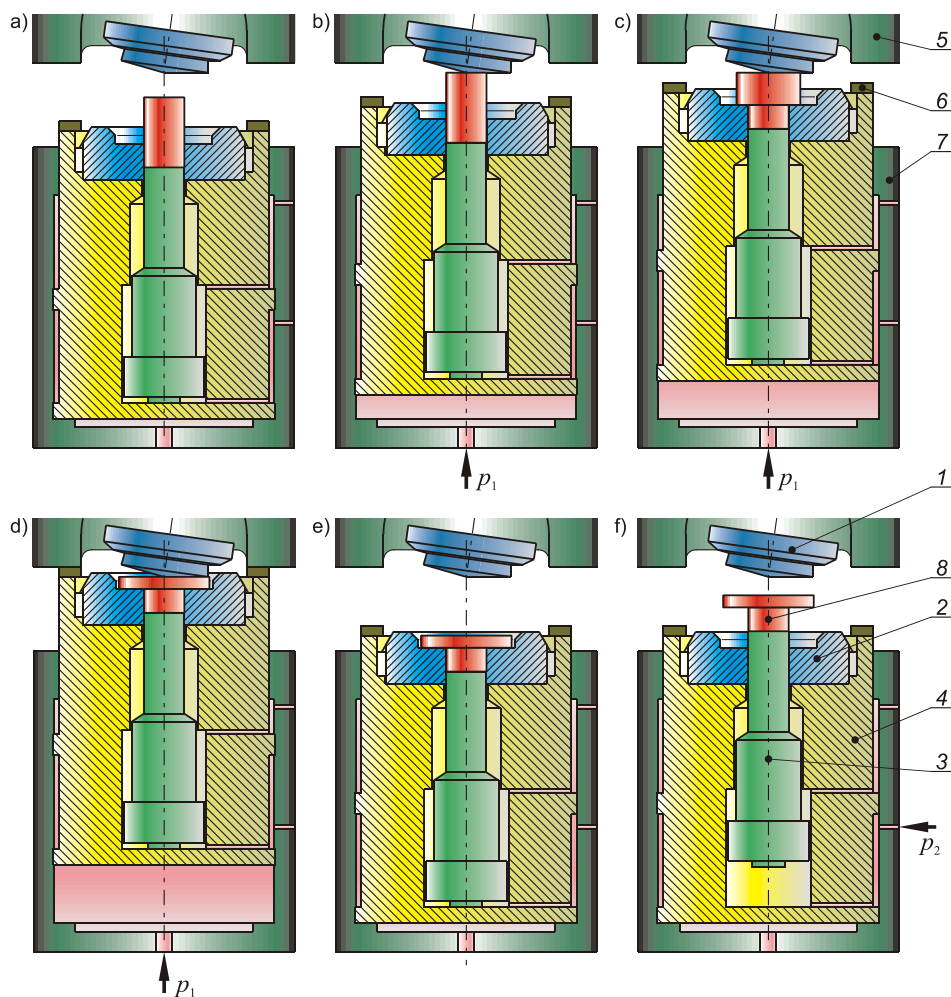
Najczęściej spotykana w praktyce odmiana tej metody, to prasowanie powierzchni wewnętrznej wypraski na trzpieniu, który jest usadowiony na wypychaczu (rys. 3.2g). Rzadziej stosuje się rozwiązanie, które charakteryzuje się umieszczeniem trzpienia kształtującego na czołowej powierzchni stempla (rys. 3.2h). Takie rozwiązanie techniczne posiada ograniczenie związane z niekorzystnym obciążeniem zginającym, działającym na tą część narzędzia.

Schematy realizacji procesu technologicznego

Jak już wcześniej wspomniano, proces prasowania obwiedniowego z użyciem prasy typu PXW (lub z serii T) jest realizowany przy udziale wyrzutnika. Jest on taktowany jako dodatkowe narzędzie, a jego rola może być ograniczona tylko do usunięcia wypraski z matrycy dolnej, ale najczęściej uczestniczy on w kształtowaniu wyrobu w sposób czynny. Zatem, w zależności od charakteru użycia wypychacza podczas procesu technologicznego, wyróżnia się dwa sposoby realizacji prasowania obwiedniowego. Zostały one przedstawione na rys. 3.3 (sposób I) oraz na rys. 3.4 (sposób II), na przykładzie kształtowania wypraski typu sworzeń z kołnierzem.

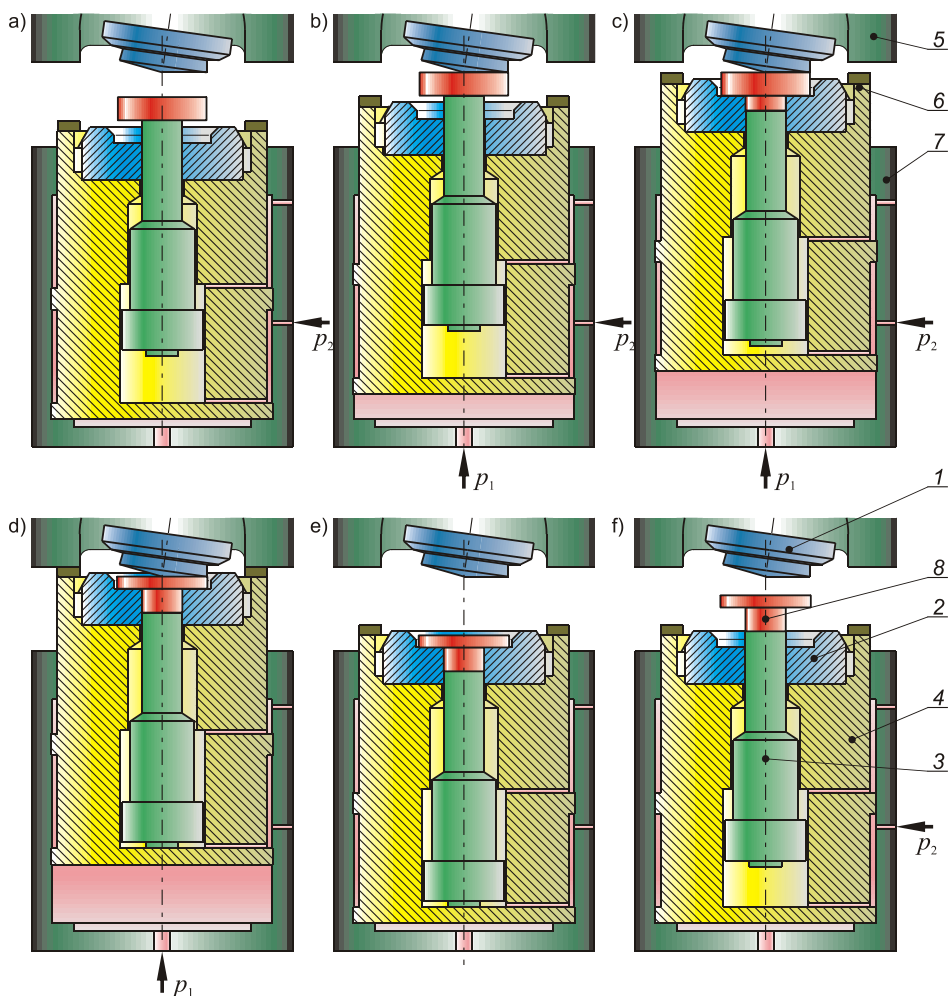
Pierwszy sposób prasowania obwiedniowego polega na tym, że w trakcie kształtowania wypraski 8, wyrzutnik 3 znajduje się w dolnym położeniu oraz przemieszcza się razem z suwakiem zewnętrznym 4 (znajdującym się w korpusie dolnym 7). Proces rozpoczyna się od umieszczenia wsadu (rys. 3.3a), albo bezpośrednio w wykroju matrycy dolnej 2, lub wewnątrz otworu centralnego narzędzia – wtedy wsad spoczywa również na wyrzutniku. Następnie ciśnienie p_1 , działające na suwak zewnętrzny, powoduje dosunięcie narzędzi dolnych (wraz ze wsadem) do stempla 1 (rys. 3.3b). Po czym, w wyniku zmiany ciśnienia p_1 , rozpoczyna się faza pierwsza kształtowania wypraski 8, w której prędkość roboczą suwaka jest niezmienna. Osiągnięcie maksymalnego ciśnienia p_1 powoduje rozpoczęcie drugiej fazy kształtowania (rys. 3.3c) – prędkość suwaka zmniejsza się w sposób adaptacyjny, a ciśnienie p_1 jest stałe. Faza ta jest realizowana aż do momentu zetknięcia pierścienia dystansowego 6 z powierzchnią oporową korpusu górnego 5 (rys. 3.3d). W przypadku prasy z serii T, skok suwaka jest regulowany za pomocą nakrętki oporowej (rys. 2.15). Po zakończeniu kształtowania wypraski, suwak wraz z wyrzutnikiem jest wycofywany (rys. 3.3e), a następnie ciśnienie p_2 powoduje ruch wyrzutnika do góry (rys. 3.3f) – następuje usunięcie wypraski 8 z matrycy 2.

Drugi sposób prasowania obwiedniowego (rys. 3.4) polega na tym, że wyrzutnik 3 uczestniczy czynnie w procesie kształtowania wypraski. Materiał wsadowy jest umieszczany na powierzchni czołowej wyrzutnika, który znajduje się w górnym położeniu (rys. 3.4a). Pozycja ta jest wymuszona działaniem ciśnienia p_2 , które zazwyczaj jest wywoływane przez akumulator. Następnie, ciśnienie p_1 (wytworzone przez pompę) działając na suwak ze-



Rys. 3.3. Sposób I realizacji prasowania obwiedniowego; opis w tekście

wewnętrzny 4, powoduje dosunięcie wsadu do stempla 1 (rys. 3.4b). W tym czasie wyrzutnik nadal pozostaje w górnym położeniu. Podczas kształtowania wypraski (rys. 3.4c), matryca dolna 2 przemieszcza się, najpierw ze stałą prędkością roboczą, a następnie przy stałym ciśnieniu p_1 . W wyniku wzrostu oporu plastycznego kształtowania wypraski, wyrzutnik cofa się pomimo, że nadal działa na niego ciśnienie p_2 . W końcowej fazie procesu kształtowania wypraski, gdy pierścień dystansowy 6 już styka się z powierzchnią oporową



Rys. 3.4. Sposób II realizacji prasowania obwiedniowego; opis w tekście

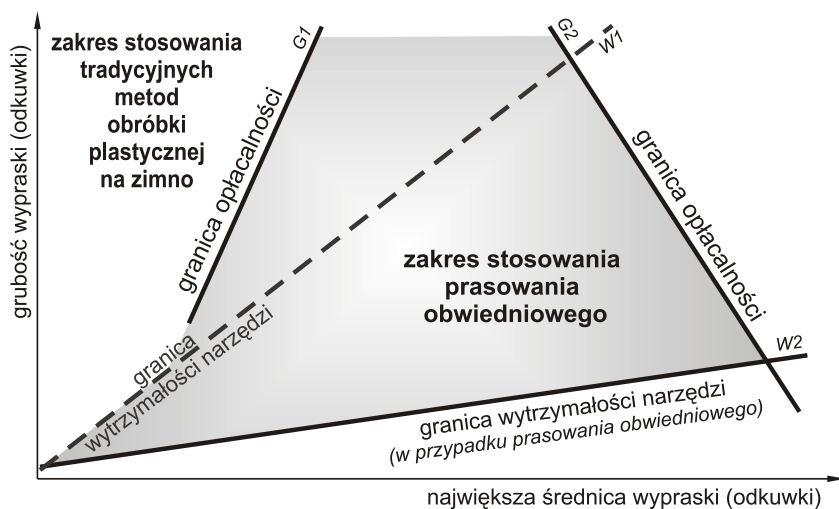
korpusu 5 (rys. 3.4d), ciśnienie p_2 jest równe zero, a wyrzutnik znajduje się w dolnym położeniu. Następnie, następuje wycofanie narzędzi (rys. 3.4e), po czym ciśnienie p_2 (tym razem wytworzone przez pompę) powoduje, że wyrzutnik 3 usuwa wypraskę 8 z matrycy 2.

3.1.2. Możliwości prasowania obwiedniowego

Zakres stosowania prasowania obwiedniowego

Prasowanie obwiedniowe, realizowane na prasie typu PXW (lub serii T), ma zastosowanie głównie do kształtowania na zimno odkuwek (wyprasek) wykonanych ze stali lub stopów nieżelaznych. Typowe wyroby, wytwarzane tą technologią, charakteryzują się stosunkowo małą grubością względną g/D , która jest wyrażana jako stosunek grubości wypraski (lub jej kołnierza) do maksymalnej średnicy wyrobu.

Zakres stosowania prasowania obwiedniowego oraz tradycyjnych metod obróbki plastycznej na zimno (np. kucia, wyciskania, spęczania, prasowania itp.) przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 3.5. Cechą charakterystyczną tradycyjnych metod kształtowania odkuwek jest to, że narzędzia wywierają



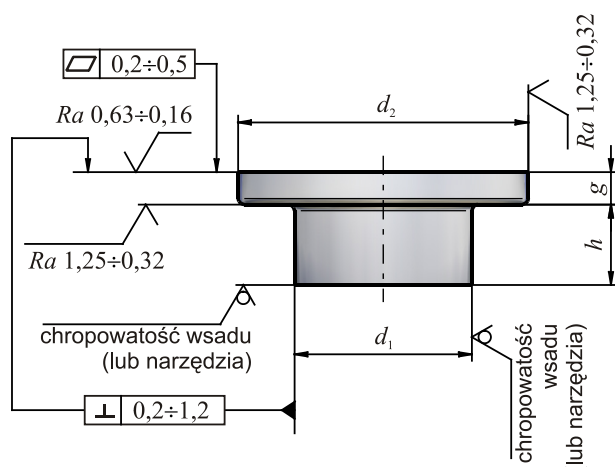
Rys. 3.5. Schemat poglądowy zakresu stosowania tradycyjnych metod obróbki plastycznej na zimno (obszar pomiędzy osią rzędną, linią $W1$ oraz $G1$) oraz prasowania obwiedniowego (obszar ograniczony liniami $W2$, $G1$ oraz $G2$)

ją nacisk na materiał całą swoją powierzchnią roboczą [4, 43, 54, 78]. W efekcie, przy zbyt małej grubości względnej g/D wyrobu, nacisk ten może osiągnąć maksimum wytrzymałości matrycy, co ewidentnie wyklucza możliwość kształtowania przedmiotów o tak małej grubości względnej. Na rysunku 3.5 ograniczenie to pokazano przerywaną linią *W1*. Natomiast podczas prasowania obwiedniowego, maksymalny nacisk (wywierany przez narzędzie na fragment wypraski) jest niewiele większy od granicy plastyczności kształtowanego materiału [54]. Powoduje to, że linia reprezentująca granicę wytrzymałości narzędzi (rys. 3.5 – linia *W2*) przyjmuje bardzo korzystny przebieg, powodując znaczące powiększenie obszaru stosowania obróbki plastycznej na zimno.

Na podstawie literatury specjalistycznej, np. [5, 22, 30, 50, 76, 84], stwierdza się, że zakres stosowania technologii prasowania obwiedniowego na zimno nie jest zbyt szeroki. Podstawowym czynnikiem ograniczającym zakres stosowania technologii prasowania obwiedniowego jest opłacalność procesu (pomijając wcześniej wspomnianą granicę wytrzymałości narzędzi). Na rys. 3.5 linia *G2* reprezentuje ograniczenie wynikające z faktu, że kształtowanie wyprasek, o średnicy D większej od granicznej (wartość ta jest podawana w specyfikacji maszyny), jest nieopłacalne z uwagi na zbyt duży czas trwania procesu kształtowania. Wynika to z adaptacyjnego zmniejsza prędkość dosuwu matrycy do takiej wartości, przy której będzie możliwe dalsze odkształcanie wypraski (oczywiście przy ustalonej, maksymalnej sile prasowania). Natomiast linia *G1* określa minimalny zakres średnicy wypraski, przy której jest zasadne stosowanie prasowania obwiedniowego. Dla wyprasek stalowych jest to wartość w zakresie 30÷50 mm. Jest to związane z tym, że kształtowanie na zimno odkuwek o małych średnicach jest bardziej opłacalne przy stosowaniu metod tradycyjnych.

Dokładność wyprasek prasowanych obwiedniowo na zimno

Na jakość wyprasek (odkuwek), otrzymywanych poprzez prasowanie obwiedniowe na zimno, w dużym stopniu wpływają parametry procesu produkcyjnego. Nie mniej jednak, uzyskane wypraski zazwyczaj odznaczają się dobrą dokładnością wykonania. Ich tolerancja wymiarowa jest w granicach 7÷9 klasy dokładności (tj. $0,10 \div 0,03$ mm), a według niektórych źródeł, np. [10], może osiągnąć nawet 6 klasę. Jakość powierzchni wyrobu jest w zasadzie zdeterminowana dokładnością wykonania powierzchni roboczych na-



Rys. 3.6. Wymiary tolerowane (tabela 3.2), tolerancja kształtu oraz chropowość powierzchni wypraski kształtowanej obwiedniowo na zimno

rzędzi. Typowa chropowość uzyskiwana jest w przedziale $7 \div 10$ klasy – tj. parametr Ra osiąga wartość w zakresie $1,25 \div 0,16 \mu\text{m}$.

Na rys. 3.6 pokazano wymiary charakterystyczne, dokładność kształtu oraz chropowość powierzchni wypraski o typowym kształcie, jakie są możliwe do uzyskiwania w procesie technologicznym prasowania obwie-

dniowego na zimno na prasach typu PXW. Natomiast w tabeli 3.2 podano szczegółowy zakres pola tolerancji dla średnic d_1 i d_2 , grubości g oraz wysokości h wypraski. Należy zaznaczyć, że według literatury specjalistycznej (np. [24]), zaleca się stosowanie materiału wsadowego z prętów łuszczonych lub ciągnionych, które są cięte na piłach mechanicznych. Zapewnia to, że jakość powierzchni wypraski będzie spełniała wymagane standardy.

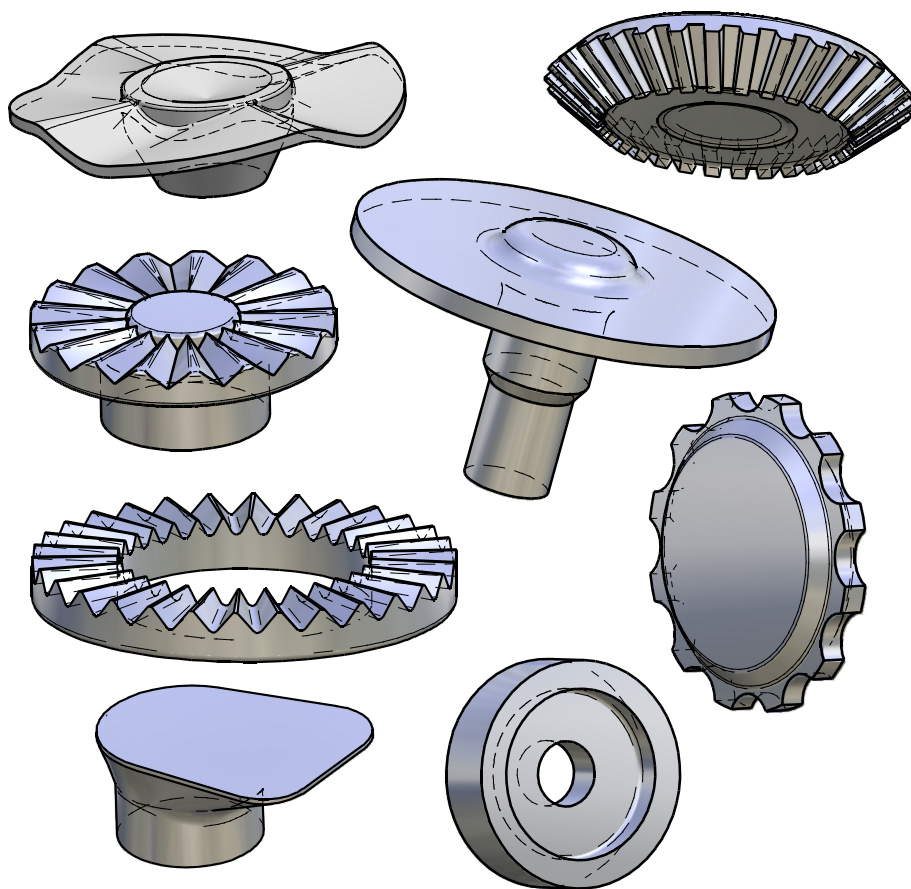
Tabela 3.2.

Jednostronne pole tolerancji dla wymiarów wypraski umieszczonej na rys. 3.6

Średnica (d_1, d_2)		Grubość, wysokość (g, h)	
wymiar nominalny, mm	pole tolerancji, mm	wymiar nominalny, mm	pole tolerancji, mm
0 ÷ 6	0,03	0 ÷ 4	0,10
6 ÷ 18	0,04	4 ÷ 10	0,15
18 ÷ 30	0,06	10 ÷ 18	0,20
30 ÷ 50	0,07	18 ÷ 30	0,25
50 ÷ 80	0,08	30 ÷ 50	0,30
80 ÷ 120	0,10		

Podział wyprasek oraz charakterystyka sposobu ich wykonania

Jak już wiadomo, technologia prasowania obwiedniowego na zimno może być z powodzeniem wykorzystywana do dokładnego kształtowania wyrobów, które posiadają elementy płaskie (duże wymiary poprzeczne i małą wysokość) i z reguły wykazują symetrię osiową. Stosując złożony schemat wahań stempla, można również uzyskać wyroby, które posiadają jedno- lub dwustronne występy poprzeczne. Na rys. 3.7 pokazano przykładowe wypraski. W zależności od kształtu oraz trudności wykonania, wyroby prasowane obwiedniowo można podzielić na cztery główne grupy, mianowicie:



Rys. 3.7. Przykłady wyprasek prasowanych na zimno

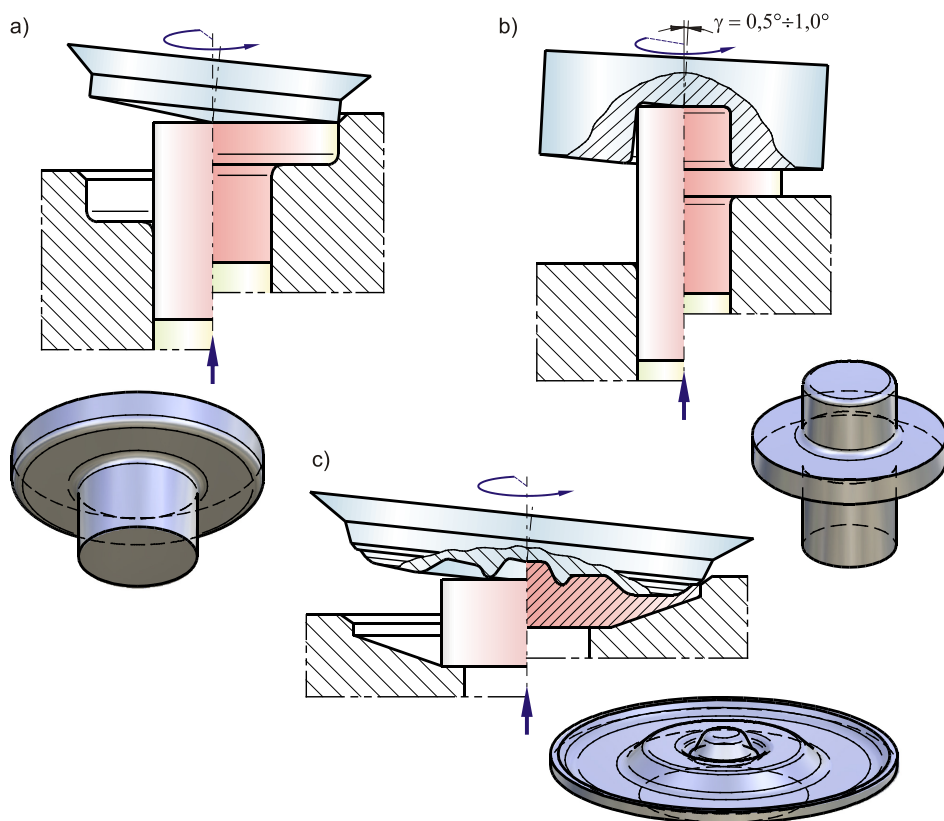
- **grupa I** – do niej należą wypraski osiowosymetryczne pełne, o kształtach względnie prostych, najczęściej płaskie – tzw. typu tarcza, lub posiadające dodatkowo krótkie występy centralne (tzw. trzony);
- **grupa II** – wypraski drażone osiowosymetryczne o kształtach prostych, które posiadają centralny otwór; wypraski takie są wykonywane z tulei lub z pierścienia;
- **grupa III** – wypraski pełne lub drażone, w których wykonuje się na gotowo uzębienie lub uzębrowanie cykliczno-symetryczne; do tej grupy zalicza się przede wszystkim koła zębate, tarcze uzębione itd.;
- **grupa IV** – do niej należą wypraski pełne lub drażone o kształcie złożonym i charakteryzujące się dużym stopniem trudności wykonania; są to wypraski o nieregularnych kształtach, posiadające przesadzenia, wgłębienia niesymetryczne i niecykliczne, elementy spłaszczane i/lub są wykonywane przy udziale tłoczenia lub cięcia; z reguły podczas procesu kształtowania wypraski, narzędzia wymagają dokładnego i wzajemnego ustawienia;

W praktyce wykonuje się najczęściej wyroby, które odznaczają się złożonym kształtem – tak jak to pokazano na rys. 3.7. Ponadto, podczas kształtowania na zimno dąży się, aby stopień odkształcenia był możliwie najmniejszy i jednorodny w całej objętości materiału. Oznacza to, że rzadko spotyka się przypadki, w których wypraska jest kształtowana przy udziale tylko jednej metody zasadniczej (rys. 3.2). Niemniej jednak, zawsze w danym procesie można wskazać przeważający sposób płynięcia materiału. Stąd wynika, że prasowanie obwiedniowe wyprasek można również klasyfikować w oparciu o dominujący charakter płynięcia materiału. Zgodnie z literaturą specjalistyczną [10, 22], można wyróżnić aż 28 typowych procesów, które są możliwe do zrealizowania na prasie typu PXW.

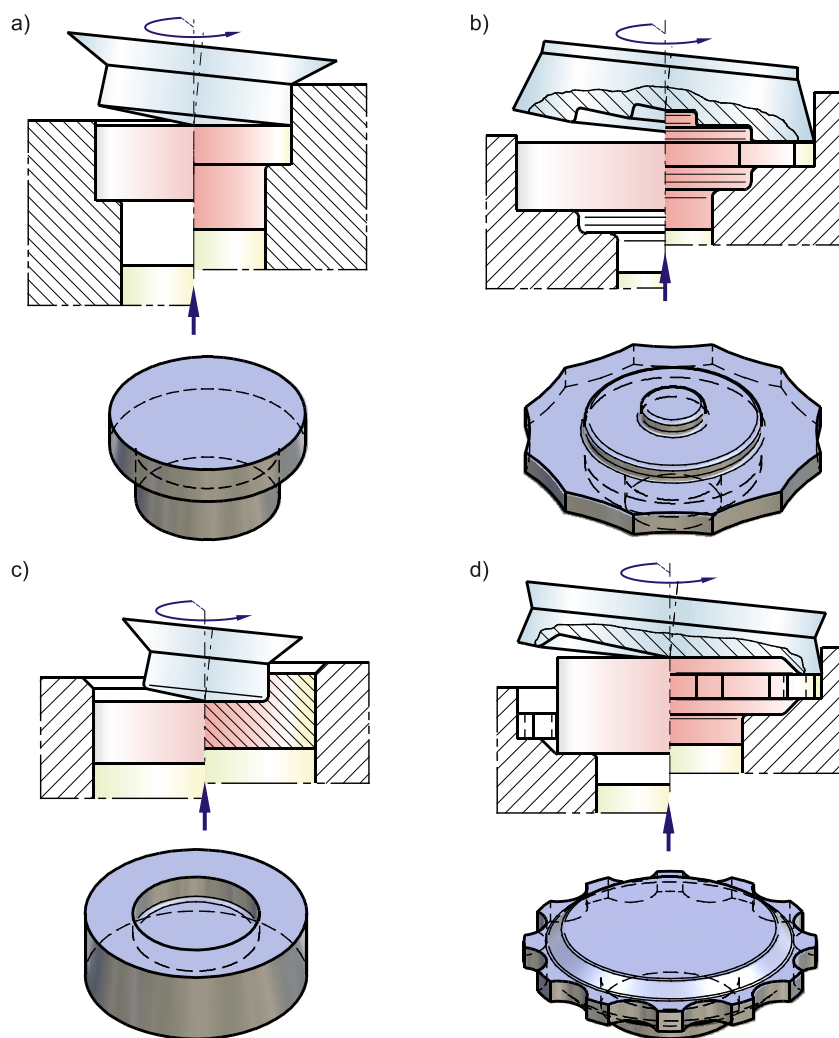
Szczegółowa analiza stanu wiedzy pozwoliła uszeregować wcześniej wspomniane typowe procesy prasowania obwiedniowego i ograniczyć ich ilość do siedmiu. Zatem, uwzględniając wprowadzony przez autora podział wyprasek na grupy, wyróżniono następujące typowe (wykazujące pewne podobieństwo) **sposoby prasowania obwiedniowego**:

- wyprasek (pełnych – rys. 3.8, lub drażonych) z dominacją **spęczania**; sposób ten jest stosowany zarówno dla materiałów łatwo-, jak i trudno-odkształcalnych, ponieważ spęczanie obwiedniowe może zastąpić nawet cztery operacje kształtowania na prasach konwencjonalnych;

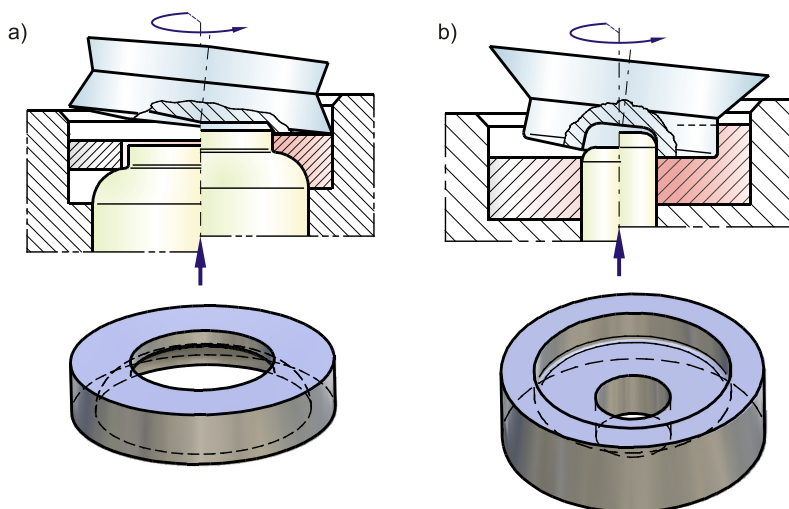
- wyprasek (pełnych – rys. 3.9, lub drażonych – rys. 3.10) z dominacją **wyciskania** – ten sposób kształtowania jest powszechnie stosowany głównie dla wyrobów wykonanych z materiałów trudnoodkształcalnych, ponieważ do uzyskania wyrobu, z takiego materiału na konwencjonalnych prasach, konieczne są co najmniej dwie operacje;



Rys. 3.8. Prasowanie obwiedniowe ze spęczaniem materiału na końcu wypraski (a), pośrodku (b) oraz na całej jej wysokości (c); lewa strona rysunku przedstawia początek procesu, kształt i umiejscowienie wsadu; prawa strona – pokazuje uzyskaną wypraskę; strzałki reprezentują umownie sposób i kierunek ruchu narzędzi

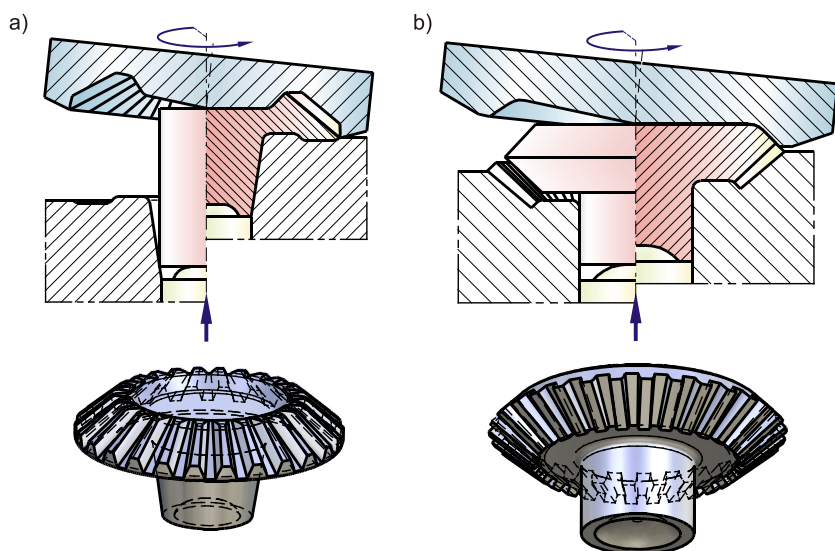


Rys. 3.9. Prasowanie obwiedniowe wyprasek pełnych z dominacją wyciskania współbieżnego (a), złożonego (b), przeciwbieżnego (c) lub poprzecznego kołnierza (d); lewa strona rysunku przedstawia początek procesu, kształt i umiejscowienie wsadu; prawa strona – pokazuje uzyskaną wypraskę; strzałki reprezentują umownie sposób i kierunek ruchu narzędzi



Rys. 3.10. Prasowanie obwiedniowe wyrasek drażonych z dominacją wyciskania współbieżnego (a) lub przeciwbieżnego (b)

- wyrasek płaskich z **dotłaczaniem** – jest on stosowany w przypadku produkcji wyrobów wykonanych z materiałów trudnoodkształcalnych, których znaczne wymiary poprzeczne (w stosunku do małej wysokości) wymuszają użycia maszyn o bardzo dużych naciskach; materiałem wsadowym dla tej operacji jest zazwyczaj półwyrób;
- o **złożonym** charakterze płynięcia materiału – sposób ten reprezentuje pewną grupę operacji, gdzie w trakcie kształtowania wyraski może wystąpić zarówno wyciskanie, spęczanie, przesadzanie i/lub dotłaczanie; grupa tych operacji jest szeroko stosowana w produkcji na gotowo dokładnych wyrobów o złożonym kształcie;
- **uzębień** (rys. 3.11) – na prasie typu PXW można wykonywać koła zębate (tarcze uzębione oraz tym podobne wyroby) na gotowo, w których uzyskuje się uzębienie w 6÷8 klasie dokładności; sposób ten przynosi szczególnie duże korzyści ekonomiczne;
- wyrasek cienkościennych poprzez **tlóczenie** – sposób ten jest wykorzystywany do kształtowania złożonych, cylindrycznych wyrobów wykonanych z grubej blachy, z materiałów trudnoodkształcalnych;



Rys. 3.11. Prasowanie obwiedniowe uzębień za pomocą stempla (a) lub matrycy dolnej (b)

- wyprasek drążonych z jednoczesnym wywijaniem kołnierza [53] – jest to proces prasowania obwiedniowego, który jest obecnie rozwijany przez autora.

Według J. Grześkowiaka [10], podczas prasowania obwiedniowego jest możliwe również rozdzielanie materiału poprzez cięcie. Taki proces stosuje się do wytwarzania wyrobów grubych, gdy wymagana jest duża dokładność cięcia.

3.2. Projektowanie procesu technologicznego

Projektowanie procesu prasowania obwiedniowego sprowadza się do wykonania następujących czynności kluczowych:

- opracowanie kształtu i wymiarów wypraski, z uwzględnieniem naddatków na dalszą obróbkę wykańczającą oraz tolerancji wykonania;
- ustalenie sposobu wykonania wypraski;
- dobór materiału wsadowego, w szczególności jego gatunku (istotnymi parametrem są wskaźnik plastyczności A oraz wytrzymałość R_m), stanu

(miękki, utwardzony), sposobu jego uzyskania (poprzez wyciskanie, ciągnięcie lub łuszczenie) oraz jego wymiarów początkowych;

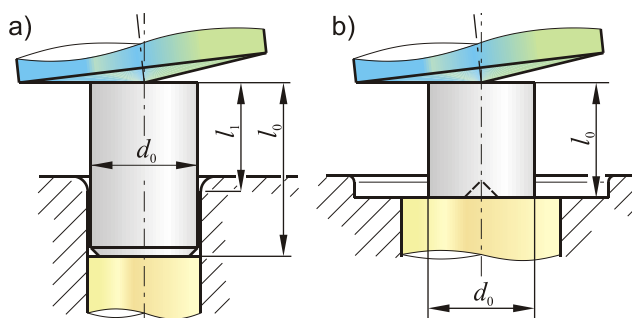
- dobór parametrów technologicznych, w szczególności dotyczących rodzaju ruchu wahającego, maksymalnej siły prasowania oraz czasu prasowania (w przypadku pras typu PXW oraz z serii T, czas jest parametrem zależnym również od maksymalnej siły kształtowania).

W dalszej części podrozdziału zostaną przybliżone najważniejsze zagadnienia dotyczące projektowania wypraski. Skupiono się na ogólnych zasadach doboru materiału wsadowego oraz zaleceniach projektowych. Zagadnienia te zostały one opracowane na podstawie literatury specjalistycznej, m.in.: [10, 21, 22, 24, 26, 47, 48, 63, 64, 67].

3.2.1. Materiał wsadowy

Objętość materiału wsadowego do prasowania obwiedniowego równa jest objętości wypraski powiększonej o straty materiałowe. Ze względu na to, że proces kształtowania jest realizowany na zimno, straty materiałowe wynikają tylko z powstania wypłytki.

Podczas kształtowania wyrobów litych, wsad ma postać walcową o wymiarach podanych na rys. 3.12. W pierwszej kolejności określa się średnicę d_0 – w tym celu należy zwrócić uwagę na wielkość odkształcenia materiału w procesie kształtowania, niezawodność centrowania wsadu w matrycy oraz sposób i technologiczność jego otrzymania. Dla wyprasek wykonywanych ze stopów aluminium, materiał wsadowy jest uzyskiwany z prętów wyciskanych lub ciągniętych na zimno. W pierwszym przypadku, materiał charakteryzuje się stosunkowo dobrymi własnościami plastycznymi, a pręty wykonane są



Rys. 3.12. Wymiary materiału wsadowego dla procesu prasowania obwiedniowego wyrobów litych oraz sposób centrowania w matrycy (a) lub na wyrzutniku (b), gdzie: d_0 – średnica wsadu, l_0 – wysokość wsadu, l_1 – wysokość części swobodnej

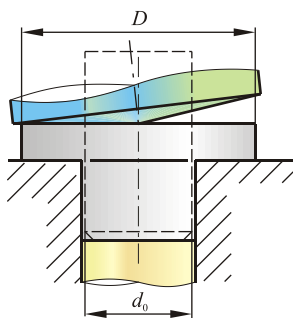
w 13 lub 14 klasie dokładności. Natomiast w drugim przypadku – materiał jest zazwyczaj utwardzony (gorsze własności plastyczne), ale za to wymiary zawierają się w 10 lub 11 klasie dokładności.

Średnica początkowa d_0 wsadu musi być odpowiednio duża, aby nie przekroczyć dopuszczalnych odkształceń, które mogą doprowadzić do pojawienia się promieniowego pęknięcia materiału na zewnętrznym obrzeżu wypraski. W praktyce średnicę d_0 ustala się na podstawie warunku takiego, że:

$$D/d_0 < \left(D/d_0 \right)_{gr}, \quad (3.1)$$

gdzie: d_0 – średnica wsadu, D – największa średnica wypraski, np. mierzona zgodnie z rysunkiem 3.13, $(D/d_0)_{gr}$ – wartość graniczna zależna od granicy plastyczności R_e materiału wsadowego. Na podstawie literatury specjalistycznej [47] oraz wyników badań własnych, publikowanych np. w [57, 58, 61, 66], dla wyprasek wykonanych ze stali węglowej lub stopów nieżelaznych wykazujących dobrą plastyczność w temperaturze kucia na zimno, wartość graniczna podana we wzorze (3.1) wynosi:

$$\left(D/d_0 \right)_{gr} = \begin{matrix} 2,8 \div 3,2 \\ 2,2 \div 2,8, \\ 1,8 \div 2,2 \end{matrix} \quad \text{gdy} \quad \begin{matrix} R_e < 200 \text{ MPa} \\ 220 \text{ MPa} < R_e < 350 \text{ MPa} \\ R_e > 300 \text{ MPa} \end{matrix} \quad (3.2)$$



Rys. 3.13. Schemat pokazujący największą średnicę D wypraski oraz początkową średnicę d_0 wsadu (linia przerywana)

Na podstawie początkowej średnicy d_0 wsadu ustala się jego wysokość l_0 , porównując ją z wymiarami przestrzeni roboczej oraz zachowując warunek na niewystąpienie wyboczenia materiału w trakcie prasowania. Podwyższone wymagania w stosunku do sztywności korpusu prasy, powodują ograniczenie wielkości przestrzeni roboczej. Szczególnie dotyczy to odległości pomiędzy górną powierzchnią matrycy dolnej, a powierzchnią roboczą stempla. Również głębokość osadzenia wsadu w matrycy jest zdeterminowana maksymalnym skokiem wyrzutnika.

Zatem, ze względu na wyboczenie materiału podczas prasowania obwiedniowego, w przypadku kształtowania swobodnego (rys. 3.12b) musi zostać spełniony następujący warunek:

$$l_0 \leq 1,5 \div 1,8 \cdot d_0, \quad (3.3)$$

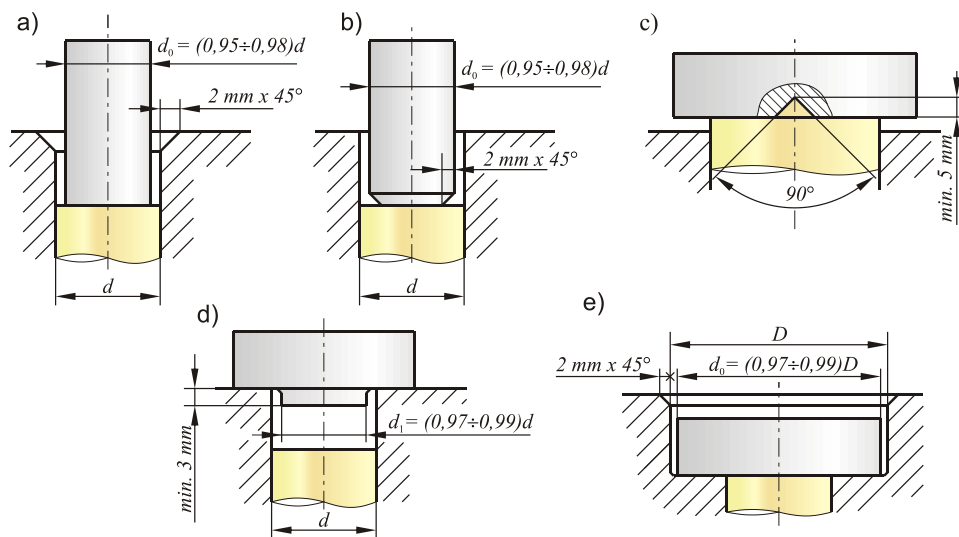
gdzie oznaczenia są zgodne z rys. 3.12b. Podany we wzorze (3.3) współczynnik smukłości, zależy od dwóch głównych czynników. Są to: wycentrowanie wsadu względem narzędzia oraz prostopadłość powierzchni czołowej wsadu względem jej osi. Z tego względu zaleca się, aby materiał wsadowy był cięty na piłach mechanicznych oraz w miarę potrzeby stosować specjalne nawiercenia, które pozwolą na dokładne jego ustawienie na powierzchni np. wyrzutnika. Jednak łatwiejszym (i mniej czasochłonnym) sposobem na zwiększenie wartości tego współczynnika jest wycentrowanie materiału wsadowego w matrycy dolnej, np. tak jak to pokazano na rys. 3.12a, lub dodatkowo centrując go w stemplu. Zgodnie z [47], w przypadku pokazanym na rys. 3.12a, część swobodna wsadu, wystająca z otworu centralnego w matrycy, może mieć długość:

$$l_1 \leq 2,0 \cdot d_0, \quad (3.4)$$

gdzie oznaczenia są zgodne z rys. 3.12.

Poprawne ustawienie wsadu w matrycy jest istotne również ze względu na siły boczne, występujące w trakcie prasowania obwiedniowego. Siła taka, już na samym początku procesu kształtowania, dąży do poprzecznego przemieszczenia materiału wsadowego. Stąd wynika wniosek, że wsad musi zostać przygotowany i ustawiony w taki sposób, który nie dopuści do wystąpienia niepożądanych zjawisk. Zalecane metody [47] pozycjonowania wsadu w narzędziu dolnym, wraz z optymalnymi jego wymiarami (wyrażonymi w sposób względny), pokazano na kolejnym rys. 3.14.

W przypadku kształtowania wypraski metodą prasowania kołnierza (rys. 3.2b), można wybrać jeden z dwóch możliwych rozwiązań ustawienia wsadu w narzędziu. Pierwszy sposób wymaga wykonania fazowania krawędzi matrycy (rys. 3.14a), natomiast drugi sposób – fazowania powierzchni czołowej materiału wsadowego (rys. 3.14b). W obu przypadkach średnica początkowa d_0 powinna być mniejsza od średnicy d otworu centralnego w matrycy. Zaleca się, aby szczelina pomiędzy powierzchniami walcowymi narzędzia i wsadu wynosiła około 0,5 mm.



Rys. 3.14. Sposoby pozycjonowania wsadu w narzędziach dolnych [47]
oraz optymalne wymiary wyrażone względnie – opis w tekście

Wykonując wypraskę poprzez prasowanie swobodne (rys. 3.2a), zaleca się wykonać dodatkowy występ stożkowy na powierzchni czołowej wypychacza (rys. 3.14c). Minimalna wysokość tego występu powinna wynosić 5 mm. Niestety, taki sposób pozycjonowania wymaga wykonania odpowiedniego, z reguły centralnego nawiercenia stożkowego w materiale wsadowym.

Innym sposobem przygotowania wsadu, który jest stosowany podczas prasowania obrzeża, wyciskania współbieżnego lub przesadzania, jest pozostawienie dodatkowego walcowego występu (o wysokości co najmniej 3 mm – rys. 3.14d) na jednej z powierzchni czołowej. Średnica d_1 tego występu powinna być odpowiednio mniejsza od średnicy otworu d centralnego matrycy. Zaleca się, aby luz pomiędzy tymi wymiarami był większy niż 1 mm.

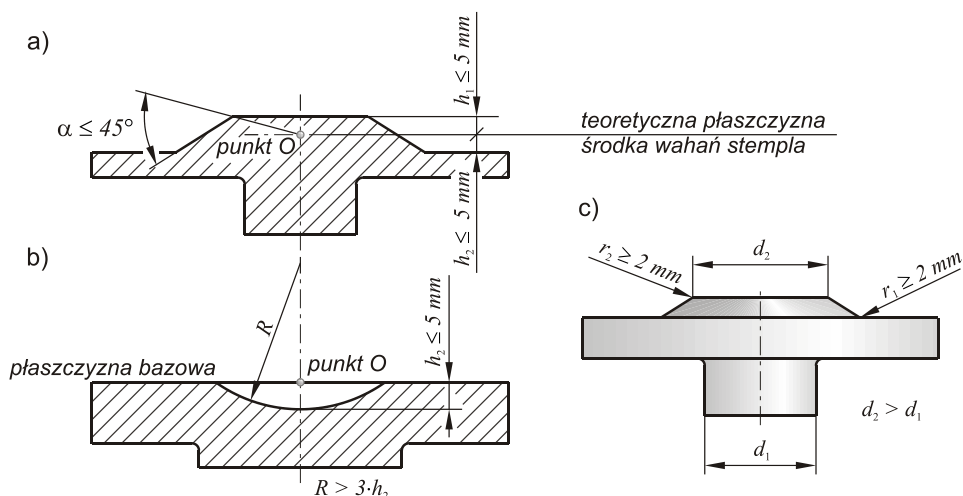
Natomiast w przypadku wyciskania przeciwbieżnego (rys. 3.14e), materiał wyjściowy jest pozycjonowany na podobnej zasadzie jak w przypadku przedstawionym na rys. 3.14a. Otwór matrycy D musi mieć wykonane odpowiednie fazowanie (ewentualnie zaokrąglenie), przy czym powstały luz (między średnicą wsadu d_0 , a średnicą otworu D w matrycy) nie powinien być większy niż 1 mm.

3.2.2. Zalecenia projektowe

Kształt górnej powierzchni wypraski

Górna powierzchnia czołowa wypraski jest kształtowana poprzez nacisk stempla, który wykonuje ruch wahający. Zatem, powierzchnia ta powinna być możliwie płaska. Ewentualne występy lub wgłębienia na tej powierzchni powinny być niewielkie, a powstały zarys tej powierzchni musi posiadać łagodne przejścia. Na rys. 3.15 przedstawiono podstawowe zalecenia projektowania kształtu górnej powierzchni wypraski [47].

Ze względów technologicznych, średnica występu d_2 nie powinna być mniejsza od średnicy trzonu d_1 wypraski (rys. 3.15c) lub względnie – od średnicy początkowej d_0 wsadu. Dopuszczalna wysokość tego występu zależy od położenia teoretycznej płaszczyzny środka wahań stempla (rys. 3.15a), w skrajnych sytuacjach może ona osiągać wartość nawet 10 mm, przy czym odległość środka O wahań stempla od płaszczyzny bazowej nie może być większy niż 5 mm. Powierzchnia boczna występu powinna być stożkowa, a kąt α tworzącej tego stożka nie powinien być większy niż 45° – mierzony w sposób podany na rys. 3.15a. Ponadto, należy zastosować promienie za-



Rys. 3.15. Zalecenia projektowe do wykonania górnej powierzchni wypraski [47], która zawiera występy (a, c) lub wgłębienia (b) – opis w tekście

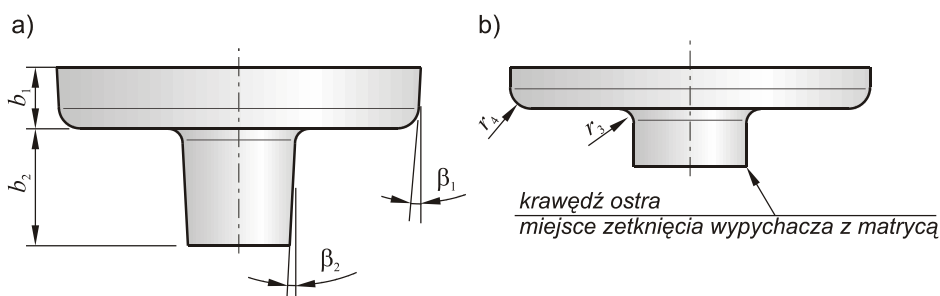
okrąglenia krawędzi zewnętrznych r_1 oraz krawędzi wewnętrznych r_2 o wartości co najmniej 2 mm dla wyrobów stalowych [47] lub 3 mm dla wyprasek wykonanych ze stopów aluminium [61, 67].

Przy konieczności wykonania wgłębienia na górnej powierzchni czołowej wypraski (rys. 3.15b), musi ono mieć kształt kulisty. Promień R tego wgłębienia powinien być co najmniej trzykrotnie większy od głębokości h_2 , przy czym wartość h_2 nie może przekroczyć 5 mm – zalecane jest, aby środek wahań stempla O znajdował się na płaszczyźnie bazowej (rys. 3.15b).

Kształt dolnej części wypraski

Dolna część wypraski jest odwzorowaniem wykroju roboczego matrycy dolnej, w której często znajduje się otwór centralny przeznaczony na umieszczenie wypychacza. Typowym elementem większości wyprasek jest centralny trzon (rys. 3.16), którego długość b_2 zależna jest od skoku wypychacza oraz od tego, czy ta część wypraski ma kształt złożony. Przyjmuje się, że długość b_2 największego stopnia trzonu (w przypadku, gdy trzon nie jest stopniowany, to wymiar b_2 określa jego całkowitą długość – np. tak jak to pokazano na rys. 3.16a) nie może być większa od skoku suwaka. W przypadku prasy PXW-100, graniczna wartość b_2 wynosi około 45 mm (przy maksymalnym skoku wyrzutnika równym 50 mm).

Powierzchnie boczne (walcowe) obrzeża oraz trzonu muszą posiadać pochYLENIA KUŹNICZE, wynoszące odpowiednio β_1 oraz β_2 (rys. 3.16a). Ich wartość zdeterminowana jest przez wysokości (grubości) wypraski w danej stre-



Rys. 3.16. Wymiary charakterystyczne dolnej części wypraski, która jest odzwierciedleniem kształtu wykroju roboczego narzędzia dolnego [47]
(pełny opis w tekście)

fie – odpowiednio b_1 oraz b_2 . Ogólnie można zapisać, że pochylenia kuźnicze przy prasowaniu obwiedniowym powinny wynosić:

$$\beta = \begin{matrix} 1,00^\circ & b < 5 \text{ mm} \\ 0,75^\circ, & \text{gdy } 5 \text{ mm} \leq b \leq 20 \text{ mm} . \\ 0,50^\circ & b > 20 \text{ mm} \end{matrix} \quad (3.5)$$

Podane powyżej wartości, gwarantują swobodne usunięcie wypraski z narzędzia dolnego pod warunkiem, że powierzchnie narzędzia są właściwie smarowane podczas procesu prasowania obwiedniowego.

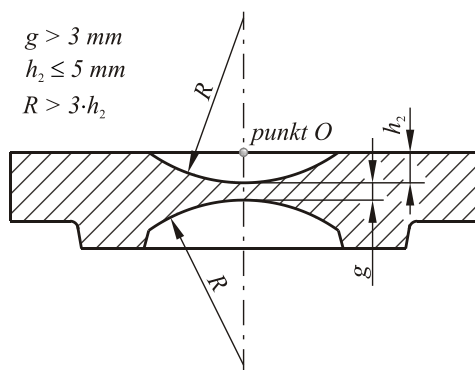
Krawędzie wypraski muszą być również zaokrąglone (rys. 3.16b). Wyróżnić można promień krawędzi zewnętrznej r_4 obrzeża oraz krawędzi wewnętrznej r_3 (najczęściej jest to miejsce przejścia obrzeża w trzon wypraski). Wartość pierwszego wymienionego promienia zależy od wysokości b_1 (grubości) obrzeża i zaleca się, aby wynosiła ona co najmniej $r_4 > 0,5 \cdot b_1$. Z kolei promień wewnętrzny zależny jest od sposobu prasowania wypraski. Przy prasowaniu swobodnym (rys. 3.2a), promień r_3 w przybliżeniu jest równy 1 mm. Natomiast podczas wykonywania wypraski sposobem prasowania obrzeża lub wyciskania współbieżnego, zaleca się, aby promień ten $r_3 > 3 \text{ mm}$.

Natomiast krawędź dolna trzonu, znajdująca się przy powierzchni czołowej, która styka się z wypychaczem, pozostaje „ostra” (rys. 3.16b) – tj. nie stosuje się zaokrąglona lub sfazowana. Powodem jest to, że krawędź ta jest miejscem zetknięcia wyrzutnika z powierzchnią walcową otworu centralnego matrycy. Często, w tym miejscu może występować zadziór, który należy usunąć po zakończeniu procesu kształtowania wypraski.

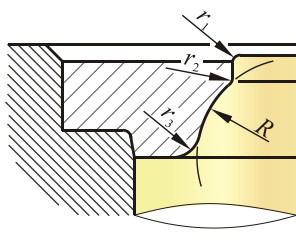
Wykonywanie otworów przelotowych lub denka

Podczas prasowania obwiedniowego wyprasek ze wsadu pełnego, nie wykonuje się otworów na gotowo. Jeżeli konstruktor przewiduje występowanie w przedmiocie takiego otworu, to w tym miejscu należy zaprojektować denko. Grubość pozostawionej w wyprasce „przepony” materiału powinna być dostatecznie duża, a kształt czoła obustronnych wgłębień musi być kulisty. Zasady projektowania denka dla wyprasek litych wyjaśnia schemat pokazany na rys. 3.17.

Alternatywnym rozwiązaniem problemu wykonania wypraski, w której przewiduje się otwór przelotowy, jest zastąpienie materiału wsadowego pełnego wsadem pierścieniowym. Zgodnie z zasadami technologii prasowania



Rys. 3.17. Wytyczne wykonania denka w wyprase [47]



Rys. 3.18. Zalecenia dotyczące wykonania trzpienia (powierzchnię kształtującą wypychacza), gdy wypraska jest wykonywana ze wsadu pierścieniowego [47] – opis w tekście

obwiedniowego, należy przewidzieć użycie trzpienia, który będzie stanowił powierzchnię kształtującą wypychacza. Ogólne wytyczne projektowania tej części narzędzia przedstawiono schematycznie na kolejnym rysunku 3.18 [47]. Ze względów wytrzymałościowych (wypychacz jest najbardziej obciążonym elementem), należy unikać stosowania karbów oraz ostrych krawędzi, bezpośrednio na powierzchni kształtującej. Należy stosować promienie zaokrąglenia r_1 , r_2 oraz r_3 , dla których stosuje się ogólne zasady, omówione wcześniej i przedstawione na rys. 3.15 oraz rys. 3.16. Dodatkowo, powierzchnia boczna trzpienia powinna być w miarę możliwości kulista. Dopuszcza się wykonanie niewielkiego fragmentu walcowego (o wysokości $2 \div 6$ mm), ale tylko

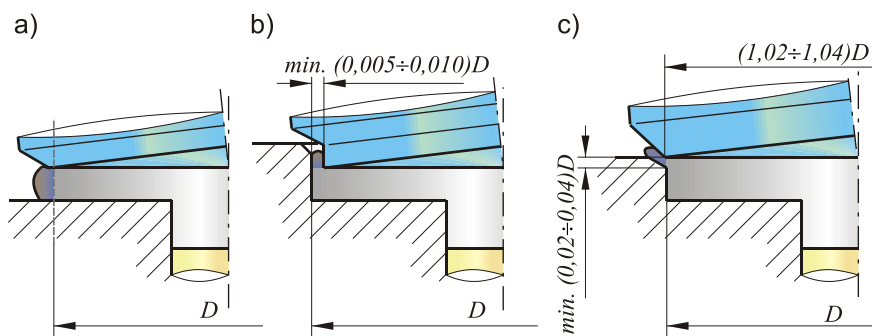
w górnej części trzpienia. Jego występowanie jest podyktowane aspektem technologicznym – z reguły, pod koniec procesu, ta powierzchnia walcowa trzpienia współpracuje z odpowiednim wgłębieniem wykonanym w stemplu.

Wpływka

Konstrukcja narzędzi, stosowanych do realizacji procesu prasowania obwiedniowego, musi przewidywać powstawanie wpływki. Wpływka jest

konieczna, ze względu na brak możliwości całkowitego zamknięcia wykroju matrycy dolnej oraz jest wskazana, ze względu na nieuniknione wahania objętości materiału wejściowego. Wyróżnia się trzy rodzaje wypłytki, jakie mogą powstać podczas prasowania obwiedniowego (rys. 3.19). Są to, wypływka [47]:

- **promieniowa** (rys. 3.19a), która jest stosowana tylko przy kształtowaniu kołnierzy okrągłych, wobec których toczenie nadmiaru materiałów jest ekonomicznie dopuszczalne, a w szczególności podczas prasowania obwiedniowego wyprasek wykonanych z materiałów charakteryzujących się dużą wytrzymałością lub stosunkowo małą plastycznością – **zaletą** zastosowania takiej wypłytki jest mały nacisk jednostkowy, małe obciążenie matrycy oraz wysoka trwałość narzędzi; natomiast **wadą** jest konieczność toczenia zewnętrznej powierzchni wyrobu oraz stosunkowo duże straty materiałowe;
- **osiowa** (rys. 3.19b) – jest ona stosowana, gdy promieniowe płynięcie materiału jest ograniczone ścianką matrycy – **zaletą** takiego rozwiązania technologicznego jest łatwiejsze usunięcie wypłytki (poprzez operację toczenia) również w przypadku przedmiotów o zarysie niekołowym, szczególnie wymagających obróbki wykańczającej górnej powierzchni przez planowanie; natomiast **wadą** stosowania takiej wypłytki jest zwiększenie nacisku i naprężeń w matrycy oraz konieczność zastosowania bardziej złożonej konstrukcji narzędzi;



Rys. 3.19. Wypływka powstająca podczas prasowania obwiedniowego: promieniowa (a), osiowa (b) oraz skośna (c); D – średnica wypraski; pełny opis w tekście

- **skośna** (rys. 3.19c) – **zaletą** zastosowania takiej wypływkę jest możliwość jej usunięcia metodą okrawania, natomiast **wadą** – jest niebezpieczeństwo uszkodzenia narzędzi na skutek ewentualnego bezpośredniego (najczęściej niekontrolowanego) kontaktu stempla z matrycą dolną.

Zalecane wymiary szczelin na wypływkę podano na rys. 3.19, przy czym zaleca się, aby nie stosować wypływek o grubości mniejszej niż 0,5 mm. Zwiększenie tej grubości powoduje jednocześnie zmniejszenie siły prasowania obwiedniowego. Nie dotyczy to przypadku pokazanego na rys. 3.19a. W tym przypadku zaleca się, aby szerokość wypływkę była większa od pola tolerancji średnicy D wypraski oraz uwzględniała ewentualne błędy kształtu.

3.3. Zasady konstrukcji narzędzi

Na rysunku 3.20 przedstawiono typowy układ narzędzi tworzący przestrzeń roboczą prasy PXW-100A. Podstawowymi narzędziami, które są projektowane dla danego procesu prasowania obwiedniowego, są: stempel 1, matryca dolna 2 oraz wyrzutnik (wypychacz) 3.

Stempel jest narzędziem osadzonym w gnieździe obsady górnej (wykonującej ruch precesyjno-nutacyjny), a jego pozycja jest blokowana za pośrednictwem pierścienia ustalająco-mocującego 7. Podczas projektowania tego narzędzia, istotnym parametrem projektowym, ściśle powiązanim z płaszczyzną bazową 8, jest wysokość 9 – z reguły wynosi ona 60 mm. Wspomniana płaszczyzna 8 określa lokalizację nieruchomego środka ruchu wahającego stempla.

Matryca dolna jest osadzona w gnieździe suwaka zewnętrznego, a za pomocą nakrętki 6, jej pozycja jest centrowana oraz ustalana. Istotnym parametrem projektowym jest wysokość 12. Jej wartość powinna być tak dobrana, aby na tej wysokości znajdowała się górna powierzchnia czołowa wypraski. Podana na rys. 3.20 wartość tego parametru jest wysokością przykładową.

W otworze centralnym matrycy 2 umieszcza się wyrzutnik 3, którego położenie jest regulowane za pomocą pierścienia dystansowego 4. Ze względu na duże naciski jednostkowe, występujące podczas procesu prasowania, zaleca się stosować tylko jeden pierścień o grubości nie mniejszej niż 4,4 mm, przy czym maksymalna jego grubość nie powinna przekraczać 6,2 mm. Pierścień dystansowy wykonywany jest z reguły ze stali węglowej do ulepszania cieplnego (np. 42CrMo4 – oznaczenie wg normy EN/ISO).

suwak zewnętrzny w trakcie prasowania obwiedniowego. Przeważnie jest to wartość oscylująca wokół 135 mm.

3.3.1. Konstrukcja stempla

Jak już wiadomo, stempel jest narzędziem wykonującym złożony ruch kulisty wokół pewnego punktu (środką ruchu) oznaczonego literą O. Z reguły, punkt ten jest zlokalizowany na powierzchni kontaktu stempla z wypraską lub ewentualnie w otoczeniu tej powierzchni (patrz linia 8 na rys. 3.20). Sposób realizacji prasowania obwiedniowego powoduje, że powierzchnia robocza stempla ma kształt zbliżony do stożka obrotowego. Tworząca tego stożka zazwyczaj nie jest linią prostą i odwzorowuje kształt powierzchni czołowej wypraski, a kąt wierzchołkowy jest zdeterminowany maksymalną wartością kąta γ wychylenia narzędzia.

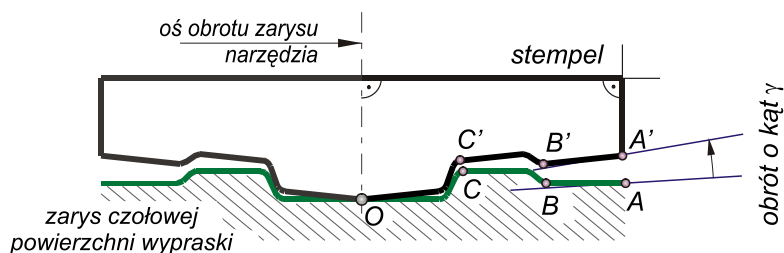
W przypadku kształtowania wypraski według złożonego schematu wahań stempla – tj. „po rozecie wielolistnej” (R), „po spirali” (S) lub „po prostej” (P) – wartość kąta γ zmienia się w trakcie procesu od zera do wartości maksymalnej (dla przypomnienia, w przypadku prasy PXW-100A maksymalna wartość kąta γ wynosi 2°). Natomiast podczas prasowania obwiedniowego zgodnego ze schematem wahań „po okręgu” (T), wartość tego kąta jest dobierana przez technologa (z pewnego, dopuszczalnego przedziału) i jest niezmienna w trakcie realizacji procesu kształtowania.

Stosowanie większych wartości kąta γ (tj. bliskich maksymalnej) powoduje zwiększenie skuteczności prasowania obwiedniowego wyprasek. Przykładowo, zwiększenie wartością kąta γ z wartości 1° do wartości 2° powoduje podobny efekt jak ok. 1,5-krotne powiększenie nacisku prasy [2, 15, 18, 48, 55, 82]. Zaleca się [5, 6, 10, 48], aby we wszystkich przypadkach prasowania stosować maksymalną dopuszczalną wartość kąta wahań stempla. Zwykle, wartość ta jest dobierana z zakresu $0,5^\circ < \gamma \leq 2,0^\circ$. Prasowanie przy kącie $\gamma < 1,0^\circ$ jest w zasadzie rzadko stosowane, głównie ze względów ekonomicznych (większy nacisk prasy, wydłużony czas kształtowania). Ponadto, badania własne [58, 62, 64, 67] wykazały, że kształtowanie przy kącie $\gamma < 0,5^\circ$ mija się z celem – proces sprowadza się do tradycyjnego spęczania kowadłem o kształcie stożkowym.

Zgodnie z zaleceniami [12, 14, 48], stosowanie kąta γ wahania stempla o wartości mniejszej od maksymalnej (tj. $\gamma < 2^\circ$ dla prasy PXW-100A) jest uzasadniony tylko ze względów:

- **technologicznych**, gdy stosowanie większego kąta γ powoduje: (i) zbyt szybkie rozprasowanie obrzeża wypraski kosztem niewypełnienia przez materiał centralnej części wykroju roboczego narzędzia; (ii) kołysanie wypraski w matrycy w trakcie prasowania, co wpływa niekorzystnie na dokładność kształtu i jakość powierzchni wyrobu; (iii) niedokucia odsadzeń centralnej części wypraski, która jest np. w postaci trzonku wielostopniowego;
- **wytrzymałościowych** – gdy stempel, stosowany do wyciskania przeciwbieżnego, posiada zbyt dużą smukłość oraz należy unikać dużych obciążeń promieniowych lub stycznych mogących uszkodzić narzędzia, np. w przypadku użycia stempla lub matrycy posiadających delikatne uzębienia lub uzębrowania.

Zatem, narzędzie (stempel) projektuje się dla największej dobranej wartości kąta γ . Przykład pokazujący metodę tworzenia zarysu powierzchni roboczej stempla, na podstawie zarysu czołowej powierzchni wypraski, przedstawiono schematycznie na rys. 3.21. Zasada ustalania kształtu tej powierzchni jest następująca. Punkty charakterystyczne znajdujące się na linii zarysu stempla, np. A' , B' , C' , powstają w wyniku obrotu o kąt γ wokół środka O odpowiednich punktów należących do wypraski, tj. A , B oraz C . Kształt i wymiary pozostałych powierzchni narzędzia jest zdeterminowany przez sposób zamocowania stempla w gnieździe obsady górnej prasy (rys. 3.20).

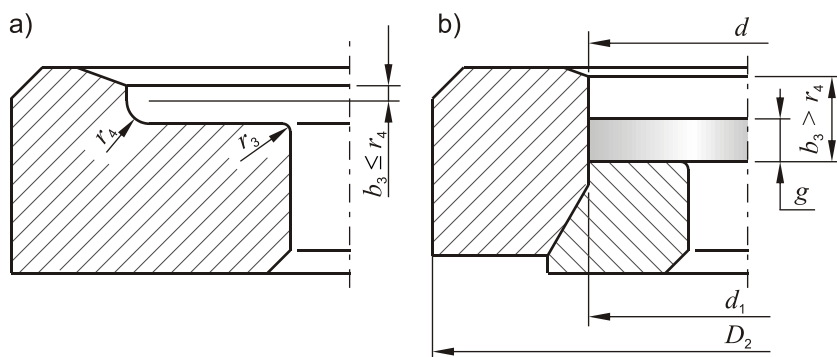


Rys. 3.21. Projektowanie kształtu powierzchni roboczej stempla poprzez wykonanie obrotu zarysu czołowej powierzchni wypraski, gdzie: O – środek ruchu wahającego stempla; A, B, C – punkty na powierzchni wypraski; A' , B' , C' – punkty na powierzchni stempla; γ – maksymalny kąt wychYLENIA stempla

3.3.2. Konstrukcja matrycy dolnej

Zależnie od kształtu i wymiarów wypraski, matryca dolna stosowana do prasowania obwiedniowego jest wykonywana jako narzędzie jednolite lub z obsadą. Jednolite matryce są wykorzystywane podczas kształtowania wyrobów typu pierścieni lub posiadających kołnierze o dużych średnicach, przy względnie niskich naciskach jednostkowych rzędu $800 \div 1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Zgodnie z literaturą specjalistyczną [23, 24, 48, 76, 84], zaleca się stosować w miarę możliwości narzędzia jednolite oraz dodatkowo należy unikać karbów. Zgodnie z rys. 3.22a, w matrycy niedzielonej powinno się stosować odpowiednio duże promienie zaokrąglenia krawędzi r_3 oraz r_4 – ich wartości odpowiadają zaokrągleniom w poprawnie zaprojektowanej wyprawce. Na krawędzi przejścia wykroju roboczego matrycy do jej powierzchni czołowej zaleca się stosować fazowanie – najlepiej zgodnie z zasadami projektowania wypływkii skośnej.

W przypadku, kiedy nie można uniknąć obwodowych karbów wewnętrznych w matrycy dolnej, a w szczególności, gdy głębokość wykroju na odcinku b_3 jest mniejsza od promienia r_4 (rys. 3.22), należy stosować matryce dzielone – tj. z tzw. obsadą (rys. 3.22b). Zgodnie z literaturą specjalistyczną, np. [24, 48], konstrukcje matryc dzielonych gwarantują najwyższą wytrzymałość narzędzi. Dlatego też, takie rozwiązanie zaleca się stosować również,

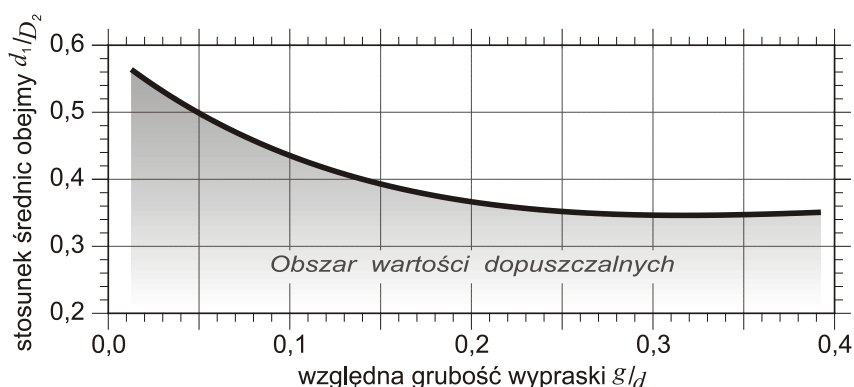


Rys. 3.22. Zalecenia projektowe stosowane do wykonania wykroju roboczego w matrycy dolnej jednolitej (a) oraz z obejmą (b) [48], gdzie: g , d – wymiary wypraski; b_3 – głębokość wykroju; r_3 , r_4 – promienie zaokrąglenia; d_1 – średnica pierścienia wewnętrznego; D_2 – średnica pierścienia zewnętrznego

gdy podczas prasowania obwiedniowego powstają bardzo duże naciski jednostkowe. Zazwyczaj pierścień zewnętrzny matrycy może być wykonywany ze stali narzędziowej niestopowej lub stali węglowej do ulepszania cieplnego. Natomiast pierścień wewnętrzny, który zawiera wykrój roboczy, jest wykonywany ze stali narzędziowej do pracy na zimno.

Wykonując obsadę matrycy dolnej, zaleca się stosować wcisk promieniowy w wielkości $0,3 \div 0,4$ % średnicy matrycy [24]. Można również stosować powierzchnię stożkową – tak jak to pokazano na rys. 3.22b. Najczęściej stosuje się kąt wcisku na poziomie $1,5^\circ$ na jedną stronę. Pamiętając, że po połączeniu pierścieni matrycy, wewnętrzne wymiary narzędzia zmniejszają się, zaleca się, aby wymiary i chropowatość otworów w wykroju roboczym doprowadzić do oczekiwanych wielkości dopiero po wykonaniu czynności wcisku.

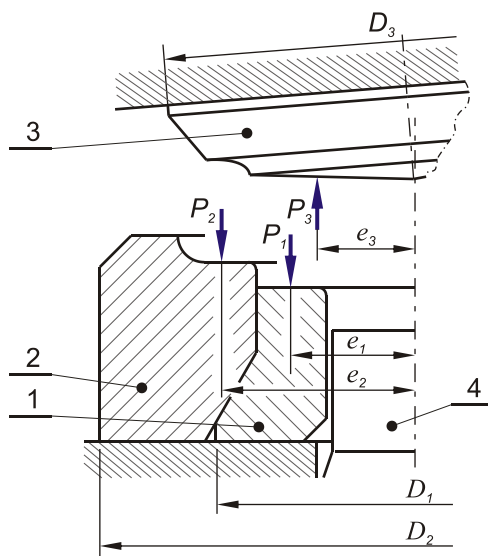
Przyjmując, że średnica wewnętrzna obejmy d_1 (rys. 3.22b) jest zdeteminowana przez średnicę wypraski d , średnicę zewnętrzną D_2 dobiera się w zależności od względnej grubości wyrobu g/d . Zalecaną wartość stosunku średnic d_1/D_2 przedstawiono w formie wykresu na rys. 3.23. Jeżeli przewiduje się, że dolna część wypraski (w otoczeniu jej trzonu) będzie miała złożony kształt, to obwodowe występu projektuje się przyjmując wykonanie odpowiednich „wybrań” w wyrzutniku.



Rys. 3.23. Zalecany stosunek średnic d_1/D_2 dla obejmy w matrycy dzielonej [48]; podane wymiary są zgodne z rys. 3.22b

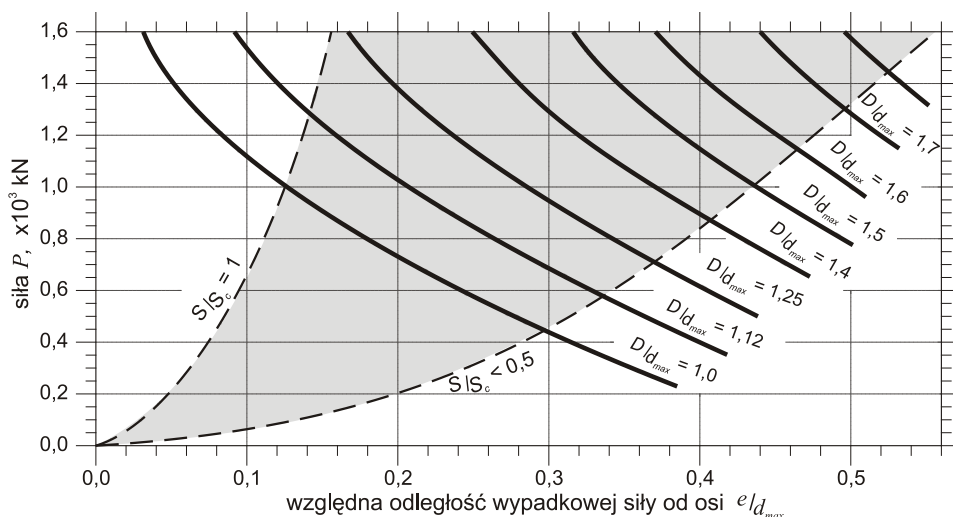
Ze względu na charakter procesu prasowania obwiedniowego, zarówno stempel, jak i matryca dolna powinny posiadać dostatecznie szeroką stawę. W przeciwnym razie, powstałe naciski jednostkowe mogą prowadzić do uszkodzenia narzędzia. Na kolejnym rys. 3.24 przedstawiono schematycznie układ sił działających na narzędzia podczas kształtowania wypraski. Poszczególne składowe siły – tj. P_1 i P_2 , oddziałują

na zewnętrzną lub wewnętrzną część cy dolnej i równoważą siłę P_3 , działającą na stempel. Wszystkie te siły są przesunięte od osi głównej o pewną wartość e , która wynika z wahającego charakteru ruchu górnego narzędzia.



Rys. 3.24. Układ sił P oddziałujących na narzędzia oraz ich przesunięcie e względem osi głównej, gdzie: 1 – wewnętrzna część matrycy, 2 – zewnętrzna część matrycy, 3 – stempel, 4 – wyrzutnik, D – średnica podstawy narzędzia

Na podstawie wartości siły P (związanej z naciskiem wywieranym przez prasę) oraz przesunięcia e (dla rozpatrywanej siły) dobiera się zalecaną minimalną średnicę podstawy narzędzia D . Przyjmuje się, że D_1 oraz D_2 reprezentują średnice podstawy pierścieni dolnej matrycy dzielonej (zgodnie z rys. 3.24), natomiast D_3 jest średnicą podstawy stempla. Ich wartości wyznacza się w oparciu o wykres przedstawionego na kolejnym rysunku 3.25 [48]. Wartości dopuszczalne dla tych średnic wskazuje zaciemniony obszar wykresu, przy czym zaleca się aby stosunek pól powierzchni podstawy S/S_c (patrz opis rys. 3.25) był możliwie jak najbardziej bliski jedności. Natomiast, nie dopuszcza się sytuacji, w której ten parametr będzie mniejszy od 0,5.



Rys. 3.25. Wykres służący do określania zalecanej średnicy podstawy narzędzia (szary obszar wykresu) [48], gdzie: S – pole powierzchni podstawy przylegającej do podłoża, S_c – całkowite pole powierzchni podstawy narzędzia, d_{max} – maksymalna średnica wypraski, D , e – wymiary podane na rys. 3.24

3.3.3. Materiały stosowane na narzędzia

Cechy procesu prasowania obwiedniowego sprawiają, że podczas kształtowania wypraski, narzędzia są obciążone w sposób niesymetryczny – np. tak jak to wcześniej pokazano schematycznie na rys. 3.24. Taki sposób oddziaływania sił na narzędzia powoduje, że zarówno w matrycy jak i w stemplu powstaje niekorzystny stan naprężenia, charakterystyczny dla obciążenia zginającego. Zatem, zgodnie z literaturą specjalistyczną, np. [24, 44, 45, 48, 76], najbardziej prawdopodobną przyczyną zniszczenia narzędzi podczas prasowania obwiedniowego jest dominacja obciążenia zginającego, natomiast zużycie ściernie powierzchni roboczych odgrywa rolę marginalną – tj. matryca wcześniej ulega pęknięciu (zniszczeniu) niż „traci wymiar” w wyniku zjawisk tribologicznych.

Ważnym etapem podczas projektowania narzędzi, stosowanych do prasowania obwiedniowego, jest dobór materiału, z jakiego zostaną one wykonane. Wybór ten jest podyktowany dwoma głównymi aspektami, tj.:

- ogólnymi warunkami, w jakich narzędzia będą pracowały; przy czym szczególną uwagę należy zwrócić na sposób obciążenia;
- względami ekonomicznymi.

Jak wynika z wcześniejszego opisu, warunki pracy narzędzi powodują, że materiał (z którego zostaną wykonane) powinien odznaczać się dostatecznie dużą granicą wytrzymałości, w szczególności na obciążenie zginające. Ponadto oczekuje się, że po obróbce cieplnej materiał ten powinien posiadać również dostateczną rezerwę udarności [24].

W przypadku procesu prasowania obwiedniowego na zimno, podstawowym materiałem stosowanym na narzędzia jest stal narzędziowa do pracy na zimno. Przykładowo, dla stali w gatunku 95MnCrW5 (wg ISO 4957-80; stal stopowa NMWV) lub w gatunku HS 6-5-2 (wg ISO 4957-80; stal szybko tnąca SW7M), najbardziej pożądane własności mechaniczne uzyskuje się po ulepszaniu cieplnym do twardości 59÷61 HRC. Natomiast dla stali w gatunku 160CrMoV12 (wg ISO 4957-80; stal stopowa NC11LV) zaleca się stosować obróbkę cieplną do twardości w przedziale 57÷59 HRC.

Ze względów ekonomicznych dopuszcza się również użycie stali narzędziowej niestopowej, względnie stali nienarzędziowej, ale pod warunkiem, że po ulepszaniu cieplnym osiągnie pożądane własności mechaniczne. Przykładem może być stal w gatunku 42CrMo4 (wg normy ISO), którą ulepsza się cieplnie do twardości ok. 40 HRC.

Najważniejszym parametrem technologicznym [15, 24, 42], jaki należy brać pod uwagę podczas doboru materiału na narzędzia do prasowania obwiedniowego, jest średni nacisk jednostkowy q_{sr} , jaki jest wywierany na wypraskę podczas kształtowania. Zatem, gdy q_{sr} :

- jest mniejsze od $1200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ – można stosować stale konstrukcyjne do ulepszania cieplnego (np. w gatunku 42CrMo4 lub 36CrNiMo4), jednak najczęściej zaleca się używać stale narzędziowe niestopowe lub niskostopowe do pracy na zimno, o małej zawartości węgla (tabela 3.3, grupa I); po ulepszaniu cieplnym narzędzia odznaczają się wystarczającą dobrą wytrzymałością na zginanie, dobrą odpornością na uderzenia oraz stosunkowo niską odpornością na procesy tribologiczne; wymienione materiały można stosować również do wykonywania obejm dla matryc dzielonych;
- zawarte jest w przedziale $1200\div1700 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ – celowe jest stosowanie stali narzędziowych stopowych do pracy na zimno (tabela 3.3, grupa II); materiały te charakteryzuje dobra hartowność, dobra odporność na ście-

ranie, a po procesie ulepszania cieplnego narzędzia zachowują swój kształt i wymiary;

- przekracza wartość $1700 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ – należy stosować stale narzędziowe szybko tnące (tabela 3.4); stale te odznaczają się bardzo dużą odpornością na ścieranie (również w temperaturze podwyższonej) oraz wysoką ciągliwością; wadą tych materiałów jest ich stosunkowo duży koszt (w porównaniu z innymi stalami narzędziowymi) oraz wymagające warunki przeprowadzania obróbki cieplnej.

Tabela 3.3.

Stale narzędziowe do pracy na zimno – skład chemiczny oraz dopuszczalna twardość po ulepszaniu cieplnym

Gatunek	oznaczenie wg PN	Skład chemiczny – wartości średnie [% wt.]								HRC
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	P+S	
Grupa I – gdy średni nacisk $q_{sr} < 1200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$										
C85U	N9E	0,90	0,2	0,1	0,1	-	-	-	0,05	53
90MnCrV8	MNV	0,80	0,3	2,0	0,4	-	0,1	-	0,05	54
55WCrV8	NZ3	0,50	1,0	0,3	1,1	0,2	0,2	1,0	0,06	54
Grupa II – gdy średni nacisk $q_{sr} > 1200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$										
145Cr6	NC6	1,40	0,30	0,60	1,5	0,2	0,2	0,2	0,06	56
X155CrVMo121	NC11LV	1,55	0,30	0,30	12,0	0,7	1,0	-	0,03	57
X210CrW12	NC11	2,10	0,30	0,30	12,0	-	-	0,70	0,03	57

Tabela 3.4.

Stale narzędziowe szybko tnące – skład chemiczny oraz dopuszczalna twardość po ulepszaniu cieplnym

Gatunek	oznaczenie wg PN	Skład chemiczny – wartości średnie [% wt.]								HRC
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	P+S	
S18-0-1	SW18	0,80	0,45	0,40	4,1	-	1,1	18,0	0,03	61
S6-5-2	SW7M	0,85	0,45	0,40	4,1	5,0	1,8	6,4	0,03	63

4. ANALIZA KSZTAŁTOWANIA STOŻKOWEGO KOŁA ZĘBATEGO

4.1. Wprowadzenie

Przekładnie zębate są powszechnie stosowane w wielu maszynach, które z kolei są używane na szeroką skalę w różnych gałęziach przemysłu – m.in. w rolniczym, maszynowym, motoryzacyjnym, lotniczym itd. Przekładnie te mają zasadniczy wpływ, zarówno na funkcjonalność i sprawność danej maszyny, jak i również decydują (w sposób pośredni) o aspektach ekonomicznych. Podstawowym elementem składowym przekładni zębatej jest **koło zębate**. Część ta musi odznaczać się dobrymi własnościami mechanicznymi oraz wysoką jakością wykonania uzębienia, ponieważ cechy te są kluczowe dla poprawnego działania całej przekładni. Dodatkowym istotnym zagadnieniem, związanym z kołem zębatym, jest technologia jego wytworzenia. Nie od dziś wiadomo, że właściwe skomponowanie metod obróbki pozwala uzyskać oczekiwane efekty przy minimalnym nakładzie czasu i środków. Zatem powstaje pytanie: czy w przypadku kół zębatych, ilość operacji obróbczych można ograniczyć do minimum, przy jednoczesnym zachowaniu dotychczasowego efektu końcowego? Analiza obecnego stanu wiedzy [2÷8, 10, 12÷14, 16÷20, 25, 26, 30, 36, 43, 55, 78, 81, 84] pozwala ukierunkować poszukiwania odpowiedzi na postawione pytanie – mianowicie, kluczem do udzielenia odpowiedzi może być technologia obróbki plastycznej metali.

Jednym z najbardziej popularnych rodzajów kół zębatych jest koło stożkowe. Istnieje wiele metod wytwarzania takich części – zarówno poprzez obróbkę ubytkową, jak i wykorzystując obróbkę plastyczną (kucie, wyciskanie). Większość znanych obecnie metod są szczegółowo opisane w literaturze specjalistycznej, np. [3, 4, 26, 78]. W niniejszym rozdziale, autor przedstawia wybrane zagadnienia teoretyczno-technologiczne dotyczące wytwarzania wypraski typu stożkowe koło zębate poprzez prasowanie obwiedniowe na zimno, w szczególności stosując prasę typu PXW. Punktem wyjścia do wytypowanie przykładowego wyrobu jest koło zębate (rys. 4.1) o module



Rys. 4.1. Przykładowe stożkowe koła zębate o module 4,25 mm, które uzyskano stosując tradycyjny sposób kucia matrycowego – stan po obróbce wykańczającej

4,25 mm, które jest używane w przekładniach wykorzystywanych w maszynach rolniczych.

Wybór technologii prasowania obwiedniowego na zimno do wykonania tego typu wypraski jest podyktowany dwoma głównymi tezami:

- objętościowa obróbka plastyczna na zimno pozwala ukształtować uzębienie koła zębatego w sposób zapewniający podwyższenie własności mechanicznych materiału;
- prasowanie obwiedniowe umożliwia wykonanie wyrobu z minimalnymi naddatkami (na dalszą obróbkę wykańczającą), przy jednoczesnym uzyskaniu dużej dokładności wymiarowej oraz jakości warstwy wierzchniej.

Podstawowym celem wykonanych przez autora badań teoretyczno-doświadczalnych, dotyczących procesu prasowania obwiedniowego wyprasek typu koło zębate, jest:

- określenie warunków realizacji procesu prasowania obwiedniowego na zimno wyprasek o złożonym kształcie na prasie typu PXW;
- rozpoznanie teoretycznych i praktycznych aspektów wytwarzania wypraski typu stożkowe koło zębate, która jest wykonana ze stopu nieżelaznego.

De realizacji celu badań oraz weryfikacji tez przyjęto plan działań, który składa się z następujących czynności:

- zaprojektowanie narzędzi stosując obecny stan wiedzy oraz doświadczenie naukowe na temat procesu prasowania obwiedniowego na zimno;
- wykonanie szeregu symulacji numerycznych, przyjmując autorski model numeryczny procesu prasowania obwiedniowego, który szerzej opisano w monografii [54];
- weryfikacja wyników obliczeń numerycznych w warunkach laboratoryjnych, przy użyciu prasy PXW-100A;
- kompleksowa analiza badań teoretyczno-doświadczalnych.

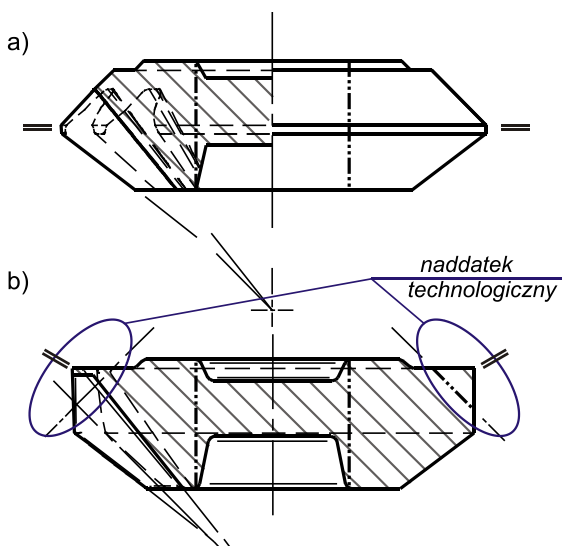
4.2. Projekt narzędzi

Punktem wyjścia do opracowania dokumentacji technicznej, dotyczącej narzędzi stosowanych do prasowania obwiedniowego, jest rysunek wypraski. Jej kształt oraz wymiary określa się na podstawie gotowej części oraz zaleceń technologicznych. W ramach prezentowanych badań własnych, przykładową wypraskę opracowano bazując na części typu stożkowe koło zębate, które pokazano na wcześniejszym rys. 4.1. W odróżnieniu od typowej odkuwki kutej np. na prasach korbowych, projektowana wypraska powinna charakteryzować się następującymi cechami:

- małymi naddatkami na dalszą obróbkę wykańczającą, ponieważ dokładność wykonania oraz jakość powierzchni uzębienia jest większa (niż dla odkutek kutych na gorąco) – główną tego przyczyną jest to, że proces prasowania obwiedniowego jest realizowany przy temperaturze kształtowania na zimno;
- możliwie płaską powierzchnią czołową wypraski od strony stempla, przy czym, ewentualne występy lub wgłębienia są zminimalizowane – niestety, cecha ta wymusza zastosowanie dodatkowego, technologicznego naddatku materiału, które pokazano na rys. 4.2;
- brakiem klasycznego denka – ewentualne centralne wgłębienia występujące w wyprasce powinny być płytkie z uwagi na znaczące obciążenia zginające, powstające podczas procesu kształtowania; obciążenie to oddziałuje na trzpień (występ), który jest wykonywany w narzędziu.

Zatem, uwzględniając wszystkie aspekty technologiczne, zaprojektowano wypraskę stożkowego koła zębatego, której kształt i wymiary przedstawiono na rys. 4.3. Natomiast szczegółowe dane na temat uzębienia podano

w tabeli 4.1. Ponadto, dla celów naukowych założono, że w procesie prasowania obwiedniowego uzyska się produkt finalny, a naddatki na obróbkę wykańczającą są całkowicie pomijane. Dodatkowo, projektując wgłębenia centralne w wyprasce, nieznacznie odstępiono od typowych zaleceń projektowych, o których była mowa w poprzednim rozdziale.

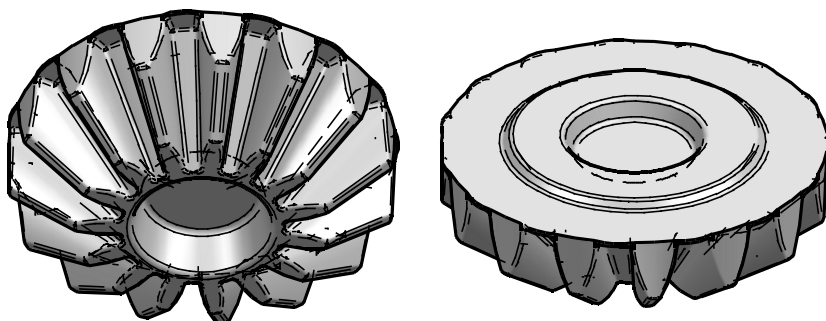
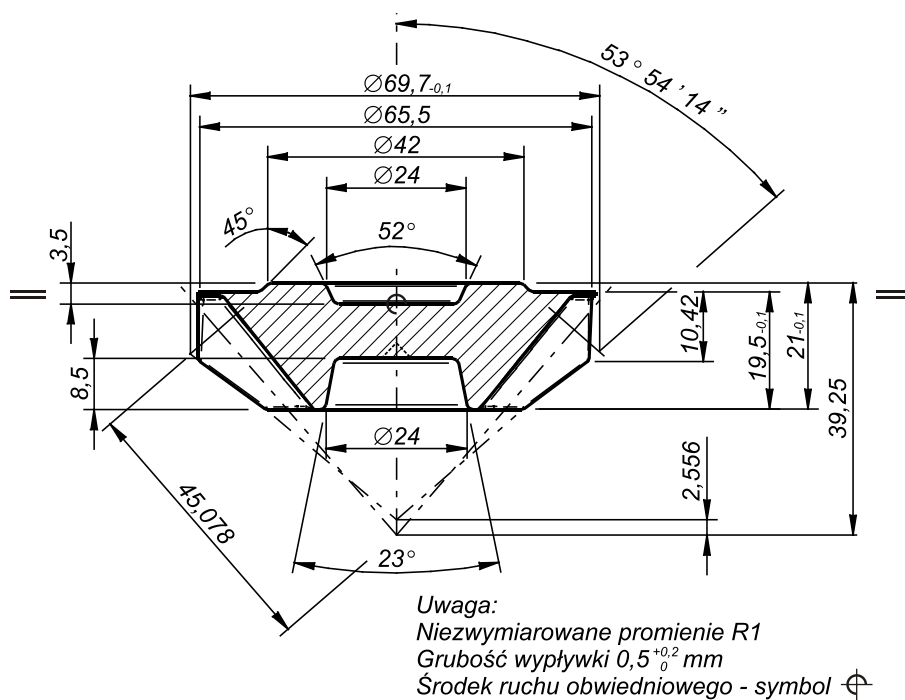


Rys. 4.2. Różnica pomiędzy odkuwką matrycową (a) i wypraską prasowaną obwiedniowo (b); opis w tekście

Tabela 4.1.

Najważniejsze parametry uzębienia stożkowego koła zębatego, pokazanego na rys. 4.3

Nazwa cechy	Wartość
moduł, m	4,25
liczba zębów, z_1	15
zarys odniesienia, α	20°
współczynnik przesunięcia zarysu zęba, x	0,00
średnica podziałowa, d_p	63,75 mm
połowa kąta stożka podziałowego, δ	45°
połowa kąta stożka podstawy, φ_f	38°32'42"
połowa kąta stożka wierzchołków, φ_{a1}	50°23'9,5"
połowa kąta stożka wierzchołkowego ściętego, φ_{a2}	53°54'14"
długość tworzącej stożka podziałowego, t	45,07805 mm
liczba zębów koła współpracującego, z_2	15
kąt osi, Σ	45°



Rys. 4.3. Rysunek wypraski stożkowego koła zębatego, która jest prasowana obwiedniowo z wsadu (przedkuwki) pełnego

Na kolejnym rysunku 4.4 przedstawiono komplet narzędzi, zastosowanych do prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego na prasie specjalnej PXW-100A. Głównymi narzędziami są: stempel 4, wkładka ma-

trycowa 1 oraz wyrzutnik (wypychacz) górny 5 – nadają one wyprascie ostateczny kształt, zgodny z rysunkiem 4.3, i jednocześnie są one odpowiedzialne za dokładność wykonania przedmiotu. Pozostałe narzędzia to dwuczęściowa obejma wkładki matrycowej (na rys. 4.4 – pierścień 2 oraz obejma 3) oraz wyrzutnik dolny 6. Są one wykonane ze stali do ulepszania cieplnego w gatunku 40HM (wg normy ISO – 42CrMo4) – w odróżnieniu od narzędzi głównych, które są wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno. Takie rozwiązanie konstrukcyjne i technologiczne oprzyrządowania wynika z cech prasy specjalnej PXW-100A oraz z konieczności minimalizacji kosztów wykonania narzędzi. Ponadto, wkładka matrycowa 1 jest wciskana w obejmę 3. Zgodnie z rys. 4.4 proponuje się, aby połączenie tych elementów wykonać z pasowaniem ciasnym H7/p6. Wpływa to pozytywnie na wytrzymałość narzędzia głównego (tj. wkładki matrycowej). Należy zaznaczyć, że w przypadku procesu prasowania obwiedniowego wypraski o kształcie prostym, gdy powstające naciski jednostkowe są stosunkowo niewielkie, dopuszcza się zastosowanie pasowania mieszanego typu H7/n6.

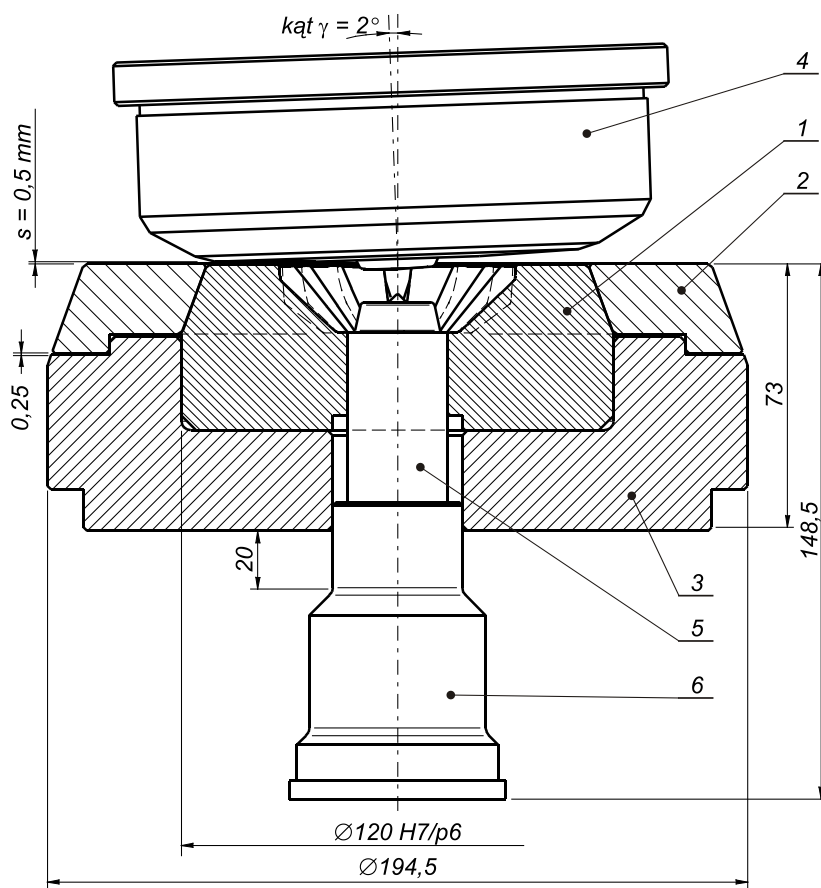
Projektując omawiany proces prasowania obwiedniowego wypraski (pokazanej na rys. 4.3) przyjęto, że powstaje wypływka promieniowa o grubości równiej 0,5 mm. Oznacza to, że zgodnie z rys. 3.20 należy tak dobrać wysokość matrycy dolnej (tj. wkładki 1 i obejmy 3 – rys. 4.4) oraz grubość pierścienia dystansowego, aby w końcowej fazie procesu powstała szczelina $s = 0,5$ mm pomiędzy powierzchnią roboczą stempla, a górną powierzchnią czołową wkładki matrycowej. Ostatecznie ustalono, że wysokość łączna matrycy dolnej (tj. w złożeniu) będzie wynosić 73 mm.

Maksymalny skok wyrzutnika górnego 5 wynika z cech konstrukcyjnych i wymiarów obejmy 3 oraz wyrzutnika dolnego 6. Dla omawianego zestawu narzędzi, skok wyrzutnika wynosi tylko 20 mm. Jednak, jest to wartość w pełni wystarczająca do poprawnej realizacji procesu technologicznego.

Dodatkowo, na powierzchni czołowej wyrzutnika górnego 5, wykonano występ technologiczny, zgodny z rys. 3.14c. Dla przypomnienia, służy on do wycentrowania materiału wsadowego. Takie rozwiązanie zastosowano z uwagi na to, że w procesie prasowania obwiedniowego wyrzutnik uczestniczy w sposób czynny.

Dokumentacja techniczna

Na kolejnych rys. 4.5÷4.9 przedstawiono wybrane rysunki wchodzące w skład opracowanej dokumentacji technicznej dla omawianego procesu

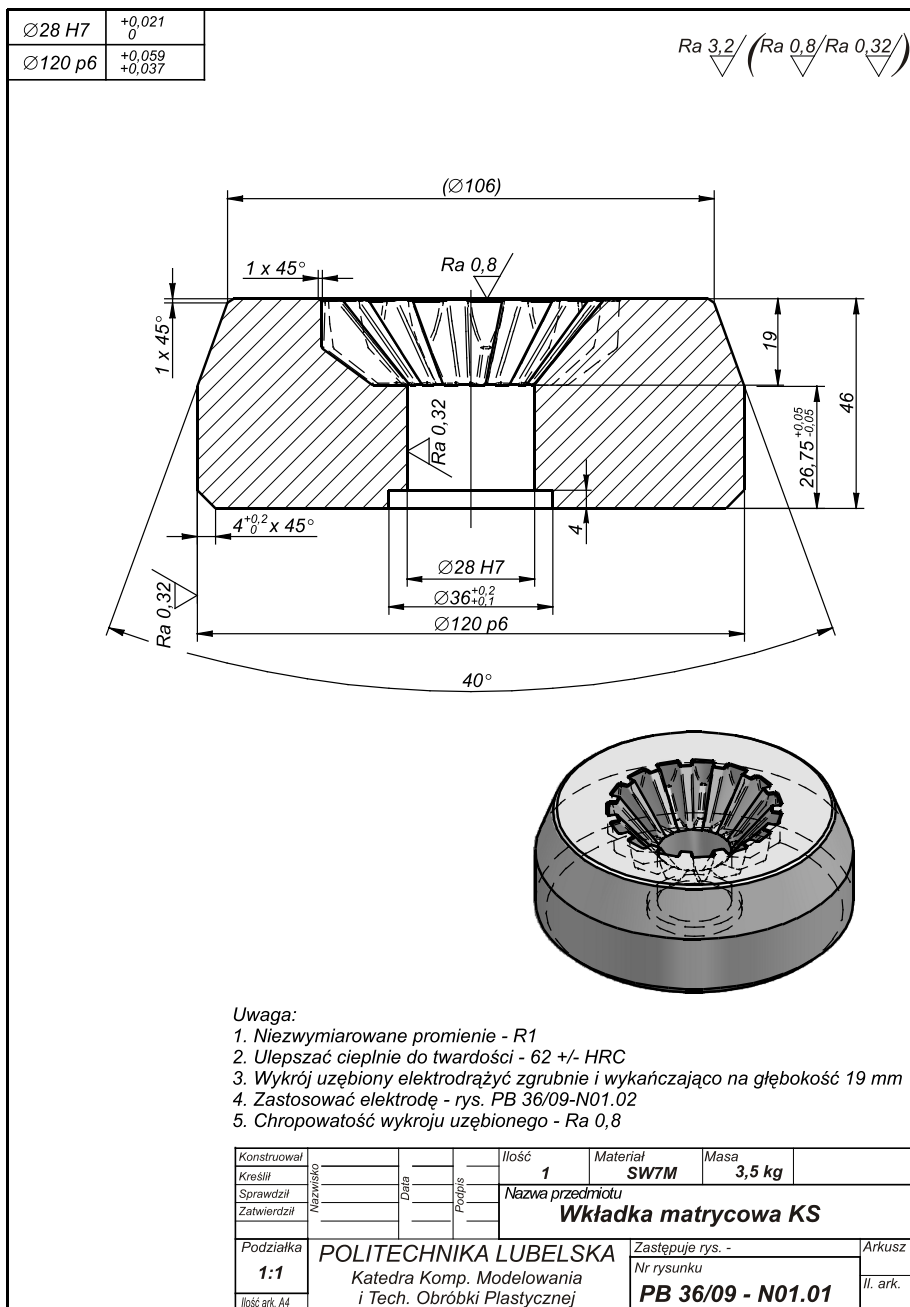


Rys. 4.4. Zestaw narzędzi do prasowania obwiedniowego wypraski typu stożkowe koło zębate, gdzie: 1 – wkładka matrycowa, 2 – pierścień matrycy, 3 – obejma, 4 – stempel, 5 – wyrzutnik górny, 6 – wyrzutnik górny, s – szczelina na wypływkę, γ – maksymalny kąt wychylenia stempla; opis w tekście

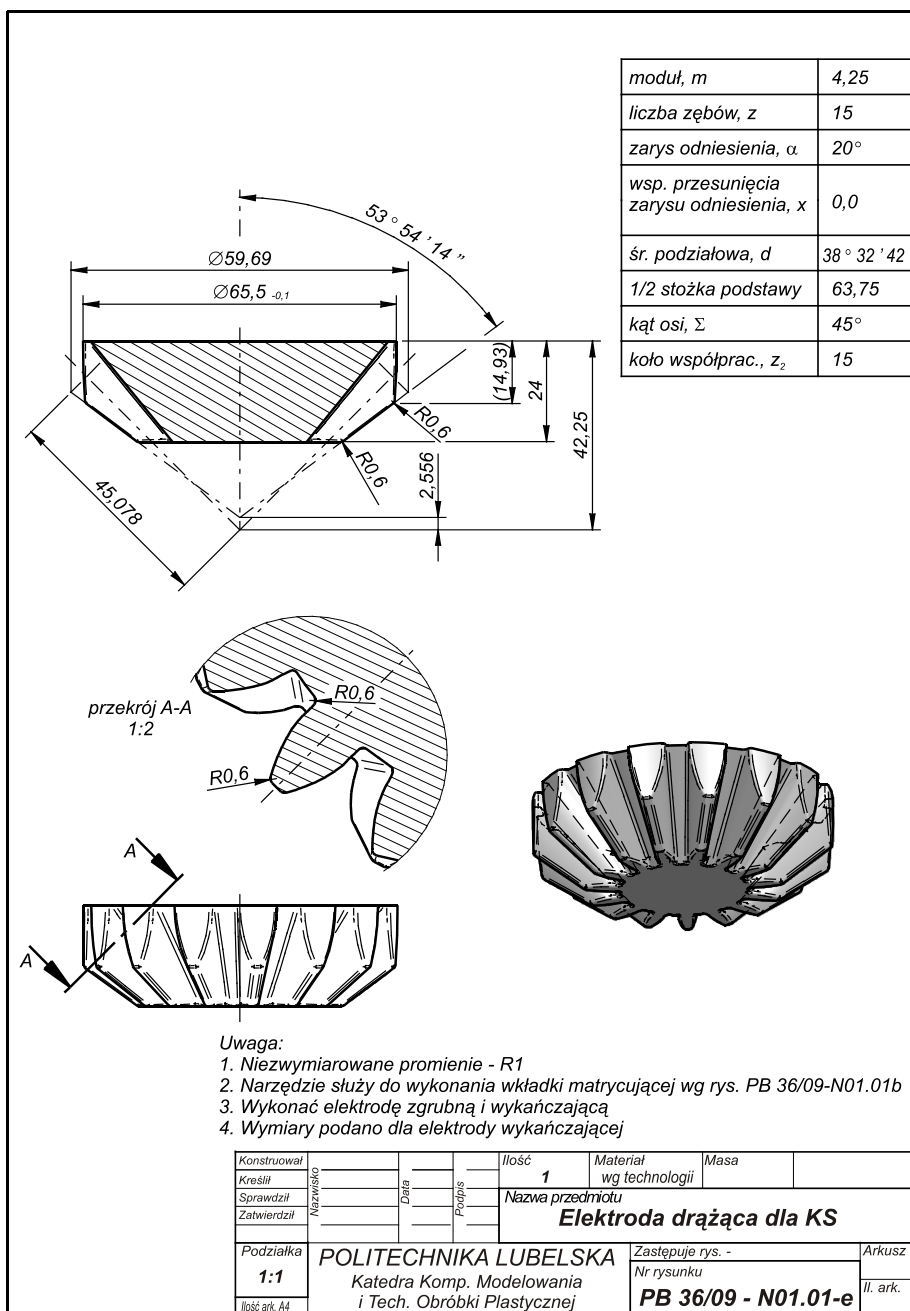
prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego. Dla przypomnienia, typowa dokumentacja powinna składać się co najmniej z następujących elementów:

- rysunku wypraski – przykładem może być rys. 4.3;
- rysunków wykonawczych poszczególnych narzędzi;

4. Analiza kształtowania stożkowego koła zębatego

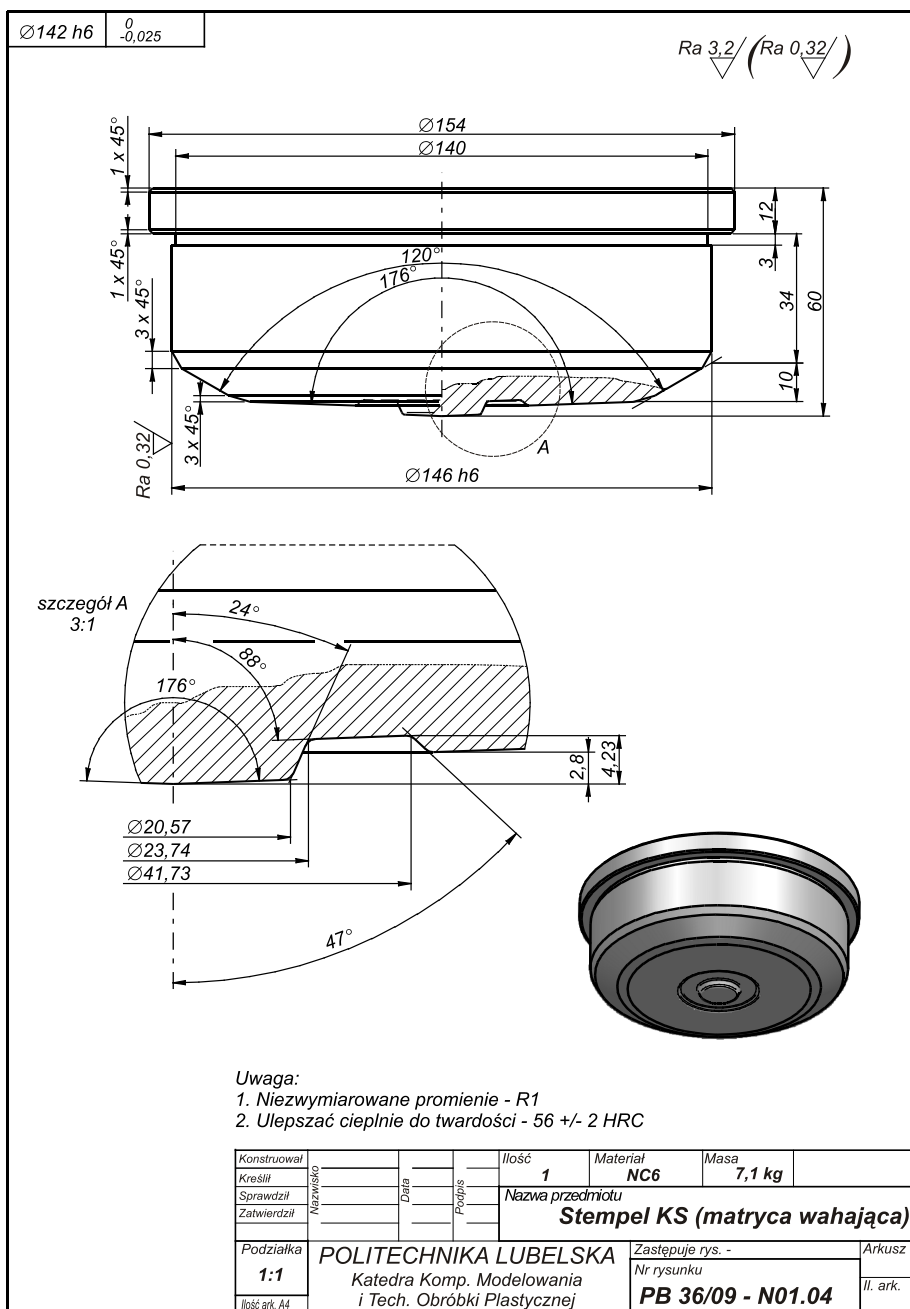


Rys. 4.6. Wkładka matrycowa – rysunek wykonawczy

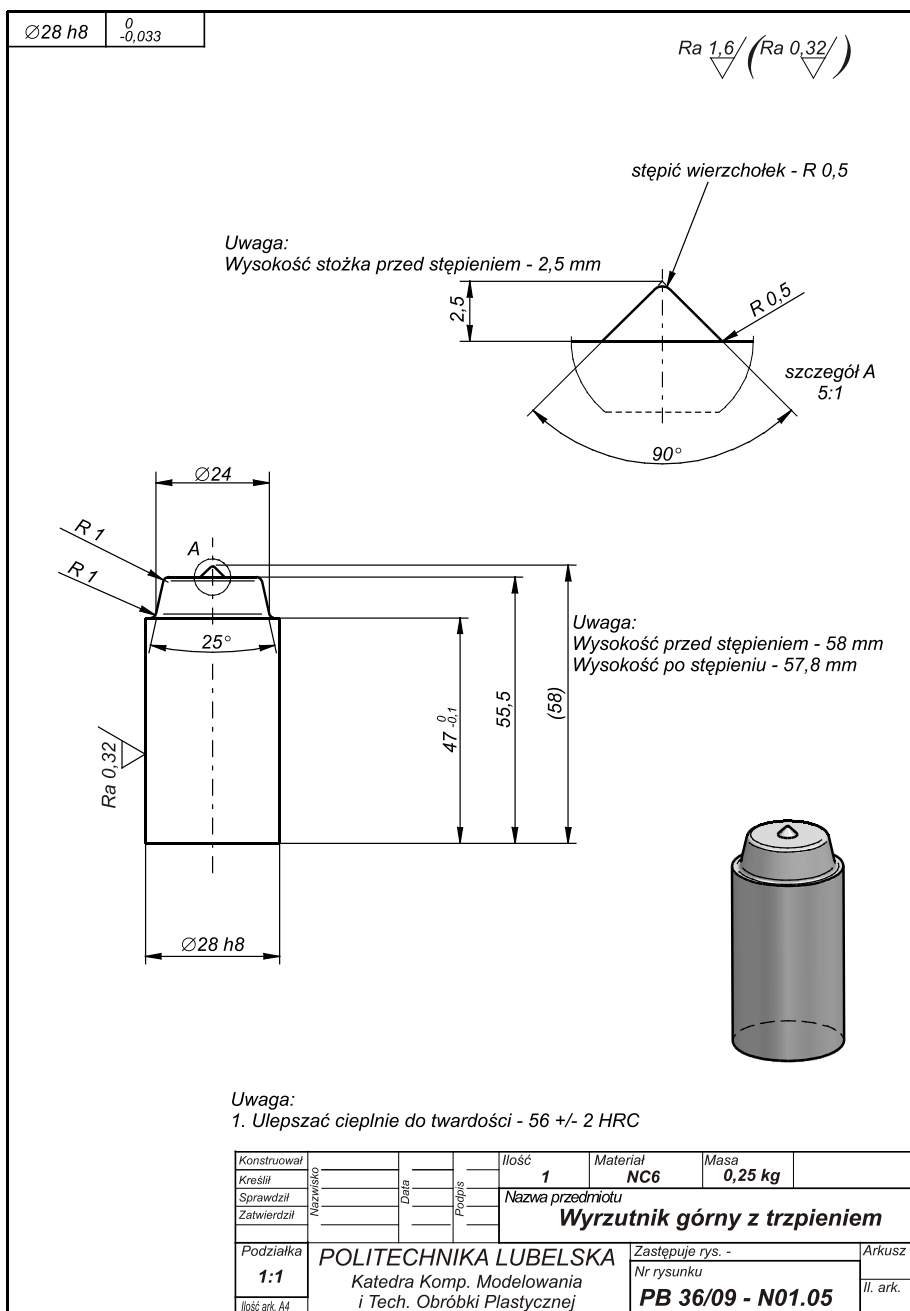


Rys. 4.7. Elektroda służąca do wykonania wkładki matrycującej – rysunek wykonawczy (dodatkowy)

4. Analiza kształtowania stożkowego koła zębatego



Rys. 4.8. Stempel – rysunek wykonawczy



Rys. 4.9. Wyrzutnik górny – rysunek wykonawczy

- rysunku złożeniowego (tzw. montażowego) oprzyrządowania – zgodnie z rys. 4.5, przedstawia on ogólny schemat układu narzędzi oraz podaje istotne dane technologiczne procesu, grubości pary pierścieni dystansowych oraz wymiary kontrolne wypraski, na podstawie których będzie możliwe sprawdzenie poprawności uzbrojenia prasy w narzędzia;
- rysunków dodatkowych części lub innych informacji, które są niezbędne do wykonania wszystkich narzędzi – przykładem może być rys. 4.7, gdzie przedstawiono rysunek wykonawczy elektrody służącej do wykonania wykroju uzębionego we wkładce matrycowej (przez elektrodrażenie).

4.3. Modelowanie numeryczne procesu prasowania obwiedniowego

4.3.1. Wprowadzenie

Prasowanie obwiedniowe kół zębatych jest procesem o stosunkowo dużym stopniu trudności. Zgodnie z literaturą specjalistyczną, np. [3÷5, 26, 78], kształtowanie na zimno stożkowych kół zębatych powinno być wykonywane z użyciem przedkuwki. Przykładowo, X. Deng [3] stosował materiał wsadowy, który miał kształt dwóch przystających stożków ściętych. Według jego wyników badań, dobór kąta tworzącej stożka przedkuwki powinien pozostawać w ścisłej relacji z geometrią uzębienia wypraski. Ponadto, w większości wykonanych badań (np. [3, 26]) wielokrotnie zakładano, że podczas procesu prasowania obwiedniowego wyrobów typu stożkowe koło zębate, nie stosuje się zabiegu kształtowania wgłębień (otworów) centralnych w wyprasce. Natomiast kształt i wymiary przedkuwki dobierano w ten sposób, aby maksymalny stopień przekucia był możliwie najmniejszy.

Zamieszczone poniżej wyniki badań własnych autora dotyczą procesu kształtowania wypraski pokazanej wcześniej na rys. 4.3. Cechą charakterystyczną proponowanego procesu prasowania obwiedniowego na zimno jest to, że składa się on z połączonych zabiegów wykonywanych w sposób etapowy (oczywiście za pomocą jednych narzędzi). Między innymi, przewiduje się, że w wyprasce zostaną najpierw wykonane wgłębienia centralne, a następnie będzie realizowane dalsze kształtowanie uzębienia oraz finalnego zarysu zewnętrznego wyrobu.

Celem analizy numerycznej jest również określenie wpływu kształtu i wymiarów przedkuwki na przebieg kształtowania wypraski. Zatem, symulację prasowania obwiedniowego przedmiotowej wypraski zrealizowano w oparciu o następujące założenia:

- wypraska jest prasowana obwiedniowo z przedkuwki kształtowej pełnej (rys. 4.10), w której kąt tworzącej powierzchni stożkowej wypraski dobrano bazując na powierzchni podstaw zębów w kole zębatym;
- średnica d części walcowej materiału wsadowego wynosi odpowiednio $\varnothing 50$, $\varnothing 55$ lub $\varnothing 60$ mm, natomiast pozostałe wymiary wsadu zostały dobrane w ten sposób, aby przy zachowaniu stałej objętości wysokość przedkuwki była możliwie najmniejsza, a mniejsza średnica części stożkowej wsadu nie powinna przekraczać wartości 30 mm – wymiary te wynikają z konieczności minimalizacji czasu trwania procesu prasowania obwiedniowego.

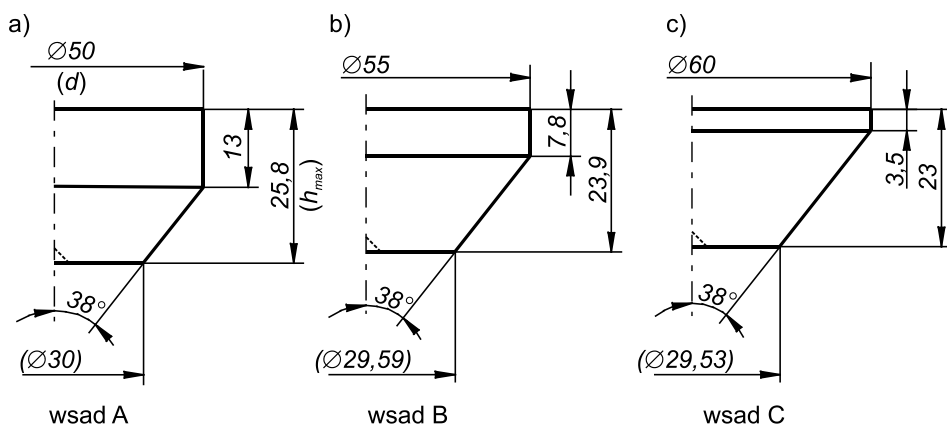
Do wyznaczenia maksymalnej wysokości h_{max} wsadu (o kształcie pokazanym na rys. 4.10) zastosowano poniższą zależność:

$$h_{max} = 0,0353 \cdot d^2 - 4,1297 \cdot d + 143,75 \quad , \quad (4.1)$$

lub po uwzględnieniu największej średnicy wypraski D :

$$h_{max} = 151,65 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 270,5 \cdot \frac{d}{D} + 143,75 \quad , \quad (4.2)$$

gdzie: d – średnica charakterystyczna wsadu (tj. części walcowej – rys. 4.10),
 D – największa średnica wypraski (w rozpatrywanym procesie technologicznym wynosi ona $\varnothing 65,5$ mm – rys. 4.3).

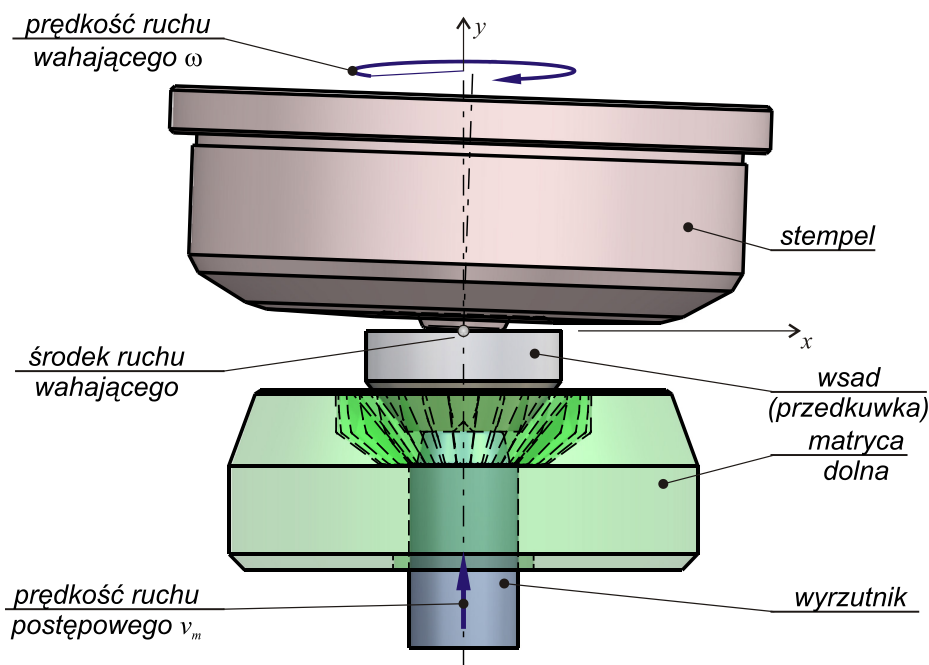


Rys. 4.10. Kształt i wymiary materiału wsadowego (przedkuwki), stosowanego w różnych wariantach procesu prasowania obwiedniowego wypraski stożkowego koła zębatego (opis w tekście)

4.3.2. Charakterystyka modelu numerycznego

Analiza numeryczna procesu prasowania obwiedniowego wypraski typu stożkowe koło zębate, bazująca na metodzie elementów skończonych (MES), jest realizowana w oparciu o oprogramowanie komercyjne DEFORM-3D. Aplikacja ta znajduje się na wyposażeniu Politechniki Lubelskiej i jest jednocześnie jednym z nielicznych systemów, które umożliwiają poprawne wykonanie symulacji MES badanego procesu technologicznego [54, 57].

Schemat ideowy modelu geometrycznego procesu prasowania obwiedniowego przedmiotowej wypraski pokazano na rys. 4.11. Natomiast na kolejnym rysunku 4.12, przedstawiono w powiększeniu przestrzeń roboczą, gdzie wsad (przedkuwka) jest ustawiona na powierzchni czołowej wyrzutnika, w sposób zgodny z rzeczywistym procesem technologicznym. Model geometryczny składa się z czterech obiektów. Narzędzia (tj. stempel,

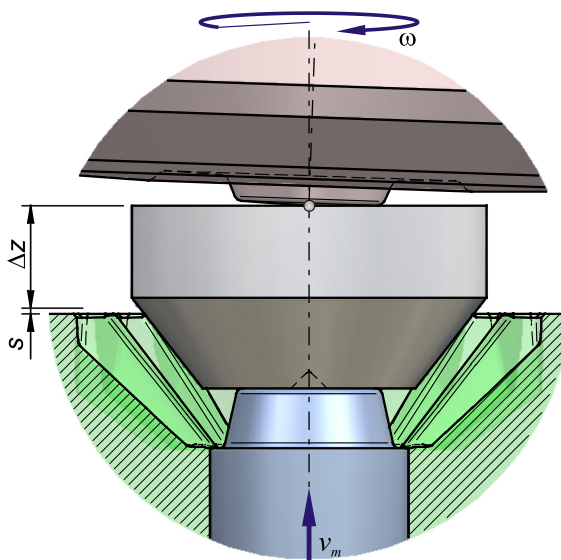


Rys. 4.11. Schemat ideowy przedstawiający model geometryczny procesu prasowania obwiedniowego wypraski typu stożkowe koło zębate; opis w tekście

tryca dolna oraz wyrzutnik) są zdefiniowane jako obiekty sztywne, a ich geometria jest reprezentowana poprzez bryłę zbudowaną na podstawie zbioru trójkątnych fragmentów powierzchni. Geometrię narzędzi importuje się z zewnętrznego programu typu CAD za pośrednictwem pliku importu o rozszerzeniu STL (z ang. *stereolithography format of 3D data*) [54]. Do tego celu wykorzystano modele CAD zaprojektowanych narzędzi, które przedstawiono wcześniej na rys. 4.6, rys. 4.8 oraz rys. 4.9.

Do narzędzi dolnych (wkładka matrycowa oraz wyrzutnik) przypisano

ruch prostoliniowy, który na rys. 4.11 przedstawiono umownie za pomocą wektora prędkości oznaczonego jako v_m . Prędkość tą, wyrażoną jako dosuw na jednostkę czasu (miano: $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$), definiuje się poprzez podanie wartości jako funkcję czasu w formie tabelarycznej. Gwarantuje to proste i niezawodne modelowanie rzeczywistego dosuwu narzędzi dolnych, który może być w pełni zgodny np. ze specyfikacją prasy PXW-100A [47, 48, 54]. Dobierając model ruchu narzędzi dolnych, jednocześnie uwzględnia się taką wartość drogi Δz (rys. 4.12), która pozwoli uzyskać oczekiwaną szczelinę s na wypływkę. Dla przypomnienia, zgodnie z rys. 4.5 szczelina ta powinna znajdować się pomiędzy matrycą dolną a stemplem. W obliczeniach przyjęto, że narzędzia dolne poruszają się stałą prędkością v_m . Na podstawie specyfikacji prasy PXW-100A [47, 48], maksymalna robocza prędkość v_m nie powinna być większa niż około $4,1\div 4,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.



Rys. 4.12. Szczegół przedstawiający przestrzeń roboczą wraz ze sposobem ustawienia wsadu, gdzie: Δz – droga do wykonania przez zespół narzędzi dolnych, s – szczelina na wypływkę; opis w tekście

Natomiast do narzędzia górnego (stempla) przypisano odpowiedni ruch precesyjno-nutacyjny wokół pewnego, stałego punktu, który na rys. 4.11 wskazano jako środek ruchu obwiedniowego. Szczegóły dotyczące sposobu modelowania tego ruchu podano w opracowaniu własnym [54]. Ze względu na kształt wypraski, przewiduje się zastosowanie dwóch rodzajów ruchu wahającego – tj. według schematu „po krzywej wielolistnej” (R) oraz „po spirali” (S). Są one zgodne ze specyfikacją prasy PXW-100A.

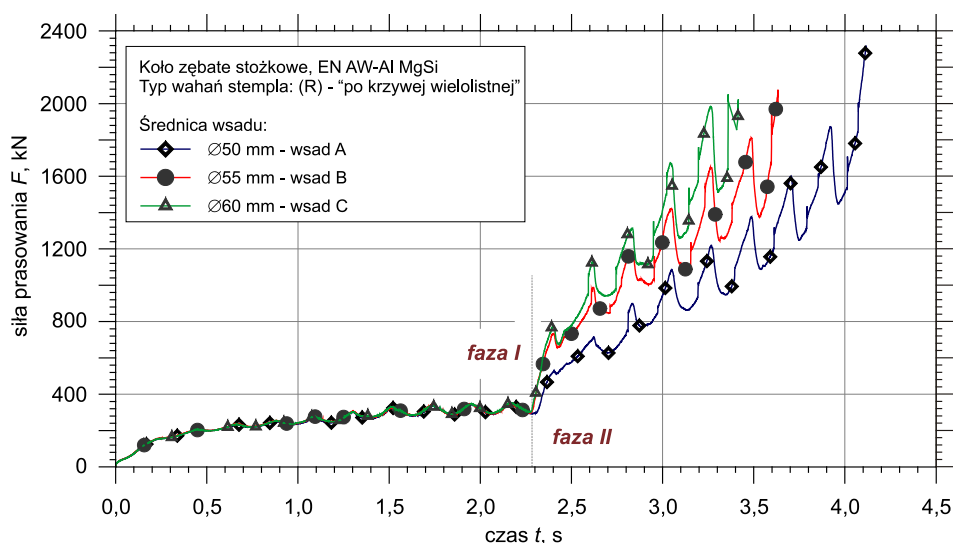
Materiał wsadowy jest zamodelowany jako obiekt sztywno-plastyczny, który podzielono na około 160 tysięcy elementów tetragonalnych czterowęzłowych. W obliczeniach przyjęto, że wypraska jest wykonana ze stopu aluminium w gatunku AW-Al MgSi. Jego dane materiałowe szczegółowo opisano również w opracowaniu własnym [54]. Ponadto, zakłada się, że analiza numeryczna jest wykonywana w oparciu o obliczenia termomechaniczne, gdzie temperatura początkowa przedkuwki oraz narzędzi wynosi 20°C , a współczynnik wymiany ciepła pomiędzy obiektami wynosi $24 \text{ Wm}^2\text{K}$. Natomiast warunki kontaktowe opisano modelem tarcia stałego, dla którego czynnik tarcia $m = 0,45$ [54].

4.4. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych

4.4.1. Siła i praca prasowania obwiedniowego

Charakter zmiany i przebieg siły kształtowania F w funkcji czasu t , dla procesu prasowania obwiedniowego wypraski typu stożkowe koło zębate, przedstawiono na kolejnych rysunkach 4.13÷4.15. Wykresy sił, które umieszczono na dwóch pierwszych rysunkach, umożliwiają porównanie wpływu zmiany wymiarów materiału wsadowego (rys. 4.10) na charakter przebiegu tej siły, gdy stosuje się jeden z dwóch rodzajów ruchu wahającego stempla. Podane na tych wykresach wartości średnicy d wsadu (tj. $\varnothing 50 \text{ mm}$, $\varnothing 55 \text{ mm}$ oraz $\varnothing 60 \text{ mm}$) są wymiarami charakterystycznymi przedkuwki i odnoszą się one do jej części walcowej – rys. 4.10.

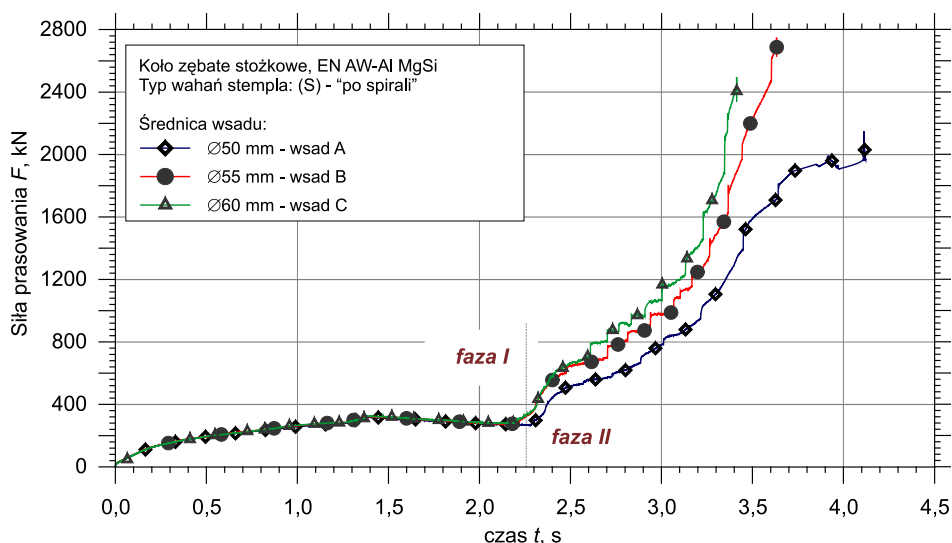
Analizując przebieg zmiany siły prasowania F stwierdza się, że proces prasowania obwiedniowego przedmiotowej wypraski składa się dwóch faz kształtowania (rys. 4.13 i rys. 4.14). Pierwsza faza procesu dotyczy swobodnego spęczniania wypraski z jednoczesnym kształtowaniem centralnych wgłębień. Charakter przebiegu siły na tym etapie kształtowania nie zależy ani od początkowych wymiarów materiału wsadowego, ani od rodzaju zastosowanego ruchu wahającego narzędzia. Siła prasowania zmienia się w sposób



Rys. 4.13. Porównanie przebiegu siły kształtowania F w zależności od wymiarów wsadu dla procesu prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego, gdy stempel wykonuje ruch wg schematu (R), a narzędzia dolne przesuwają się z stałą prędkością $v_m = 4,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

monotoniczny, a przyrost jej wartości w czasie t jest stosunkowo niewielki. Maksymalna wartość siły F nie przekracza 360 kN. Zatem, wnioskuje się, że w warunkach kształtowania na prasie typu PXW-100A, faza I prasowania wypraski może być realizowana przy zastosowaniu maksymalnej prędkości roboczej dosuwu narzędzia dolnego. Czas trwania tej fazy wynosi ok. 2,3 sekundy i stanowi w przybliżeniu połowę czasu trwania całego procesu wykonania wypraski (przyjmując stałą prędkość dosuwu narzędzi v_m).

Druga faza procesu prasowania obwiedniowego wypraski charakteryzuje się złożonym schematem odkształceń – materiał jest spęczany w części centralnej oraz jednocześnie następuje kształtowanie uzębienia. Efektem tego jest zachowanie się siły prasowania w ten sposób, że następuje gwałtowny przyrost jej wartości. Na tym etapie procesu charakter przebiegu siły oraz jej chwilowe wartości silnie zależą zarówno od rodzaju ruchu wahającego narzędzia, jak i od początkowych wymiarów materiału wsadowego. W przypadku, gdy stempel wykonuje ruch wahający według schematu (R), wartość

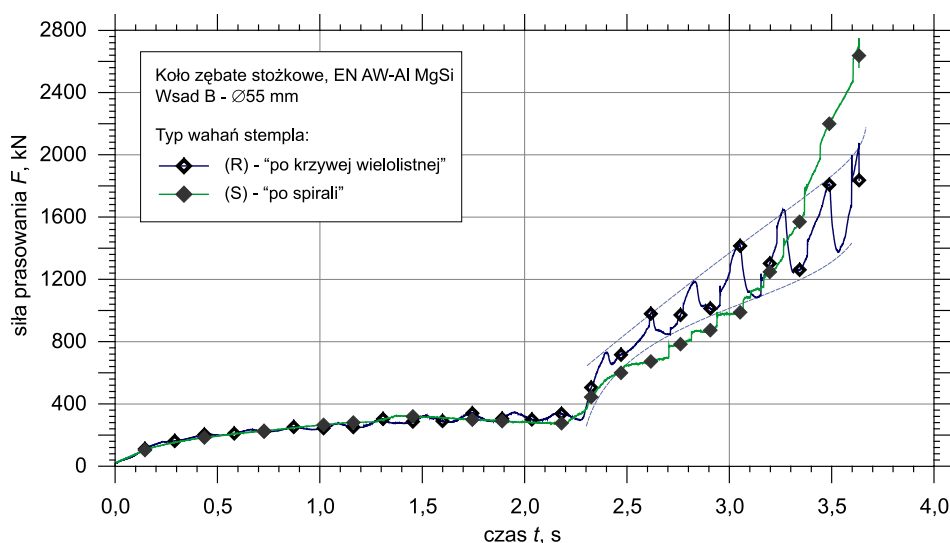


Rys. 4.14. Porównanie przebiegu siły kształtowania F w zależności od wymiarów wsadu dla procesu prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego, gdy stempel wykonuje ruch wg schematu (S), a narzędzia dolne przesuwają się z stałą prędkością $v_m = 4,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

siły F zmienia się w sposób oscylacyjny (rys. 4.13). Widoczne cykliczne zmiany wartości siły spowodowane są nieustannym zmienianiem się kąta wychylenia stempla. Zgodnie z literaturą specjalistyczną [54], taki przebieg siły jest normalny dla danego schematu prasowania.

Ponadto, na podstawie symulacji numerycznej stwierdza się, że obliczona maksymalna wartość siły prasowania obwiedniowego przekracza dopuszczalne obciążenie, jakie można uzyskać na prasie PXW-100A (tj. 1600 kN). Jest to szczególnie widoczne, gdy narzędzie wykonuje ruch wahający typu (S) – rys. 4.14. Oznacza to, że w warunkach rzeczywistych, w końcowym etapie drugiej fazy prasowania obwiedniowego, nastąpi zmniejszenie prędkości dosuwu narzędzi dolnych. W rezultacie czas całkowity kształtowania wypraski również odpowiednio zwiększy się.

Na kolejnym rysunku 4.15 przedstawiono wpływ zmiany rodzaju ruchu wahającego na przebieg siły F , na przykładzie wariantu procesu kształtowania wypraski ze wsadu B (Ø55 mm). Na wykresie tym umieszczono dodat-



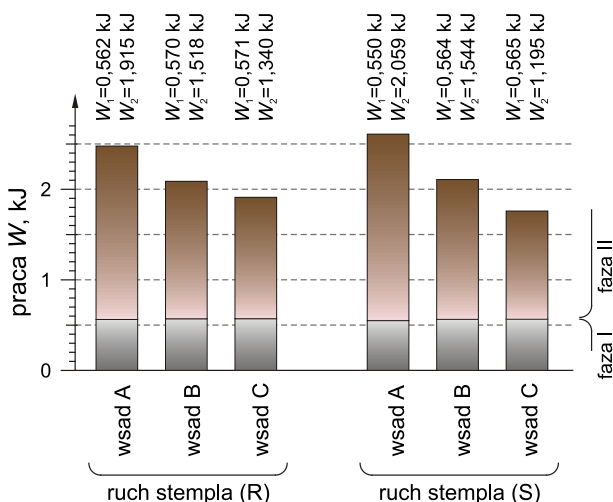
Rys. 4.15. Porównanie przykładowego przebiegu siły kształtowania F w zależności od rodzaju ruchu wahającego stempla dla procesu prasowania obwiedniowego wypraski stożkowego koła zębatego, gdy użyto wsadu B (rys. 4.10b); narzędzia dolne przesuwają się z prędkością stałą wynoszącą $v_m = 4,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

kowe linie reprezentujące ekstremalne wartości chwilowe siły F dla przypadku, gdy stempel wykonuje ruch wahający według schematu (R). Dzięki temu można stwierdzić, że ogólny trend przyrostu siły kształtowania jest w zasadzie jednostajny. Zauważa się również, że wraz z postępem procesu amplituda zmian lokalnych tej siły powiększa się. Bezpośrednim powodem tego jest powiększanie się powierzchni kontaktu wypraska-narzędzia.

Przeprowadzona analiza przebiegu siły prasowania obwiedniowego, gdy zastosowano typ wahań narzędzia (S), pozwoliła wykazać, że w tym przypadku siła najpierw stosunkowo łagodnie wrasta, po czym następuje znaczący przyrost jej wartości. Zauważono również, że jedynie dla wariantu prasowania obwiedniowego z użyciem wsadu A (tj. o najmniejszej średnicy), występuje dodatkowo trzeci etap zmiany siły F – polega on na stabilizacji wartości siły na określonym poziomie. Zaobserwowany przebieg siły kształtowania F jest również zdeterminowany zmianą kąta γ wychylenia stempla. Gdy wartość kąta γ maleje i zbliża się do 0° , następuje szybszy przyrost siły

prasowania w czasie. Natomiast gdy kąt γ zaczyna wzrastać, przyrost siły F w czasie jest znacznie wolniejszy. W podobny sposób interpretuje się oscylacyjny charakter zmiany siły w przypadku zastosowania ruchu wahającego typu (R).

Reasumując i uwzględniając wcześniejsze wyniki badań własnych, które zamieszczono w opracowaniu [54], wnioskuje się, że **charakter przebiegu siły** prasowania obwiedniowego zależy tylko i wyłącznie od przyjętego rodzaju ruchu wahającego stempla. Natomiast kształt i wymiary wsadu (wypraski) mają jedynie wpływ na **wartość** tej **siły**. W przypadku procesu prasowania obwiedniowego wypraski stożkowego koła zębatego stwierdza się, że przy zastosowaniu ruchu stempla typu (S), końcowa wartość siły kształtowania jest największa spośród wszystkich rozpatrywanych wariantów prasowania. W zależności od średnicy charakterystycznej wsadu, wartość ta plasuje się w przedziale 2400÷2800 kN. Z kolei, gdy zastosuje się ruch stempla typu (R), maksymalna siła F jest średnio o 300 kN mniejsza od pozostałych, rozpatrywanych przypadków.



Rys. 4.16. Porównanie obliczonej pracy wykonanej przez siłę kształtowania F w fazie I (W_1) oraz w fazie II (W_2) procesu prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego

Na kolejnym rysunku 4.16 zamieszczono porównanie pracy wykonanej przez narzędzia dolne (matrycę i wyrzutnik) w trakcie kształtowania wypraski. Dolna część diagramu reprezentuje pracę wykonaną w pierwszej fazie prasowania obwiedniowego. Wartość tej pracy wynosi tylko $W_1 = 565$ J i zasadniczo nie zależy, ani od rodzaju ruchu stempla, ani od wymiarów wsadu. Zatem, o energochłonności procesu decyduje tylko druga

faza prasowania obwiedniowego. Analiza wyników pozwala również stwierdzić, że decydujący wpływ na wartość pracy W_2 ma jedynie zmiana wymiarów materiału wsadowego.

Podsumowując, wcześniej na podstawie analizy wykresów przebiegu siły F stwierdzono, że największa siła jest osiągana podczas kształtowania wypraski ze wsadu C (rys. 4.10c). Natomiast zgodnie z rys. 4.16, zastosowanie wsadu C (tj. o największej średnicy części walcowej oraz najmniejszej wysokości) sprawia, że energochłonność procesu jest najmniejsza. W porównaniu z wariantem kształtowania wypraski ze wsadu A, uzyskuje się oszczędność energii rzędu 30%. Zatem można zaproponować pierwszy wniosek o treści, że ze względu na parametry siłowe, proces kształtowania wypraski typu stożkowe koło zębate należy wykonać (na prasie typu PXW) przy następujących warunkach:

- materiał wsadowy powinien posiadać możliwie dużą średnicę, możliwie małą wysokość oraz kształt zbliżony do zarysu gabarytowego wyrobu;
- stempel powinien wykonywać ruch wahający zgodny ze schematem (S).

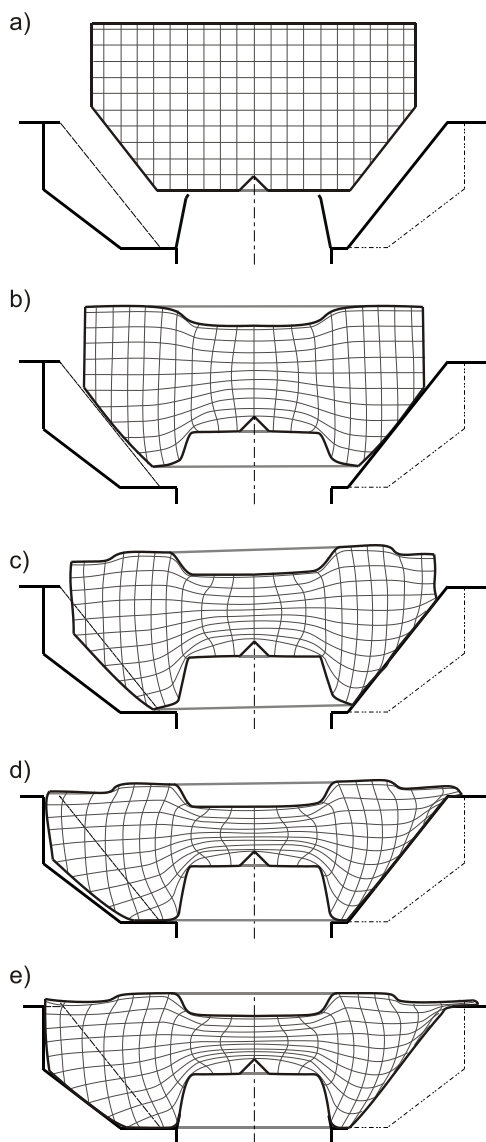
Należy oczywiście podkreślić, że podany wniosek nie jest ostateczny. Wymaga on pewnego uzupełnienia, w oparciu o obserwację charakteru płynięcia materiału, co zostanie wykonane w dalszej części rozdziału.

4.4.2. Analiza płynięcia materiału podczas kształtowania wypraski

Stan odkształcenia – wariant A

Rozpatrzmy wariant prasowania obwiedniowego wypraski ze wsadu A – tj. o początkowej średnicy d części walcowej wynoszącej 50 mm (rys. 4.10a). Przyjmijmy, że stempel wykonuje ruch wahający według schematu (R). Całkowity czas kształtowania wypraski (uwzględniając łącznie fazę I oraz fazę II) wynosi $t = 4,12$ sekundy. Po zakończeniu fazy II następuje dodatkowa kalibracja wypraski (faza III), która polega na tym, że przy zatrzymanych narzędziach dolnych, stempel nadal wykonuje ruch obwiedniowy. Efektem kalibracji jest uzyskanie kształtu wyrobu możliwie najbardziej zbliżonego do oczekiwanego, zgodnego z rysunkiem 4.3. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych wykazują, że jest wskazane, aby czas trwania ostatniej fazy procesu prasowania obwiedniowego był ściśle powiązany z czasem trwania pełnego cyklu ruchu wahającego narzędzia.

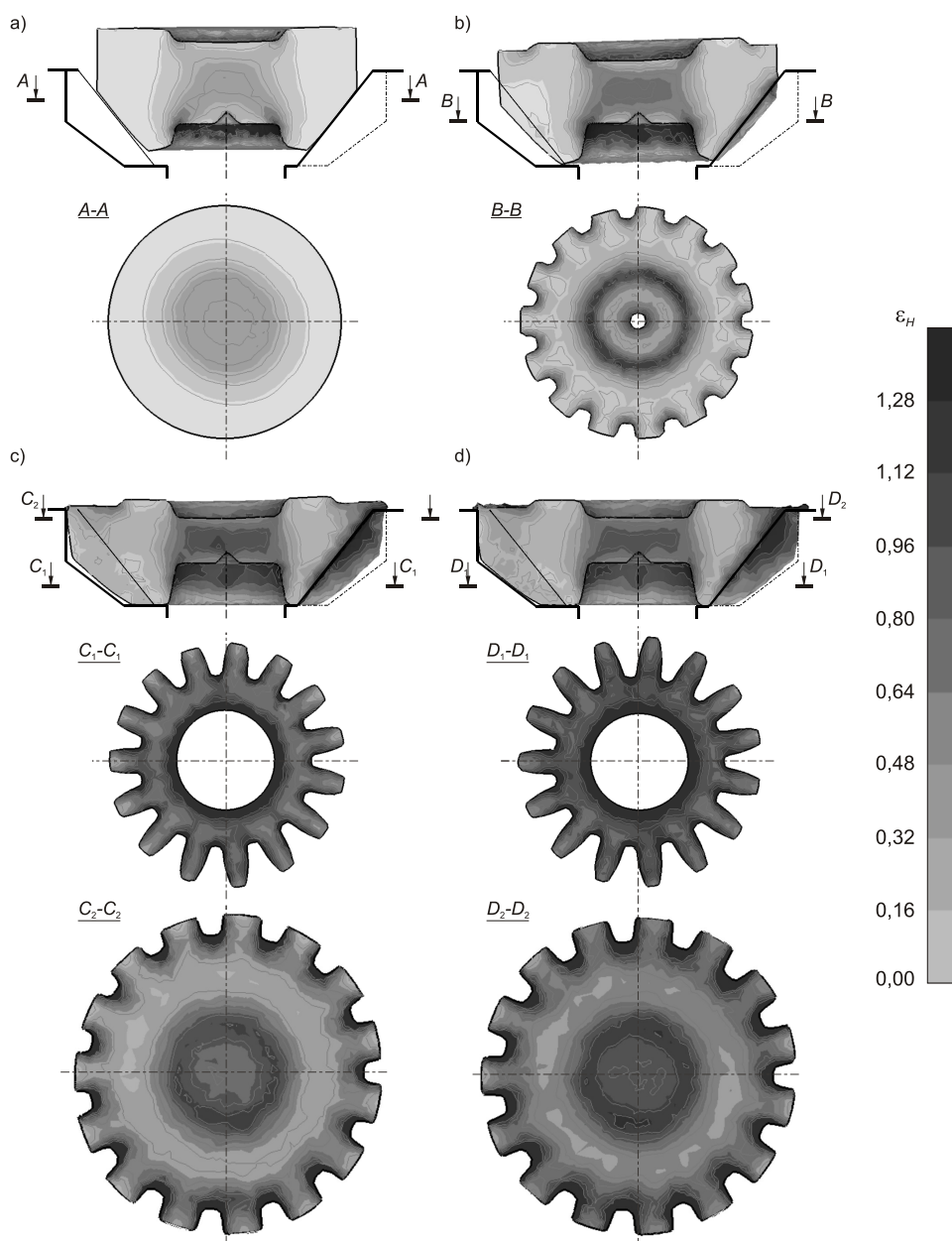
Na rys. 4.17 przedstawiono progresję kształtu wypraski oraz zmianę kształtu siatki koordynacyjnej, naniesionej na przekrój osiowy. Wyniki ilu-



Rys. 4.17. Zmiana kształtu siatki koordynacyjnej w przekroju osiowym wypraski oraz pokazany zarys narzędzi; kolejne fazy prasowania: a) początek procesu, b) koniec fazy I, c) połowa fazy II, d) koniec fazy II, e) koniec kalibracji (fazy III); pełny opis w tekście

strują kształt wyrobu w czterech charakterystycznych etapach prasowania obwiedniowego. Dla zwiększenia czytelności rysunku, dodano zarys wykroju matrycy dolnej oraz wyrzutnika. Lewa część wypraski reprezentuje płynięcie materiału w przekroju środkowym zęba, natomiast prawa – pokazuje płynięcie materiału w obszarze przylegającym do powierzchni podstawy zęba. Uzupełnieniem informacji o charakterze płynięcia materiału, podczas prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego, jest rozkład intensywności odkształcenia ε_H zarejestrowany w wybranych przekrojach wyrobu. Wyniki te przedstawiono na kolejnym rys. 4.18.

Scharakteryzujemy sposób płynięcia materiału w fazie I procesu prasowania obwiedniowego. Kształtowanie wypraski sprowadza się do wgłębianie się trzpieni stempla i wypychacza w centralną część materiału (rys. 4.17b). Środkowa część wsadu doznaje odkształceń takich samych, jak w przypadku klasycznego procesu dziurowania. W efekcie tego, następuje jedynie miejscowe zmniejszenie wysokości wypraski, nieznaczne zniekształcenie powierzchni

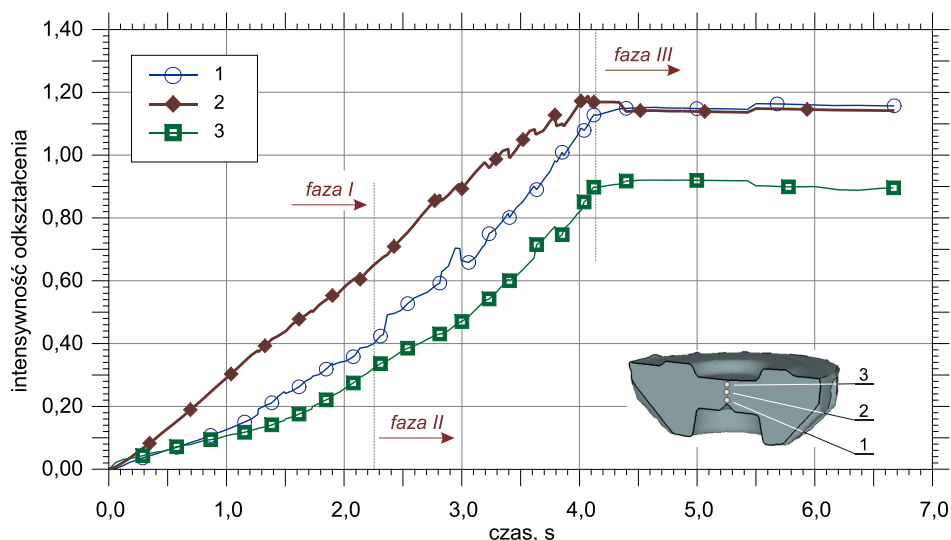


Rys. 4.18. Rozkład intensywności odkształcenia ε_H w przekrojach osiowych oraz poprzecznych wypraski; etapy prasowania: a) koniec fazy I, b) połowa fazy II, c) koniec fazy II, d) koniec kalibracji (pełny opis w tekście)

czołowych wyrobu (w otoczeniu powstających zagłębień) oraz niewielkie powiększenie średnicy zewnętrznej. Jak wynika z kształtu siatki koordynacyjnej, jej linie zachowują ciągłość. Materiał przylegający do powierzchni czołowej trzpieni narzędzi płynie wolniej w kierunku promieniowym, niż materiał w centralnej części wypraski. Jest to spowodowane występowaniem tarcia pomiędzy materiałem, a wspomnianą powierzchnią narzędzi. Nie zauważa się istotnego wpływu technologicznych stożków (umiejscowionych na powierzchni wyrzutnika) na charakter płynięcia materiału. W tej fazie procesu, koncentracja największych odkształceń materiału (rys. 4.18a) jest zlokalizowana zarówno w centralnej części powstającego denka, jak i również w pobliżu krawędzi wyrzutnika – ściślej: w miejscu przejścia powierzchni czołowej wypychacza w powierzchnię walcową. Stąd wniosek, że wspomniana krawędź narzędzia powinna być zaokrąglona maksymalnie największym promieniem. W rozpatrywanym przypadku promień ten wynosił tylko 1 mm. Niemniej jednak, rozpiętość wartości intensywności odkształcenia jest stosunkowo mała, co potwierdza łagodny i objętościowy charakter kształtowania wypraski w tej fazie procesu.

Historię zmiany intensywności odkształcenia, zaobserwowaną w trzech charakterystycznych punktach wzdłuż osi w strefie centralnej wypraski, przedstawiono na kolejnym rys. 4.19. Lokalizację tych punktów dobrano tak, aby punkty o numerze 1 i 3 reprezentowały warstwę materiału przylegającego do powierzchni styku z narzędziami, natomiast punkt oznaczony cyfrą 2 – przedstawiał obszar materiału w środkowej strefie denka. Zaobserwowano, że przez cały czas trwania procesu kształtowania wypraski (faza I oraz faza II) wartość intensywności odkształcenia wzrasta proporcjonalnie. Dopiero w fazie kalibracji następuje ustalenie wartości na określonym poziomie, nieprzekraczającym 1,24. Oznacza to, że przez cały czas trwania zasadniczego procesu prasowania obwiedniowego denko jest odkształcane równomiernie, a dopiero w ostatnim stadium procesu, ten obszar materiału praktycznie nie jest kształtowany – stąd wniosek, że kalibracja nie powoduje dogniatania denka.

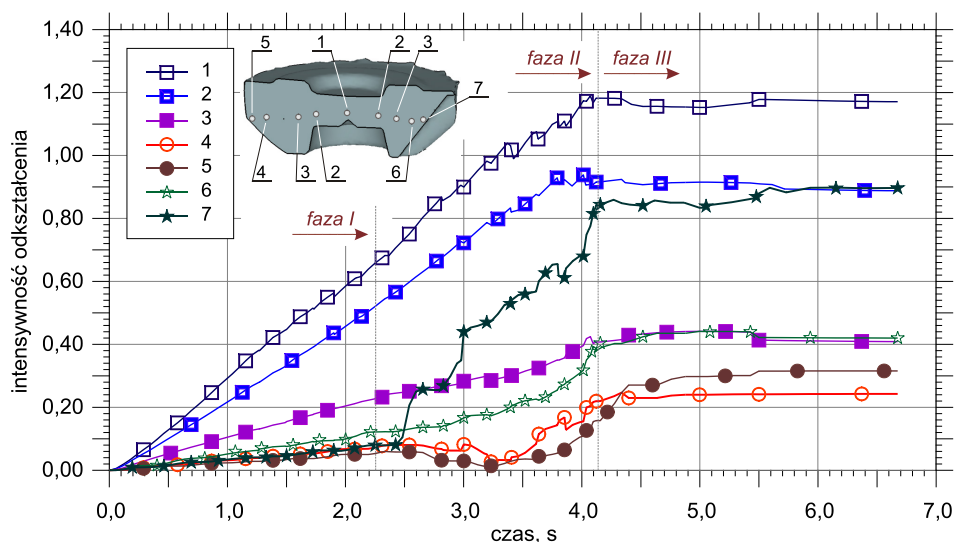
Rozpatrzmy teraz pozostałe obszary wypraski, szczególnie w aspekcie fazy II prasowania obwiedniowego. Zgodnie z rys. 4.17c, d oraz rys. 4.18b, c – faza ta jest momentem kształtowania uzębienia w wyprasce. Zaobserwowano, że następuje niewielkie zakłócenie przebiegu linii siatki koordynacyjnej, szczególnie tuż przy powierzchni powstającego dna zęba. Również rozkład intensywności odkształcenia w tej strefie staje się bardziej



Rys. 4.19. Historia zmiany intensywności odkształcenia ϵ_H w charakterystycznych punktach rozlokowanych wzdłuż osi wypraski – prasowanie obwiedniowe wypraski ze wsadu A (o średnicy $\varnothing 50$ mm), gdy stempel wykonuje ruch wahający zgodny ze schematem (R)

nierównomierny. Na kolejnym rysunku 4.20, zamieszczono historię zmiany intensywności odkształcenia obliczoną w wybranych punktach, rozmieszczonych wzdłuż promienia wypraski. Początkowa odległość tych punktów od dolnej powierzchni czołowej wsadu wynosiła 12 mm oraz były one rozmieszczone w odstępach co 5 mm. Punkty skrajne (nr 5 i 7) zlokalizowano tak, aby znajdowały się na powierzchni stożkowej wsadu – dlatego też ich położenie końcowe jest w niewielkim stopniu różne względem poziomu pozostałych punktów. Kolejne punkty – o numerach 1 i 2, reprezentują obszar denka wypraski (tj. centralną strefę materiału), przy czym punkt oznaczony cyfrą 1 jest tym samym punktem, który oznaczono numerem 2 na poprzednim rys. 4.19. Kolejna para punktów nr 3 (rys. 4.20) reprezentuje obszar materiału zlokalizowanego pomiędzy denkiem a uzębieniem wypraski. Następne dwa punkty – nr 4 oraz 5, znajdują się w obszarze materiału, który tworzy tzw. rdzeń zęba.

Jak wynika z analizy stanu odkształcenia, wartość intensywności odkształcenia, dla strefy pomiędzy denkiem a uzębieniem, nie przekracza 0,5,



Rys. 4.20. Historia zmiany intensywności odkształcenia ε_H w charakterystycznych punktach wzdłuż promienia wypraski – prasowanie obwiedniowe wypraski ze wsadu A (o średnicy $\varnothing 50$ mm), gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R)

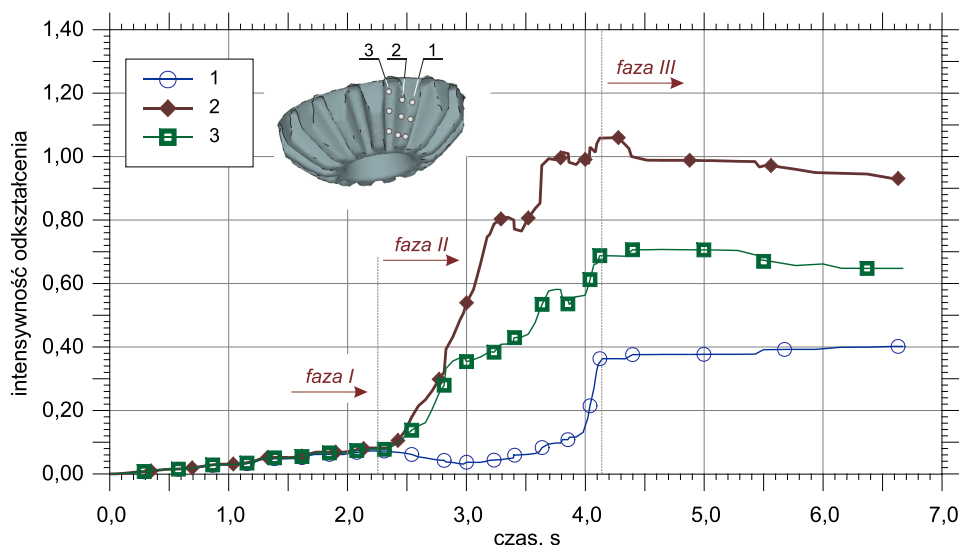
a przyrost tej wartości jest proporcjonalny w czasie trwania, zarówno fazy I, jak i fazy II procesu kształtowania. Ciekawie przedstawia się stan odkształcenia w strefie rdzenia zęba. W fazie pierwszej procesu, przyrost intensywności odkształcenia w tej strefie materiału jest niewielki i ma charakter liniowy. Dopiero w połowie fazy drugiej, charakter zmiany odkształcenia staje się inny. Następuje przyspieszenie wzrostu intensywności odkształcenia, a ustalenie określonej, maksymalnej wartości następuje dopiero po upływie ok. 3 sekund trwania fazy kalibracji. Oznacza to, że stosowanie kalibracji jest uzasadnione ze względu na konieczność nadania ostatecznego kształtu uzębieniu wypraski. Jest to szczególnie widoczne na wykresie zmiany odkształcenia obliczonego w punkcie nr 5, który znajduje się na powierzchni wierzchołka zęba.

Natomiast moment rozpoczęcia i zakończenia fazy II procesu bardzo dobrze jest widoczny na wykresie historii zmiany intensywności odkształcenia, którą uzyskano w punkcie oznaczonym cyfrą 7 (rys. 4.20). Jest to punkt zlokalizowany na powierzchni podstawy zęba. Zaobserwowano również, że

pomiędzy sąsiadującymi punktami (nr 7 oraz nr 6) powstaje bardzo duży gradient odkształcenia.

Zatem, analiza obliczonego rozkładu odkształcenia pozwala stwierdzić, że druga faza kształtowania wypraski rozpoczyna się z momentem, kiedy stożkowa powierzchnia wsadu zaczyna się stykać z powierzchnią wierzchołków wykroju uzębionego matrycy dolnej (rys. 4.17b, rys. 4.18a, rys. 4.20 – punkt 7). W fazie tej, obok kontynuowana spęczniania i wgłębiania centralnych elementów narzędzi, następuje dodatkowe kształtowanie uzębienia, które ma znaczący wpływ na rozkład odkształcenia w całej objętości wyrobu – potwierdza to interpretacja rys. 4.19 oraz rys. 4.20. Dodatkowo, bazując na analizie kształtu siatki koordynacyjnej z rys. 4.17, stwierdza się, że uzębienie w wyprasce powstaje w wyniku wgłębiania uzębionego wykroju roboczego matrycy dolnej w materiał wypraski – co można potraktować jako zabieg wyciskania współbieżnego i promieniowego, pomimo tego, że w strefie środkowej zęba stopień odkształcenia jest niewielki w porównaniu z jego powierzchnią. Świadczy o tym kształt siatki koordynacyjnej przedstawionej na rys. 11c, d, która jest w zasadzie niezmienną w strefie zęba oraz rozkład odkształcenia w płaszczyźnie osiowej – rys. 12b, c oraz rys. 14 – punkty 4 i 5. Materiał w tej strefie silnie odkształca się tylko tuż przy powierzchni styku z narzędziami. Potwierdza to również analiza zniekształcenia siatki koordynacyjnej, która w przekroju osiowym wypraski od strony powierzchni podstawy zęba, doznaje największych deformacji. Charakter zmiany siatki wskazuje, że materiał w tej strefie płynie w kierunku promieniowym – ku osi środkowej wypraski oraz w kierunku osiowym, w stronę stempla (tj. w kierunku zdeterminowanym przez przemieszczanie się matrycy dolnej). Włókna siatki zachowują ciągłość przebiegu, a największe odkształcenia obserwuje się tuż przy powierzchni podstaw oraz powierzchni bocznej podstawy zęba. Takie zachowanie się materiału jest związane między innymi z tym, że przyjęty w obliczeniach czynnik tarcia na powierzchni styku matrycy z materiałem posiada znaczącą wartość.

Na rysunku 4.21 przedstawiono historię zmiany intensywności odkształcenia, wyznaczoną dla trzech stref zęba – tj. na powierzchni wierzchołków, bocznej i podstaw. Punkty wykresów reprezentują wartości średnie wartości, obliczone z pomiarów pobranych z trzech miejsc, wzdłuż tworzącej stożka. Miejsca te są oddalone od siebie o ok. 5 mm. Zaobserwowane różnice pomiędzy stopniem odkształcenia dla różnych stref zęba są dopełnieniem informacji na temat procesu prasowania kół zębatych. Wynika z nich, że mate-



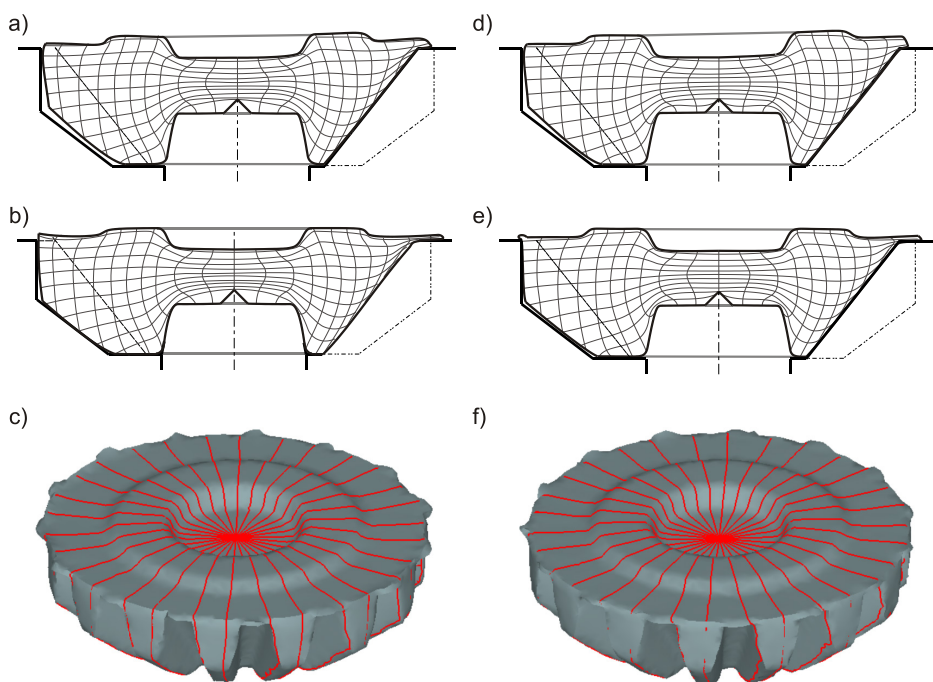
Rys. 4.21. Historia zmiany intensywności odkształcenia ε_H wyznaczonego na podstawie pomiarów w trzech wybranych punktach umieszczonych na powierzchniach wierzchołków (1), bocznej (2) i podstaw (3) uzębienia wypraski – prasowanie obwiedniowe wypraski ze wsadu A (o średnicy $\varnothing 50$ mm), gdy stempel wykonuje ruch wahający zgodny ze schematem (R)

riał znajdujący się w pobliżu powierzchni bocznej zęba jest odkształcony w większym stopniu (o ok. 40%), niż materiał zlokalizowany przy powierzchni podstaw. Oznacza to, że najkorzystniejsze właściwości mechaniczne uzyskuje warstwa wierzchnia materiału, znajdująca się na powierzchni bocznej uzębienia. Pozostała objętość materiału, a w szczególności rdzeń zębów wraz z powierzchnią wierzchołków, odznacza się małym stopniem przekucia oraz stosunkowo jednorodnym rozkładem intensywności odkształcenia. Zatem, obróbka plastyczna na zimno stożkowych kół zębatych proponowanym sposobem umożliwia uzyskanie wyrobu, który charakteryzuje się pożądanymi własnościami użytkowymi.

Dodatkowe porównanie zarysów wypraski w przekrojach poprzecznych C_1 - C_1 , C_2 - C_2 (rys. 4.18c) oraz przekrojach D_1 - D_1 , D_2 - D_2 (rys. 4.18d) wykazuje, że etap kalibracji wypraski w procesie prasowania obwiedniowego odgrywa ważną rolę w uzyskaniu prawidłowego zarysu uzębienia koła stożkowego. Z obliczeń wynika, że zgodność zarysu poprzecznego uzębienia

z zarysem oczekiwanym (rys. 4.3) jest bardzo dobra. Jedynie w przekroju osiowym – tj. wzdłuż zewnętrznej powierzchni walcowej i stożkowej wypraski, występują niewielkie niedokucia. Największe niewypełnienie przez materiał wykroju matrycy występuje w narożach łączących powierzchnie wierzchołków zębów z powierzchnią boczną walcową.

Na kolejnym rys. 4.22 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych dla dwóch odmiennych przypadków kształtowania wypraski. Pierwszym przypadkiem jest proces prasowania obwiedniowego, w którym stempel wykonuje ruch typu (R) – rysunek a, b oraz c. Drugim przypadkiem jest proces, gdzie zastosowano ruch wahający stempla według schematu (S) – pozostałe trzy rysunki. Porównaniu poddano zmianę kształtu siatki koordynacyjnej



Rys. 4.22. Kształt siatki koordynacyjnej dla przekroju osiowego wypraski (a, b, d, e) oraz siatki promieniowej umieszczonej na powierzchni wypraski (e, f), gdy stempel wykonuje ruch wahający (R) – (a, b, c) oraz (S) – (d, e, f); fazy odkształcenia: koniec fazy II, gdy czas $t = 4,12$ s (a, d) oraz koniec fazy kalibracji, gdy czas $t = 6,68$ s (b, c, e, f); pełny opis w tekście

w przekroju osiowym wyrobu, jaką zaobserwowano pod koniec dwóch wybranych faz kształtowania koła stożkowego – tj. fazy II oraz fazy III (kalibracji). Porównano również kształt siatki promieniowej naniesionej na powierzchnię wypraski. Na podstawie tych wyników zauważono jedynie, że gdy stempel wykonuje ruch według schematu (S), stopień wypełnienia wykroju uzębionego matrycy przez materiał jest minimalnie mniejszy. W żadnym z analizowanych przypadków kształtowania wypraski, siatka promieniowa nie doznaje skręcenia, co jest traktowane jako cecha pożądana.

Dodatkowo, na rys. 4.23 przedstawiono rozkład intensywności odkształcenia ε_H w wybranych przekrojach wypraski, który został obliczony dla przypadku, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (S). W porównaniu z wariantem kształtowania wypraski, reprezentowanym przez rys. 4.18, w rozpatrywanym przypadku prasowania obwiedniowego uzyskuje się:

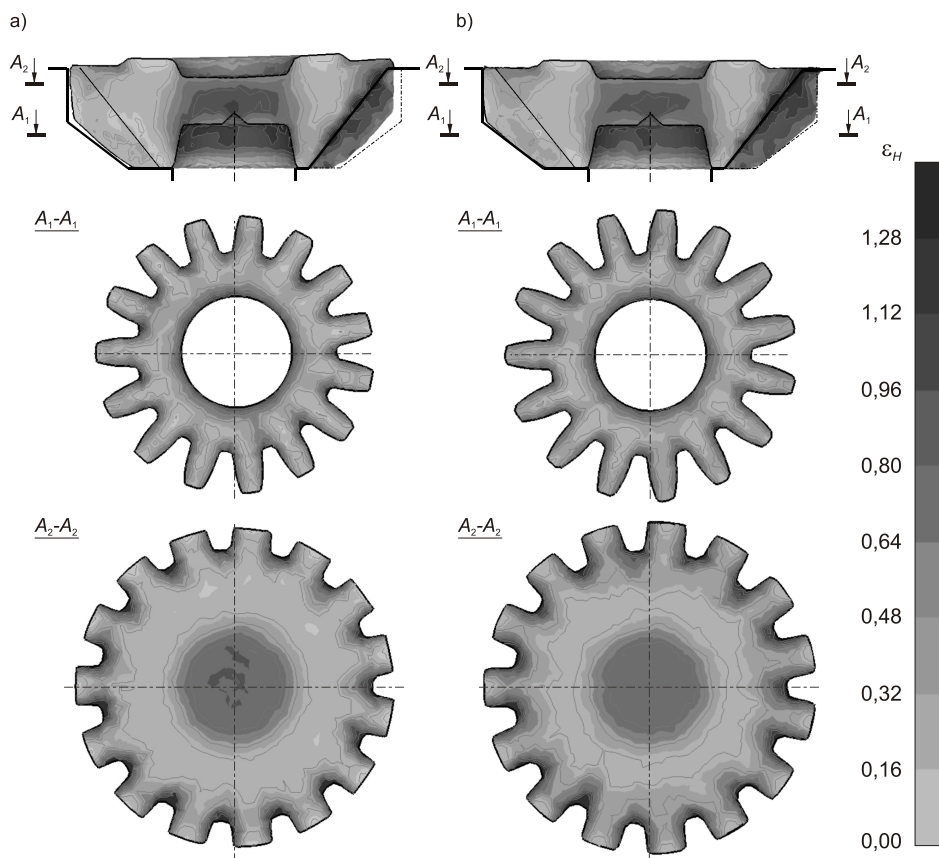
- bardziej jednorodny rozkład intensywności odkształcenia w prawie całej objętości materiału, oprócz strefy denka, które i tak zostanie usunięte w ramach dalszej operacji wykańczającej, np. poprzez dziurowanie;
- mniejsze wartości intensywności odkształcenia w obszarze zębów.

Reasumując, zmiana rodzaju ruchu wahającego stempla, np. ze schematu (R) na schemat (S), w procesie prasowania obwiedniowego stożkowych kół zębatach powoduje, że powierzchnia boczna zębów w wyprasce jest w mniejszym stopniu umocniona – zmiana ta wynosi ok. 25%. Przy czym zaobserwowano, że niezależnie od rodzaju ruchu stempla, względna różnica pomiędzy wartością intensywności odkształcenia, zmierzoną na powierzchni bocznej zęba oraz w jego środkowym przekroju poprzecznym, jest zachowana.

Stan odkształcenia – wariant B oraz C

Rozpatrzmy teraz dwa pozostałe warianty prasowania obwiedniowego wypraski – tj. przy zastosowaniu wsadu B lub C (rys. 4.10b, c). Dla przypomnienia, są to warianty, w których przyjęto, że początkowa średnica części walcowej wsadu wynosi odpowiednio $\varnothing 55$ mm lub $\varnothing 60$ mm. Przy czym, schemat ruchu narzędzi oraz ich prędkość są takie same jak w wariantcie prasowania obwiedniowego, który omówiono w poprzedniej części tego podrozdziału – tj. stempel wykonuje ruch wahający (R).

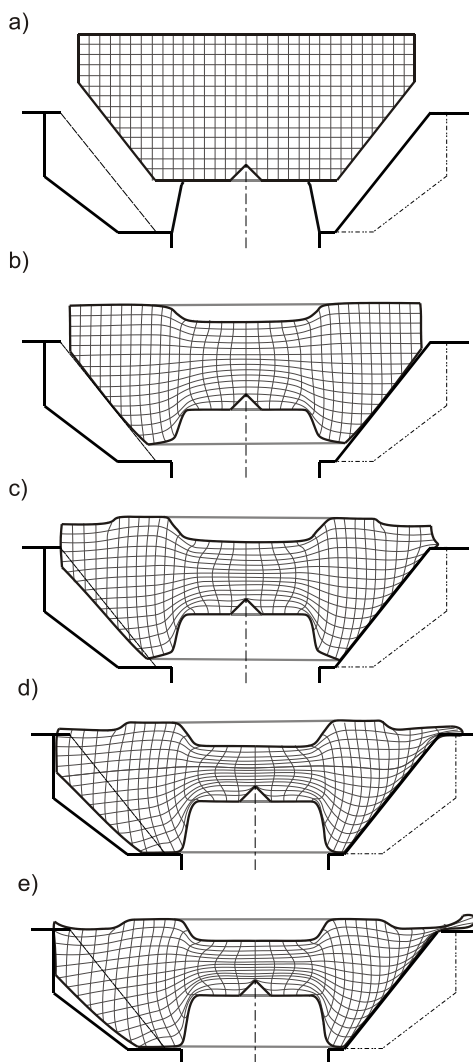
Z uwagi na różną wysokość wsadu, czas kształtowania wypraski (bez uwzględniania fazy kalibracji) wynosi odpowiednio $t = 3,64$ sekundy dla przypadku II (użycie wsadu B) lub $t = 3,41$ sekundy dla przypadku III (uży-



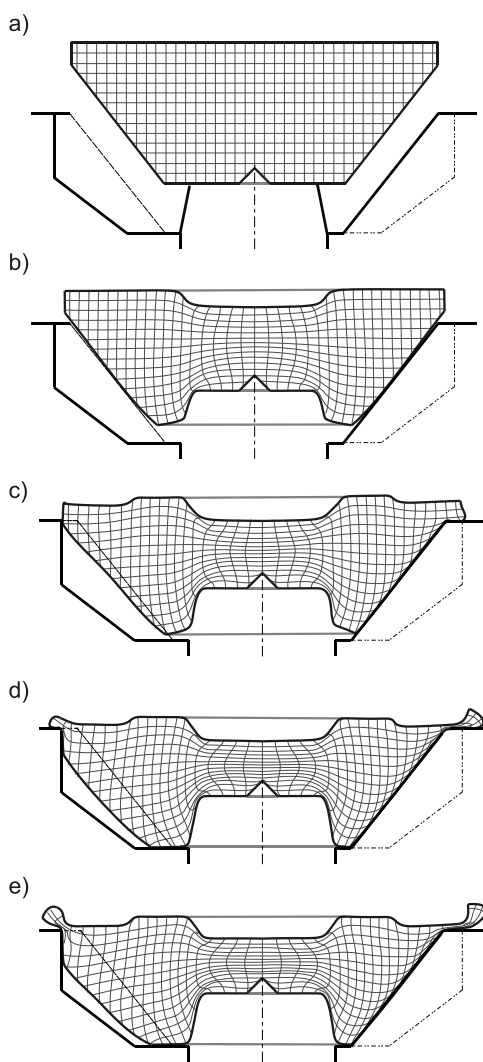
Rys. 4.23. Rozkład intensywności odkształcenia ϵ_H w wybranych przekrojach osiowych i poprzecznych wypraski, gdy stempel wykonuje ruch według schematu (S); etapy prasowania wg wariantu A: a) koniec fazy II, b) koniec kalibracji

cie wsadu C). Przy czym, symulacja omawianych wariantów procesu kształtowania przedmiotowej wypraski obejmowała również etap kalibracji.

Na rys. 4.24 oraz rys. 4.25 przedstawiono zmianę kształtu siatki koordynacyjnej, naniesionej na przekroje osiowe wypraski, dla czterech etapów procesu prasowania obwiedniowego. Na podstawie tych wyników stwierdza się, że zmiana średnicy początkowej wsadu nie wpływa na zasadniczy charakter przebiegu kształtowania wyrobu. We wszystkich przypadkach procesu



Rys. 4.24. Kształt siatki koordynacyjnej dla przekroju poprzecznego wypraski uzyskanej ze wsadu B ($\varnothing 55$ mm) wraz z zarysem narzędzi dolnych; kolejne fazy prasowania: a) początek procesu, b) koniec fazy I, c) połowa fazy II, d) koniec fazy II, e) koniec kalibracji



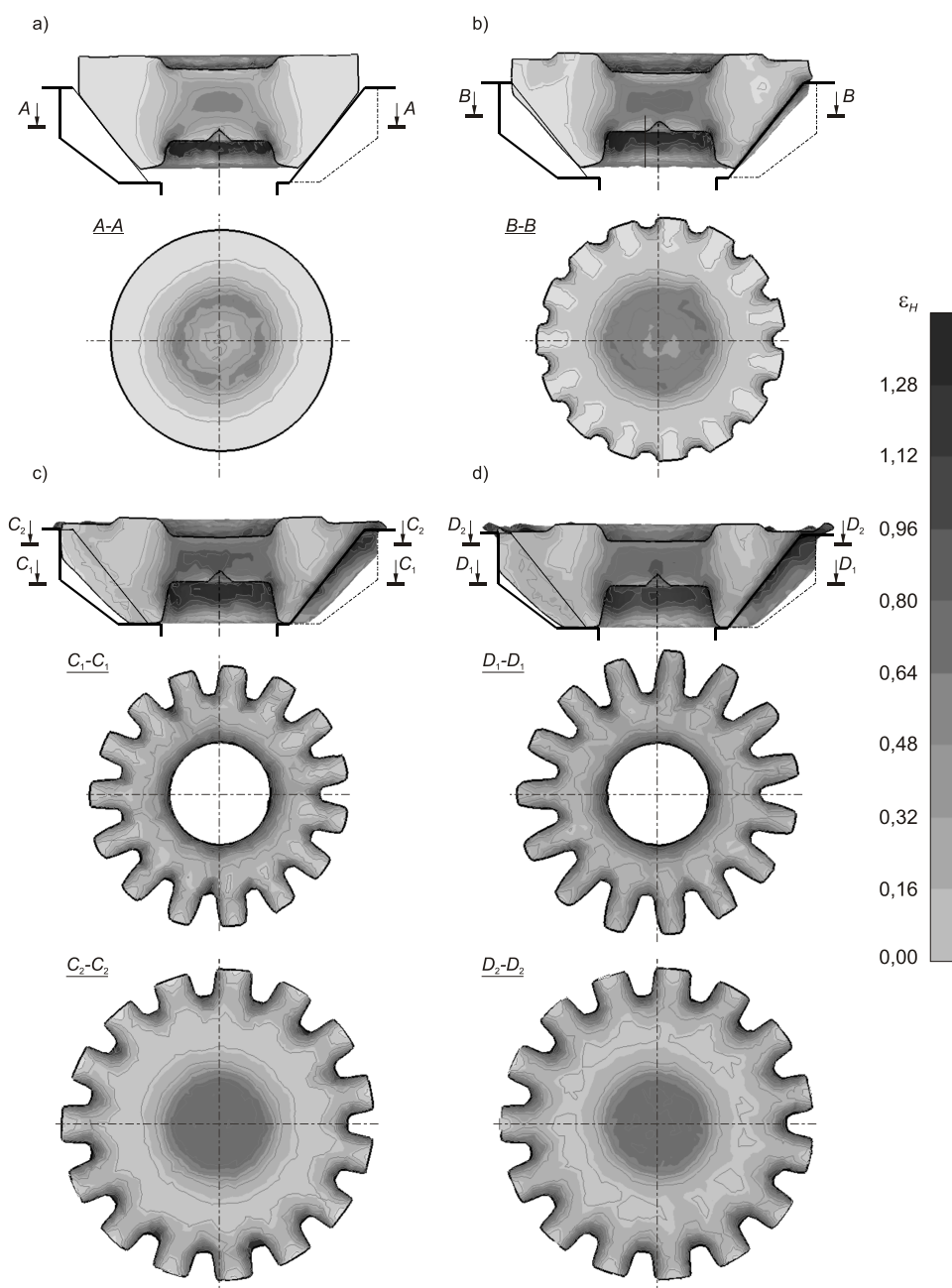
Rys. 4.25. Kształt siatki koordynacyjnej dla przekroju poprzecznego wypraski uzyskanej ze wsadu C ($\varnothing 60$ mm) wraz z zarysem narzędzi dolnych; kolejne fazy prasowania: a) początek procesu, b) koniec fazy I, c) połowa fazy II, d) koniec fazy II, e) koniec kalibracji

kształtowania można wyróżnić takie same fazy. Natomiast powstałe nieliczne różnice w przebiegu procesu prasowania, wywołane zmianą średnicy, pojawiają się tylko w fazie II. Wykazano również, że zastosowanie średnicy wsadu większej niż $\varnothing 50$ mm (stanowiącej więcej niż 80% średnicy wyrobu) prowadzi do wystąpienia niewypełnienia wykroju uzębionego matrycy. Uzyskane zęby w kole stożkowym mają mniejszą wysokość, a znacząca ilość materiału jest wyciskana do wypłytki, znajdującej się pomiędzy powierzchnią czołową matrycy dolnej a stemplem. Na podstawie rys. 4.24c i rys. 4.25c stwierdza się, że bezpośrednim powodem niewypełnienia wykroju uzębionego, w rozpatrywanych wariantach prasowania obwiedniowego, jest zbyt wczesne tworzenie się wspomnianej wypłytki. W przypadku wariantu A (rys. 4.17) – wypływka tworzy się dopiero pod koniec fazy II, względnie w czasie kalibracji wypraski, podczas gdy w przypadku prasowania obwiedniowego według wariantu B lub C, wypływka powstaje już w połowie drugiej fazy kształtowania wypraski.

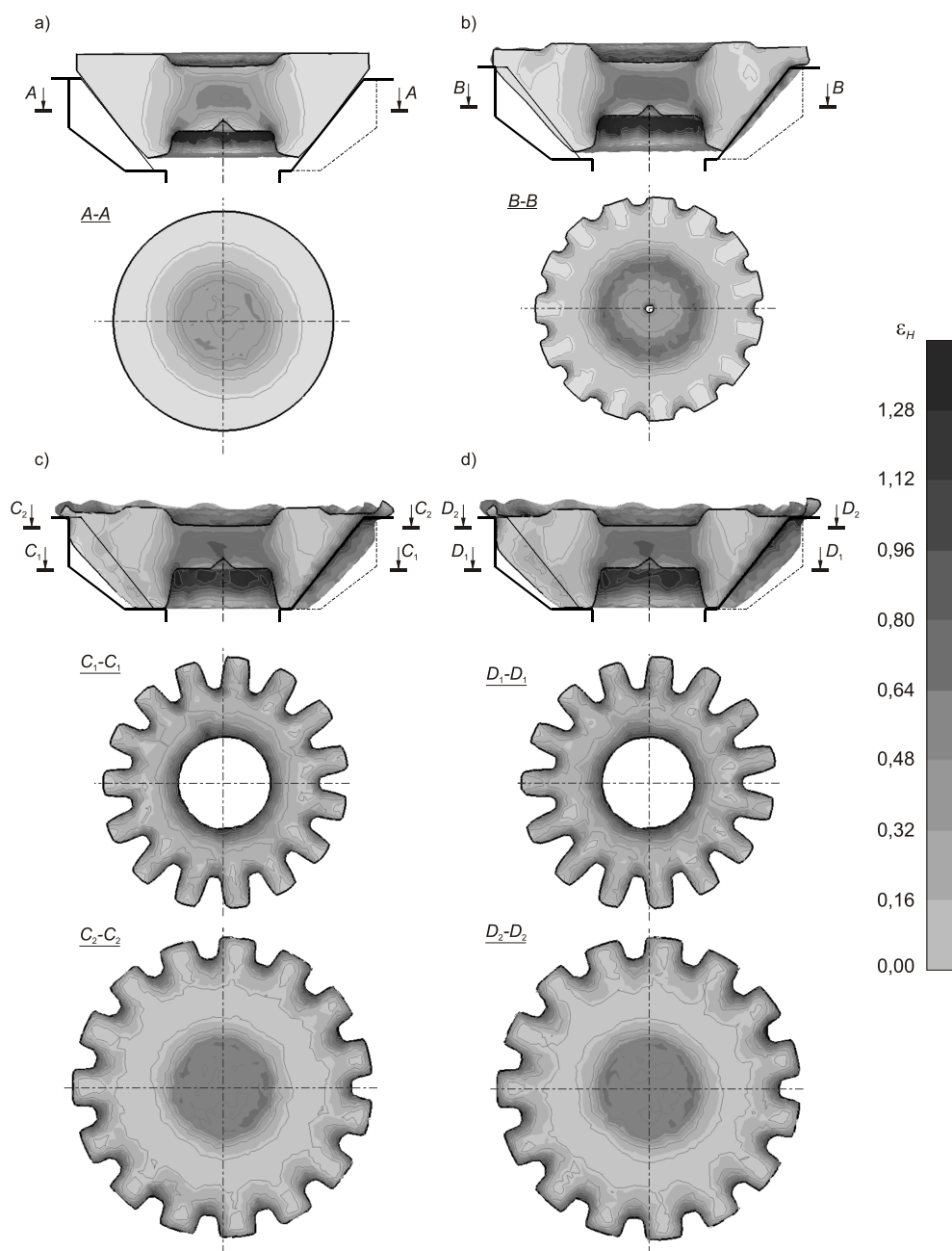
Zatem, w odróżnieniu od pierwszego wariantu kształtowania wypraski, zastosowanie fazy kalibracji w wariacie drugim i trzecim procesu nie powoduje znaczącego polepszenia stopnia wypełnienia wykroju uzębionego. Zatem można stwierdzić, że faza III powoduje jedynie zapewnienie:

- uzyskania wymaganej (oczekiwanej) średnicy zewnętrznej wypraski;
- właściwej wysokości wypraski – poprzez zmniejszenie „falistości” jej powierzchni czołowej, odwzorowywanej bezpośrednio przez powierzchnię roboczą stempla.

Na kolejnych rys. 4.26 oraz rys. 4.27 umieszczono rozkłady intensywności odkształcenia ε_H , które obliczone dla wybranych przekrojach wypraski kształtowanej ze wsadu B lub C (rys. 4.10). Wyniki te są uzupełnieniem informacji pokazanych na wcześniejszych dwóch rysunkach 4.24 i 4.25. Ich analiza pozwala przypuszczać, że we wszystkich omawianych wariantach procesu prasowania obwiedniowego wypraski typu stożkowe koło zębate (różniących się jedynie wymiarami przedkuwki) uzyskuje się jednakowy charakter rozkładu badanego parametru. Stwierdzono jednocześnie, że wraz ze wzrostem średnicy części walcowej wsadu, ekstremalne wartości intensywności odkształceń materiału maleją – przy czym, według autora powód wystąpienia tego zjawiska nie sprowadza się tylko do aspektu zmniejszenia wysokości przedkuwki. Niemniej jednak, zaobserwowany efekt jest pożądany z uwagi na fakt, że proces kształtowania wyrobu jest realizowany na zimno i występuje zjawisko umocnienia materiału. Dla omawianych dwóch



Rys. 4.26. Rozkład intensywności odkształcenia ε_H w przekrojach osiowych i poprzecznych wypraski uzyskanej z wsadu B (rys. 4.10); etapy prasowania: a) koniec fazy I, b) połowa fazy II, c) koniec fazy II, d) koniec kalibracji



Rys. 4.27. Rozkład intensywności odkształcenia ε_H w przekrojach osiowych i poprzecznych wypraski uzyskanej z wsadu C (rys. 4.10); etapy prasowania: a) koniec fazy I, b) połowa fazy II, c) koniec fazy II, d) koniec kalibracji

wariantów prasowania obwiedniowego przedmiotowej wypraski w tej części podrozdziału, obliczone wartości ε_H są na podobnym poziomie, jaki uzyskano podczas kształtowania wypraski, gdy zastosowano ruch wahający stempla zgodny ze schematem (S) oraz wsad A o średnicy charakterystycznej d wynoszącej 50 mm.

Podsumowując przeprowadzoną analizę płynięcia materiału można sformułować następujący (drugi) wniosek. W zależności od wymiarów przedkuwki, prawidłowy przebieg procesu prasowania obwiedniowego wypraski typu stożkowe koło zębate może być zakłócony trzema podstawowymi zjawiskami, tj.:

- zbyt wczesne tworzenie się wypłytki,
- niewypełnienie przez materiał wykroju uzębionego matrycy,
- nadmierne umocnienie materiału i utrata jego plastyczności w wyniku przekroczenia dopuszczalnych wartości odkształcenia.

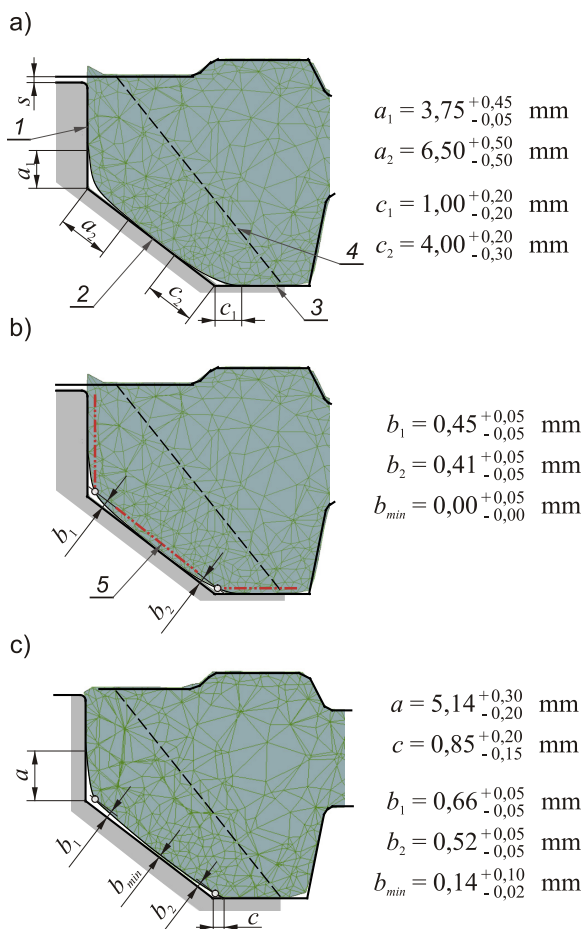
Ponadto, można przyjąć założenie, że jeżeli kąt powierzchni stożkowej przedkuwki jest taki sam jak kąt stożka wierzchołków uzębienia wypraski, podstawowym parametrem geometrycznym, który określa stabilność procesu prasowania omawianego tego typu wypraski, jest stosunek wymiarów d/D – patrz równanie (4.2). Dla przypomnienia, d jest średnicą walcowej części wsadu (zgodnie z rys. 4.10, są to np. wymiary $\varnothing 50$, $\varnothing 55$ lub $\varnothing 60$ mm), natomiast D reprezentuje największą średnicę wypraski (według rys. 4.3 – $\varnothing 65,5$ mm).

Ocena wypełnienia wykroju uzębionego przez materiał

Porównanie zarysu powierzchni wierzchołków stożkowego koła zębatego z zarysem wykroju uzębionego narzędzia, w płaszczyźnie osiowej wypraski, przedstawiono na rys. 4.28. Wybrana płaszczyzna jest jednocześnie przekrojem środkowym zęba. Prezentowane wyniki symulacji numerycznej dotyczą pierwszego wariantu procesu prasowania obwiedniowego wypraski, która jest wykonywana ze wsadu A (rys. 4.10a). Rysunek 4.28a oraz rysunek 4.28b reprezentują przypadek kształtowania wyrobu, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R). Natomiast na rys. 4.28c pokazano wyniki obliczeń, jakie uzyskano w przypadku, kiedy narzędzie waha się zgodnie ze schematem (S). Linie oznaczone cyframi 1, 2 i 3 reprezentują zarys wykroju uzębionego w matrycy (tj. powierzchnię wierzchołków zęba). Cyfra 4 wskazuje linię zarysu powierzchni podstaw, natomiast linia przerywana 5 pokazuje hipote-

tyczny zarys zęba wypraski, jaki można uzyskać po mechanicznym usunięciu powstałych wad niedokucia (niedoprasowania).

Zaobserwowanym zjawiskiem, dotyczącym rozpatrywanego procesu kształtowania wypraski, jest tzw. niedokucie (niedoprasowanie), które nie pozwala uzyskać uzębienia o oczekiwanym zarysie. Do celów analizy wyników obliczeń wprowadzono stopień niedoprasowania, który opisano ilościowo za pomocą parametrów a , b oraz c . Są to wartości średnie, obliczone na podstawie symulacji MES. Dodatkowo, dla tych wymiarów podano odchyłki od wartości średniej. Wymiary a_1 , a_2 dotyczą strefy materiału znajdującego się przy narożu utworzonym przez krawędzie 1 i 2 (rys. 4.28). Parametry c_1 , c_2 opisują obszar niedoprasowania zlokalizowany w otoczeniu naroża, w którym łączą się krawędzie 2 i 3. Natomiast wymiary b_1 , b_2 oraz b_{min}



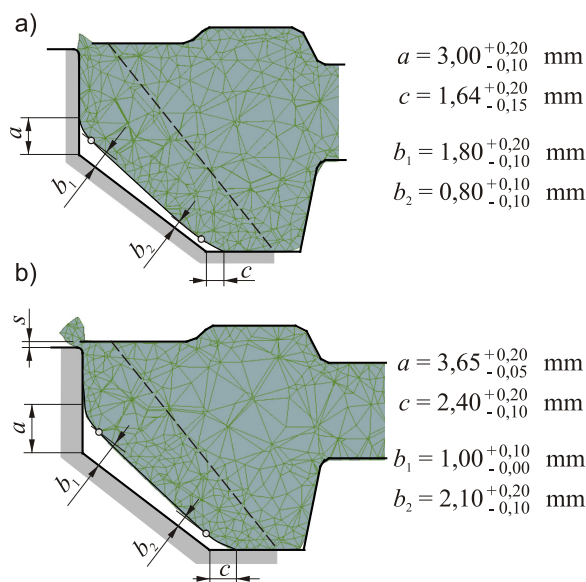
Rys. 4.28. Porównanie zarysu powierzchni wierzchołków uzębienia z zarysem wykroju narzędzia w przekrój osiowym; gdzie: s – szczelina (0,5 mm), tj. odległość pomiędzy powierzchnią czołową stempla a matrycą dolną; a , b , c – parametry określające wielkość niedoprasowania materiału; pełny opis w tekście

wyrażają odległość zarysu powierzchni wierzchołków zębów wypraski od krawędzi matrycy, oznaczonej cyfrą 2. Wymiary te określają również zmniejszenie wysokości zęba w stosunku do wartości oczekiwanej.

Na kolejnym rysunku 4.29 umieszczono wyniki symulacji, które dotyczą wariantów B i C procesu prasowania obwiedniowego wypraski, w których użyto przedkuwek o różnej średnicy początkowej. Przedstawione na tym rysunku wyniki dotyczą procesu, w którym stempel wykonuje ruch wahający zgodny ze schematem typu (R). Umieszczone na rysunku oznaczenia oraz parametry mają takie same znaczenie jak na poprzednim rys. 4.28.

Zaobserwowano, że największy stopień niewypełnienia wykroju matrycy przez materiał dotyczy strefy znajdującej się w otoczeniu naroża utworzonego przez krawędzie narzędzia o numerze 1 i 2. Wraz ze „zbliżaniem się” do krawędzi nr 3 (wzdłuż linii reprezentującej zarys wypraski), stopień niedoprasowania zmniejsza się. Wynika to z faktu, że obliczona MES powierzchnia wierzchołków jest „wypukła” Ponadto za-

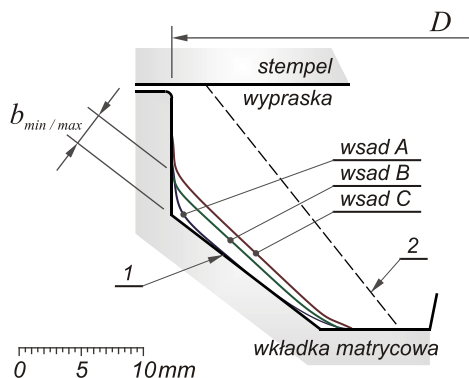
uważano, że zastosowanie fazy kalibracji wypraski ma bardzo znaczący wpływ na wielkość niedokucia. Zbyt krótki czas trwania tego zabiegu powoduje, że nawet dla wariantu A, przedstawionego na rys. 4.28a, w skrajnych przypadkach można było zaobserwować powstawanie szczeliny pomiędzy zarysem powierzchni wierzchołków uzębienia wypraski, a odpowiednią krawędzią narzędzia (nr 2). Szczelna ta jest określona parametrem b_{min} , którego wartość, w tym szczególnym przypadku, jest większa od zera.



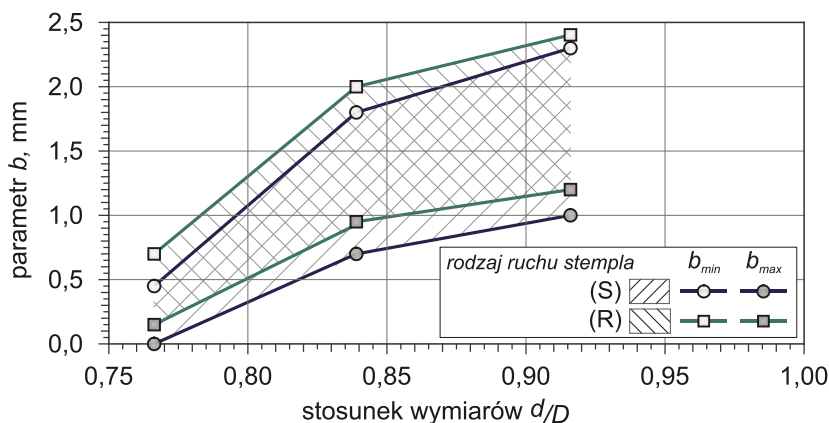
Rys. 4.29. Przekrój osiowy zęba wypraski uzyskanej ze wsadu B (a) oraz wsadu C (b), gdy stempel wykonywał ruch typu (R) oraz porównanie zarysu powierzchni wierzchołków z zarysem wykroju matrycy

Analiza wyników obliczeń numerycznych wykazała, że najkorzystniejszy zarys powierzchni wierzchołków zębów wypraski uzyskuje się w procesie, w którym stosuje się ruch wahający stempla według schematu (R), a wypraska jest wykonywana ze wsadu A (rys. 4.10a) – tj. o średnicy d części walcowej wynoszącej 50 mm. Zgodnie z rys. 4.28b, zastosowanie obróbki mechanicznej, polegającej na usunięciu warstwy materiału zgodnie z linią przerywaną 5, zapewnia uzyskanie wyrobu finalnego cechującego się bardzo dobrymi cechami geometrycznymi. Uważa się, że warstwa materiału, którą należałoby usunąć po procesie prasowania obwiedniowego, powinna mieć grubość nie większą niż $0,40 \div 0,55$ mm.

Wpływ zwiększenia średnicy charakterystycznej d wsadu na ostateczny kształt zarysu powierzchni wierzchołków oraz na stopień wypełnienia wykroju uzębionego matrycy przez materiał przedstawiono na dwóch kolejnych rysunkach – tj. rys. 4.30 oraz rys. 4.31. Według autora, główną przyczyną niedoprasowania w przypadku, gdy wypraska jest wykonywana ze wsadu o stosunkowo dużej średnicy charakterystycznej jest powstawanie nadmiernej wypłytki pomiędzy stemplem a powierzchnią czołową narzędzia dolnego. Można uznać, że jeśli wartość parametru d/D (zdefiniowanego jako stosunek średnicy wsadu do średnicy wypraski) zbliża się do jedności, to stopień niedoprasowania wzrasta. Podsumowując analizę płynięcia materiału stwierdzono również, że uzyskanie możliwie najlepszego stopienia wypełnienia wykroju matrycy przez materiał jest możliwe, gdy proces prasowania obwiedniowego stożkowego będzie realizowany w następujący sposób:



Rys. 4.30. Porównanie kształtu zarysu powierzchni wierzchołków zębów wypraski, którą uzyskano ze wsadu o różnej średnicy charakterystycznej d (zgodnie z rys. 4.10, średnica d wynosi $\varnothing 50$, $\varnothing 55$ lub $\varnothing 60$ mm) w procesie prasowania obwiedniowego, gdy stempel wykonuje ruch obwiedniowy (R);
 $b_{min/max}$ – parametr określający niedoprasowanie,
 D – średnica wypraski ($\varnothing 65,5$ mm)



Rys. 4.31. Wpływ zmiany średnicy charakterystycznej wsadu d na wartość parametru b , określającego niepodrasowanie uzębienia – oznaczenia są zgodne z rys. 4.30

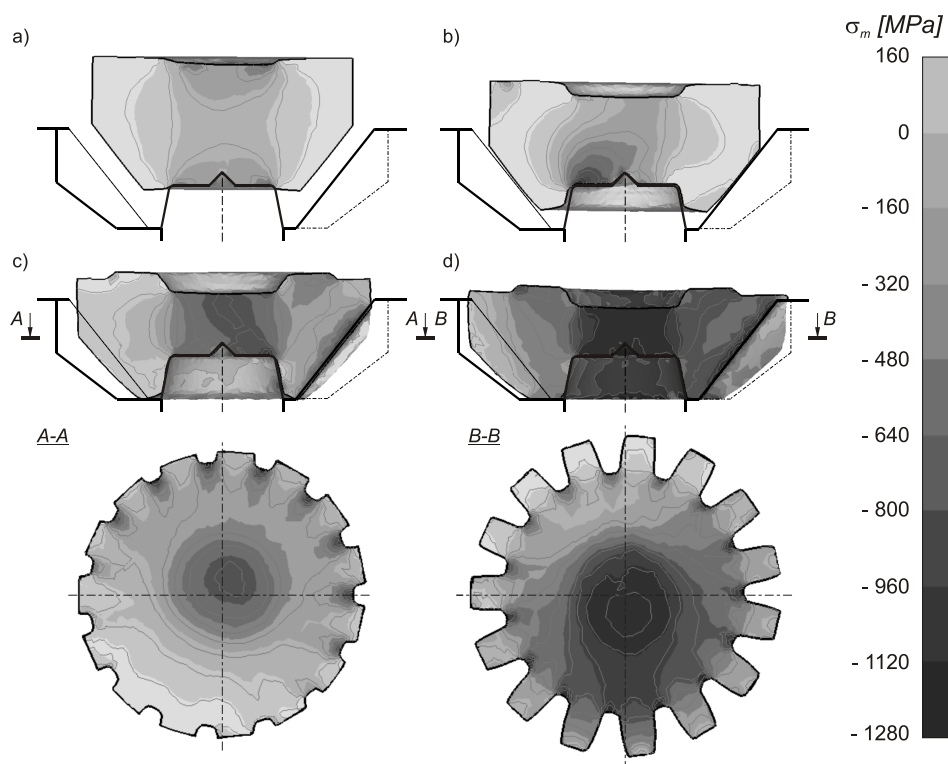
- stempel powinien wykonywać ruch wahający według schematu (R) – tj. tzw. „po krzywej wielolistnej”;
- średnica charakterystyczna wsadu powinna być dobrana w ten sposób, aby stosunek d/D był zawarty w przedziale od 0,76 do 0,78;
- czas fazy kalibracji wypraski powinien wynosić równowartość jednego lub dwóch cykli ruchu wahającego narzędzia.

Prasowanie obwiedniowe tego typu wyprasek, przy zastosowaniu ruchu wahającego stempla typu (S) jest możliwe tylko i wyłącznie, gdy wartość stosunku d/D jest dostatecznie mała. Wybór takiego rozwiązania technologicznego jest uzasadniony w przypadku, gdy chce się uzyskać obniżenie wymaganej pracy odkształcenia plastycznego oraz mniejszy stopień odkształcenia wypraski (patrz wniosek podany w podrozdziale 4.4.1). Ponadto, podczas projektowania procesu technologicznego należy uwzględnić ewentualne niedokucia wypraski na wysokości uzębienia. Zgodnie z rysunkiem 4.31, w przypadku kształtowania wyprasek typu stożkowe koło zębate, wysokość uzębienia powinna być większa o około 2 mm.

4.4.3. Analiza parametrów naprężeniowych w wyprasce

Naprężenie średnie

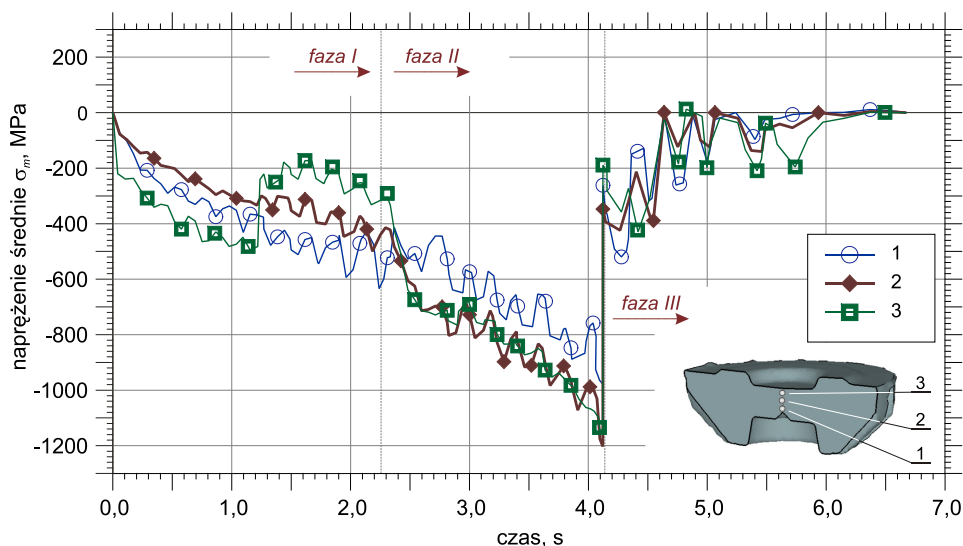
Przykładowy rozkład naprężenia średniego σ_m pokazano na rys. 4.32. Obliczono go dla wybranych przekrojów wypraski, która jest prasowana obwiedniowo ze wsadu A (zgodnie z rys. 4.10, średnica charakterystyczna $d = 50$ mm), a proces kształtowania przebiega w warunkach, w których stempel wykonuje ruch wahający według schematu (R). Należy podkreślić, że przedstawiony rozkład obrazuje jedynie ogólny charakter naprężenia średniego. Niemniej jednak, można z powodzeniem wskazać, że w centralnej części wypraski naprężenie σ_m ma wartość ujemną, co oznacza, że w tej stre-



Rys. 4.32. Rozkład naprężenia średniego σ_m w przekrojach osiowych i poprzecznych wypraski uzyskanej ze wsadu A (rys. 4.10), gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R); etapy prasowania: a) 28% fazy I, b) koniec fazy I, c) 61% fazy II, d) koniec fazy II

fie materiału panuje korzystny stan naprężenia. Potwierdzeniem tego są wyniki szczegółowe, umieszczone w formie wykresu na kolejnym rysunku 4.33. Wykres ten przedstawia historię zmiany naprężenia średniego, wyznaczoną w wybranych trzech punktach. Jedynie dla punktu środkowego 2, zmiana tego parametru ma ogólny charakter liniowy, a jego wartość bezwzględna wzrasta wraz z postępem procesu kształtowania wypraski. Stwierdzając to, autor oczywiście pomija charakterystyczny oscylacyjny przebieg wykresu, który wynika z faktu, że narzędzie górne wykonuje ruch wahający typu (R).

Interesująco przedstawia się zmiana naprężenia średniego, wyznaczonego w punktach skrajnych – zgodnie z rys. 4.33 są to punktu oznaczone cyframi 1 oraz 3. Przebieg zmiany σ_m zaobserwowany dla punktu 3, który zlokalizowany jest tuż przy powierzchni styku stempla z wypraską, można uznać za szczególnie charakterystyczny dla rozpatrywanego procesu technologicznego. Biorąc pod uwagę wyniki umieszczone na rys. 4.32b można wnioskować, że na zaobserwowany charakter zmiany naprężenia średniego ma bezpośredni wpływ wahający ruch stempla – wywołuje on zmienny, niejednorodny rozkład badanego parametru w czasie. Natomiast w momencie zatrzymania

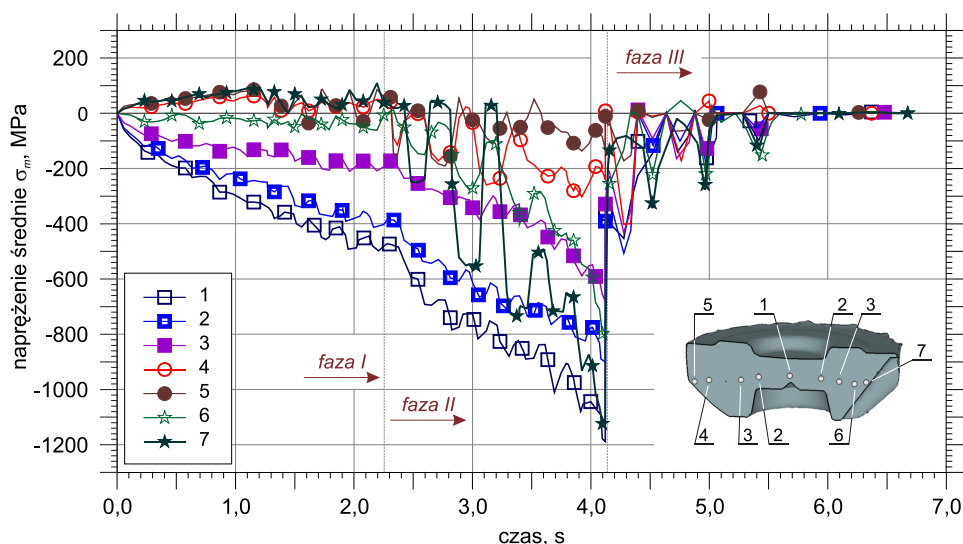


Rys. 4.33. Historia zmiany naprężenia średniego σ_m w charakterystycznych punktach rozlokowanych wzdłuż osi wypraski – prasowanie obwiedniowe wypraski ze wsadu A, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R); opis w tekście

ruchu postępowego narzędzi dolnych (matrycy i wyrzutnika), co jest jednoznaczne z rozpoczęciem fazy kalibracji, następuje stopniowe zanikanie naprężenia w wyprase. Wyniki takie są zgodnie z teorią sprężystości i plastyczności [43] – tj. zanik obciążenia zewnętrznego powoduje również zanik sił wewnętrznych, których miarą intensywności jest naprężenie.

Na kolejnym rysunku 4.34 przedstawiono historię zmiany naprężenia średniego σ_m wyznaczoną dla punktów rozmieszczonych wzdłuż promienia wypraski. Analiza tych wykresów wykazuje, że obwiedniowy ruch narzędzia ma znaczący wpływ na ogólny charakter rozkładu naprężenia średniego również, gdy rozpatruje się go w kierunku promieniowym. Ponadto, można stwierdzić, że strefy materiału znajdujące się bezpośrednio pomiędzy stemplem a narzędziem dolnym (wykonującym ruch dosuwowy), odkształcają się w sposób korzystny, a powstające w niej naprężenie średnie ma wartość ujemną (tj. pożądaną).

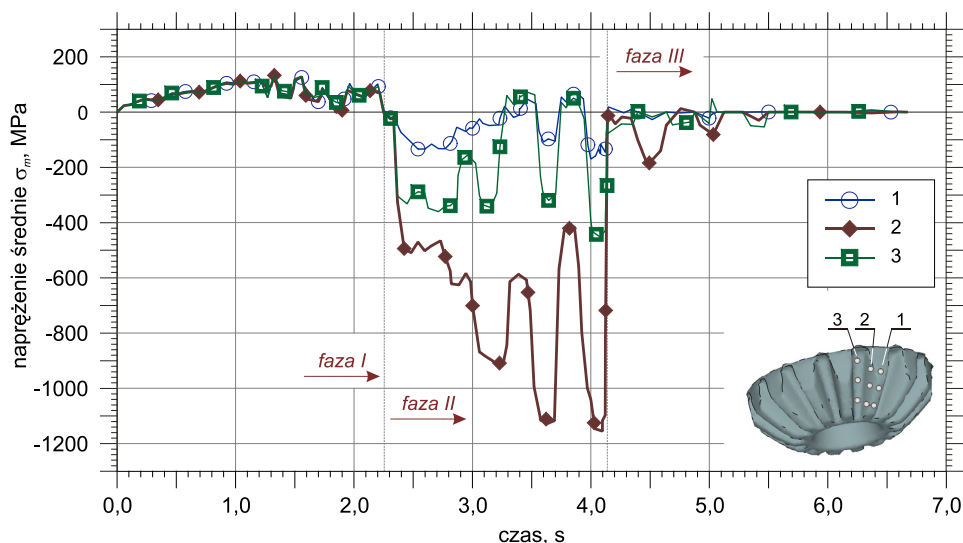
Natomiast obszary materiału, które bezpośrednio graniczą z powierzchnią swobodną wypraski, są niestety narażone na występowanie ewentualnych pęknięć w trakcie prasowania obwiedniowego. Zgodnie z rys. 4.34 (rozpatru-



Rys. 4.34. Historia zmiany naprężenia średniego σ_m w charakterystycznych punktach umieszczonych wzdłuż promienia wypraski – prasowanie obwiedniowe wypraski ze wsadu A, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R); opis w tekście

jąc punkty o numerach od 4 do 7) oraz z rysunkiem 4.35, w trakcie pierwszej fazy prasowania obwiedniowego, we wspomnianych obszarach materiału uzyskano naprężenie średnie mające wartość dodatnią. Natomiast już w fazie II procesu, gdy jest kształtowane uzębienie, sytuacja się zmienia. Naprężenie średnie osiąga wartości dodatnie tylko dla tych stref materiału, które graniczą z powierzchnią wierzchołków oraz powierzchnią boczną zębów – ale tylko wtedy, gdy te powierzchnie tracą kontakt z narzędziem. Stąd można wysunąć wniosek, że podczas prasowania obwiedniowego wyprasek typu stożkowe koło zębate, istnieje prawdopodobieństwo powstania ewentualnych pęknięć materiału w końcowym etapie drugiej fazy kształtowania, ale tylko na powierzchni wierzchołków.

Natomiast charakter zmiany naprężenia średniego w wyprasce, który zaobserwowano w fazie III (tj. podczas kalibracji), sugeruje, aby ten etap procesu trwał możliwie najkrócej. Powodem takiej sugestii jest tendencja do występowania w niektórych obszarach materiału niekorzystnego stanu naprężenia z punktu widzenia ewentualnych pęknięć.



Rys. 4.35. Historia zmiany naprężenia średniego σ_m wyznaczonego na podstawie trzech wybranych punktów, umieszczonych na powierzchniach wierzchołków (1), bocznej (2) i podstaw (3) uzębienia wypraski – prasowanie obwiedniowe wypraski ze wsadu A, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R); opis w tekście

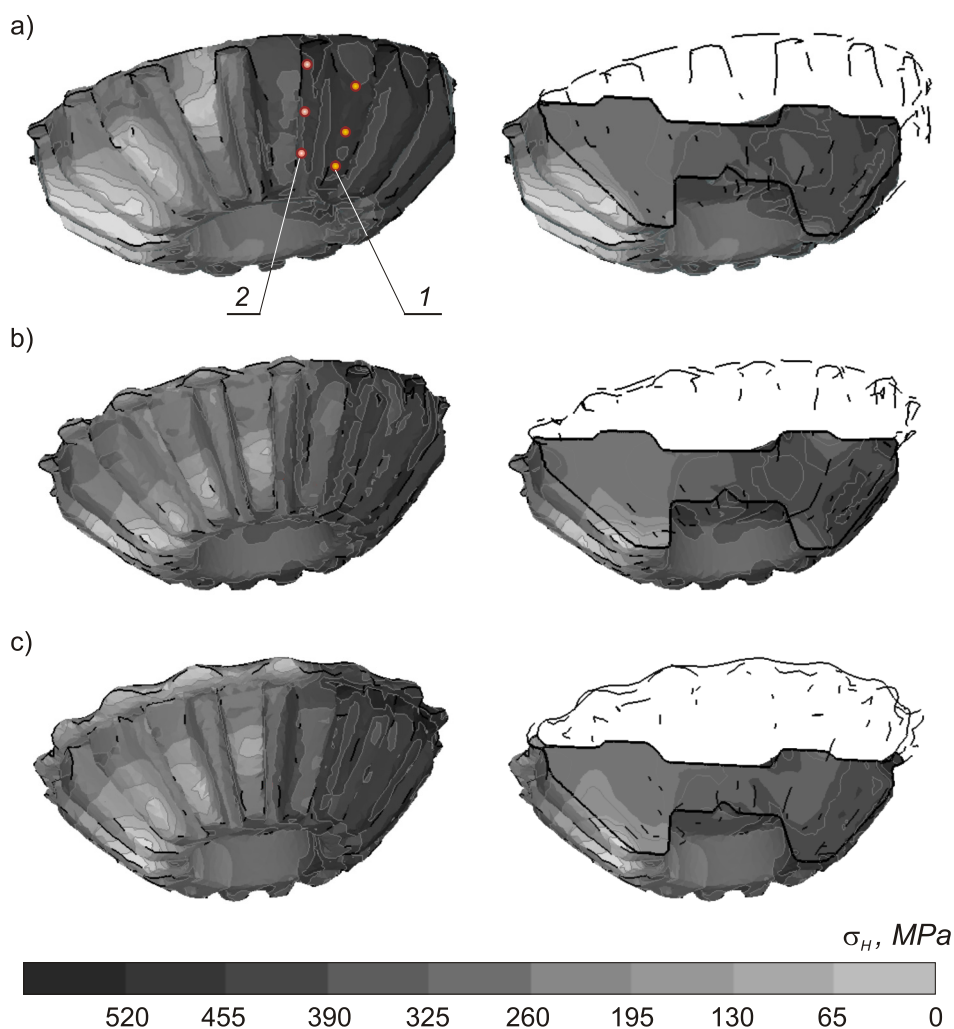
Intensywność naprężenia

Rozpatrzmy dodatkowo charakter intensywności naprężenia σ_H , jaki wyznaczono w wypraszce podczas jej prasowania obwiedniowego. Prezentowane wyniki obliczeń MES uzyskano przyjmując, że wypraska jest wykonywana ze wsadu A, B lub C (rys. 4.10), a ruch wahający narzędzia jest zgodny ze schematem (R). Na rys. 4.36 pokazano typowy rozkład intensywności naprężenia σ_H , który wyznaczono dla końcowego etapu kształtowania wypraski – jest to około 93 % zaawansowania fazy II procesu.

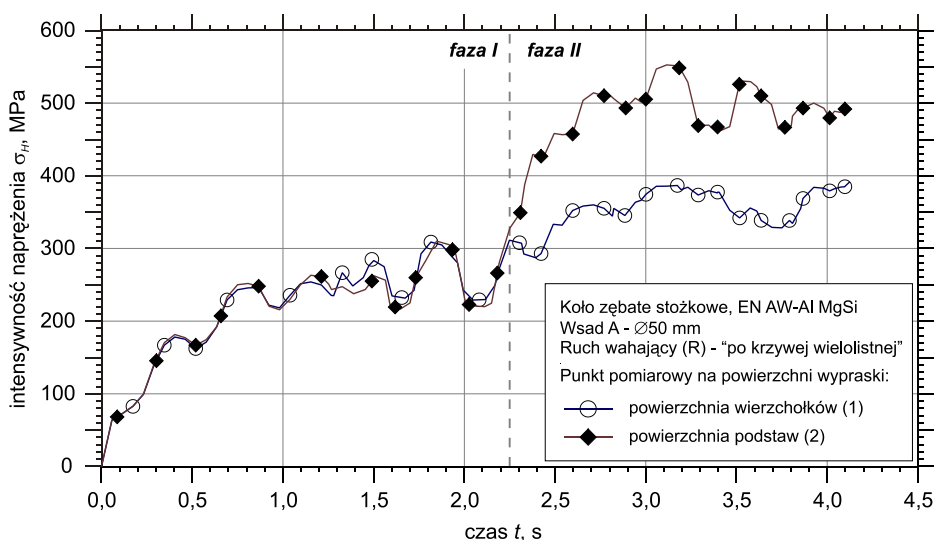
Szczegółowa analiza wyników pokazanych na wspomnianym rysunku wykazuje, że największe wartości naprężenia σ_H są osiągane jedynie w tych strefach wypraski, które znajdują się w obszarze bezpośredniego oddziaływania powierzchni roboczej narzędzi. Obliczone wartości przekraczają poziom 500 MPa. Niestety, można wskazać również występowanie stref materiału, gdzie intensywność naprężenia σ_H jest znacznie mniejsza od wartości maksymalnej. Oznacza to, że rozkład badanego parametru wykazuje dużą niejednorodność. Największy stopień zróżnicowania wartości σ_H , zaobserwowano w obszarach użębienia wypraski.

Na kolejnym rys. 4.37 przedstawiono historię zmiany intensywności naprężenia σ_H (obliczonej jako średnia wartość z trzech punktów), dla dwóch charakterystycznych powierzchni użębienia wypraski – tj. powierzchni wierzchołków (1) oraz podstawy (2). Wykres ten dotyczy wariantu procesu prasowania obwiedniowego, w którym zastosowano ruch wahający narzędzia zgodny ze schematem (R), a wypraska jest wykonywana ze wsadu A (rys. 4.10a). Znaczące różnice w wartościach σ_H pojawiają się dopiero podczas realizacji fazy II procesu. Okazuje się, że powierzchnia podstaw zębów jest miejscem, w którym naprężenie σ_H osiąga największe wartości. Natomiast na rys. 4.38 pokazano porównanie wpływu zmiany wymiarów materiału wsadowego na przebieg zmiany naprężenia σ_H , które obliczono dla powierzchni podstaw użębienia. Wynika z niego, że wymiary wsadu nie mają istotnego wpływu na zmianę intensywności naprężenia. Takie stwierdzenie można również rozszerzyć na kwestię zmiany rodzaju ruchu wahającego stempla.

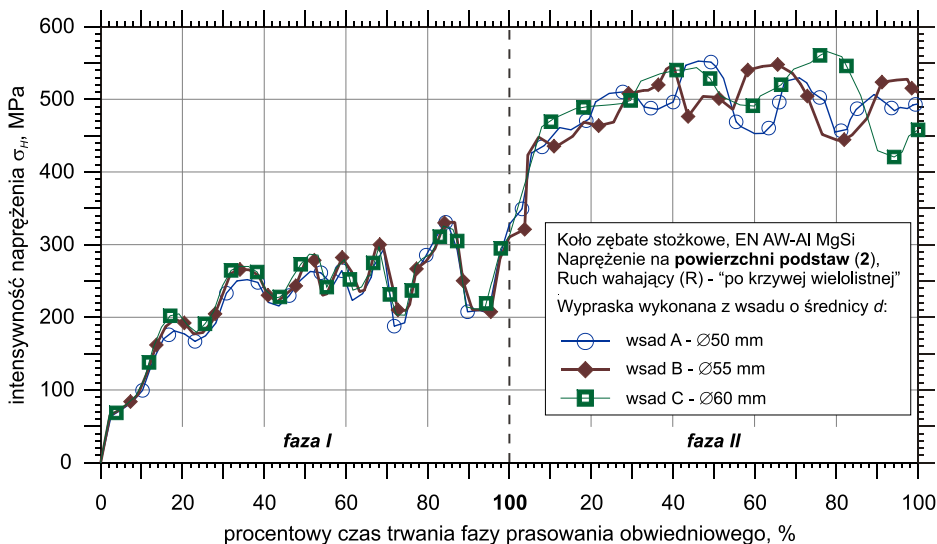
Reasumując, na podstawie uzyskanych wyników obliczeń MES, można sformułować następujący wniosek. W procesie prasowania obwiedniowego kół stożkowych, nie zależnie od wymiarów wsadu i rodzaju ruchu stempla, w obrębie kształtowanego użębienia powstaje stan naprężenia (zmieniający się oscylacyjnie), który negatywnie wpływa na żywotność narzędzi.



Rys. 4.36. Rozkład intensywności naprężenia σ_H wyznaczony w wyprasce kształtowanej ze wsadu A (a), wsadu B (b) oraz wsadu C (c), gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R); rysunek po prawej stronie przedstawia środkowy przekrój osiowy wypraski; punkty 1 i 2 reprezentują miejsca pomiarowe – odpowiednio na powierzchni wierzchołków oraz powierzchni dna uzębienia; opis w tekście



Rys. 4.37. Historia zmiany intensywności naprężenia σ_H wyznaczonego na podstawie trzech wybranych punktów, umieszczonych na powierzchni wierzchołków (1) oraz powierzchni podstaw (2) użębienia wypraski (rys. 4.36); opis w tekście

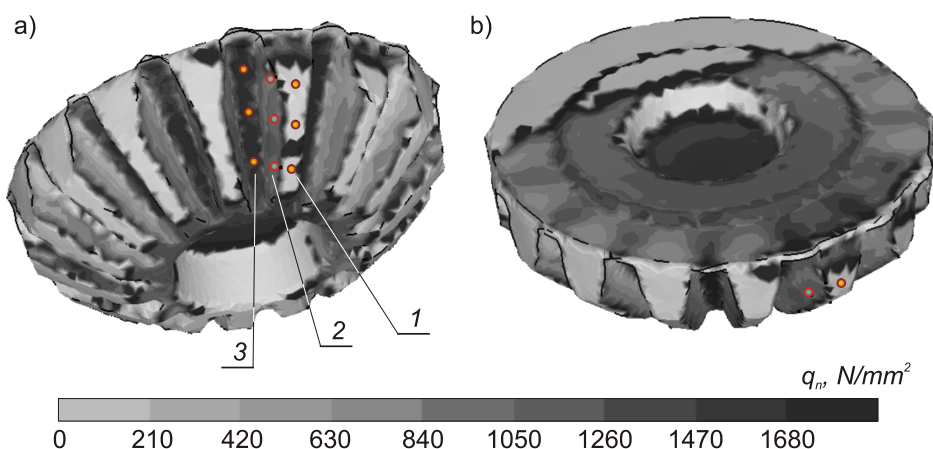


Rys. 4.38. Wpływ wymiarów wsadu na historię zmiany intensywności naprężenia σ_H , wyznaczonego na podstawie trzech wybranych punktów umieszczonych na powierzchni podstaw (2 – zgodnie z oznaczeniem na rys. 4.36) użębienia wypraski

Naciski jednostkowe na powierzchni kontaktu wypraska-narzędzie

Uzupełnieniem informacji na temat parametrów naprężeniowych, które wyznaczono dla wypraski typu stożkowe koło zębate, jest rozkład oraz historia zmiany nacisku jednostkowego q_n , który występuje na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami. Z uwagi na cechy geometryczne wyrobu, szczególną uwagę należy zwrócić na te obszary materiału wypraski, które znajdują się w otoczeniu uzębienia oraz wgłębień centralnych. Związane jest to z zastosowaną technologią prasowania obwiedniowego – mianowicie, te strefy materiału są kształtowane poprzez bezpośrednie oddziaływanie odpowiednich „występów”, które tworzą wykrój roboczy w narzędziach. Zatem, istniejąca obawa, że kształt i wymiary tych występów mogą przyczynić się do tego, że zbyt duże ich obciążenie może doprowadzić do granicznego wyłączenia materiału, z którego są wykonane narzędzia.

Przykładowy rozkład nacisku jednostkowego q_n na powierzchni wypraski, którą uzyskano ze wsadu A (rys. 4.10) podczas prasowania obwiedniowego stosując ruch wahający stempla typu (R), pokazano na rys. 4.39. Wyniki te obliczono, gdy zaawansowanie procesu wynosiło ok. 93% czasu



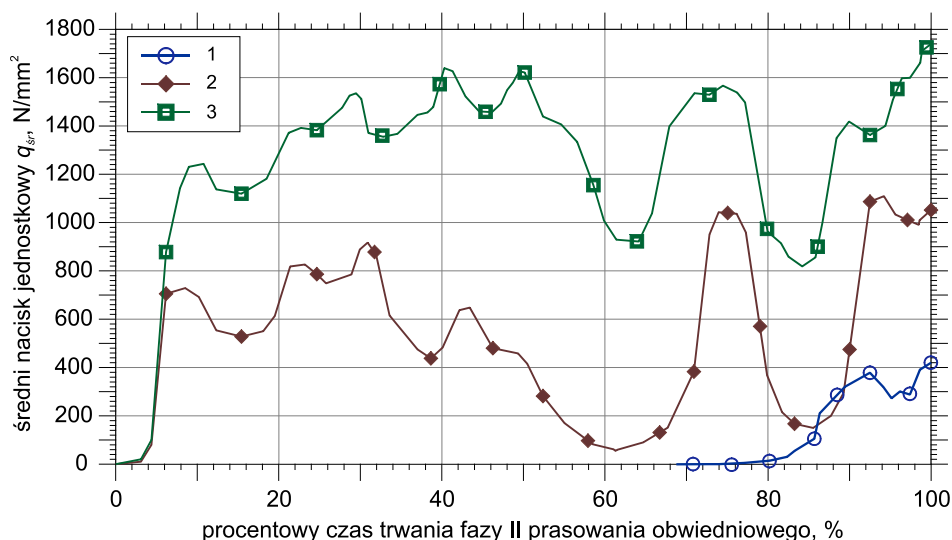
Rys. 4.39. Rozkład nacisku jednostkowego q_n , wyznaczonego w wyprasce kształtowanej ze wsadu A, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R), a zaawansowanie fazy II procesu wynosi 93%; gdzie: 1, 2 i 3 – powierzchnie uzębienia na których dokonano szczegółowego pomiaru, mającego na celu wyznaczyć wartości średniego nacisku jednostkowego q_{sr}

trwania drugiej fazy kształtowania wyrobu. Rozpatrywanie tylko fazy II jest uzasadnione tym, że tylko w tym czasie powstaje użębienie wypraski, a nacisk jednostkowy osiąga wartości ekstremalne.

Na podstawie rys. 4.39 wynika, że największy nacisk q_n powstaje na dwóch powierzchniach wypraski – jest to płaszczyzna czołowa wgłębień centralnych (wartość q_n przekraczająca $1700 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$) oraz powierzchnia podstaw zębów (q_n plasuje się na poziomie $1600 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$). Dodatkowo zauważono, że w obrębie użębienia wartości q_n zmieniają się w sposób cykliczny – co jest bezpośrednim skutkiem ruchu wahającego stempla. Szczegółowy obraz tych zmian przedstawia kolejny rysunek 4.40. Pokazano na nim historię zmiany średniego nacisku jednostkowego q_{sr} , który obliczono na podstawie pomiarów nacisku q_n w co najmniej trzech punktach, znajdujących się odpowiednio na powierzchni wierzchołków, podstaw oraz powierzchni bocznej zęba (miejsca te zaznaczono na rys. 4.39a). Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń MES, można stwierdzić, że podczas wykonywania użębienia w wyprasce:

- największy nacisk jednostkowy q_n powstaje na powierzchni podstaw zęba, przy czym średni nacisk jednostkowy q_{sr} zmienia się cyklicznie w przedziale $1000\div 1800 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$;
- na powierzchni bocznej zęba, nacisk jednostkowy cyklicznie osiąga wartość maksymalną, po czym wartość ta maleje prawie do zera – zjawisko to jest szczególnie widoczne w drugiej połowie fazy II procesu prasowania obwiedniowego użębienia;
- na powierzchni wierzchołków, nacisk jednostkowy pojawia się dopiero w końcowym etapie fazy kształtowania użębienia, a jego wartość średnia (tj. średni nacisk jednostkowy q_{sr}) jest stosunkowo mała i nie przekracza poziomu $400 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$.

Podsumowując, prasowanie obwiedniowe stożkowych kół zębatych należy realizować w takich warunkach, które zapewnią możliwie najkrótszy czas trwania procesu. Jednocześnie zaleca się stosować taki schemat wahanía narzędzia, aby skutkiem tego ruchu była możliwie najmniejsza częstotliwość zmiany parametrów naprężeniowych w wyprasce. Z uwagi na duże wartości średniego nacisku jednostkowego q_{sr} (w obrębie kształtowanego użębienia), uzasadnione jest stosowanie stali narzędziowej szybko tnącej do wykonania wkładki matrycowej, co jest zgodnie z zaleceniami projektowymi podanymi w poprzednim rozdziale 3.

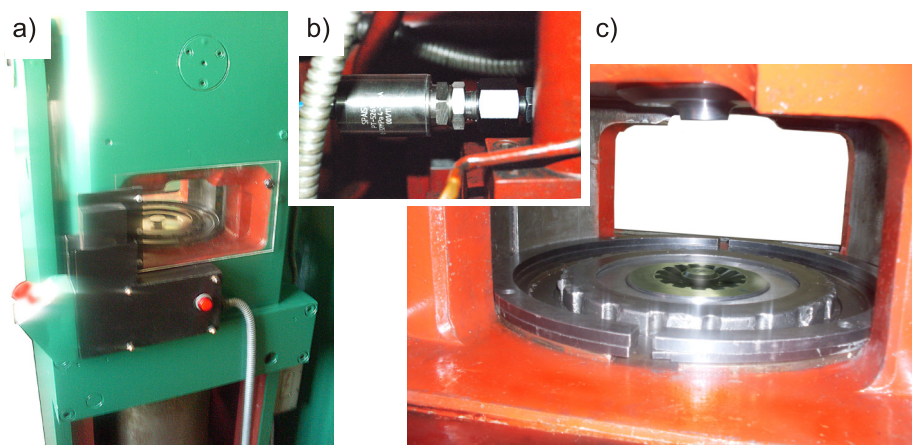


Rys. 4.40. Historia zmiany średniego nacisku jednostkowego q_{sr} , wyznaczonego w wypraskie kształtowanej ze wsadu A podczas fazy II, gdy stempel wykonuje ruch wahający typu (R), gdzie: 1, 2 i 3 – powierzchnie uzębienia oznaczone na rys. 4.39 (tj. powierzchnia wierzchołków, boczna i podstaw)

4.5. Weryfikacja doświadczalna

4.5.1. Stanowisko badawcze

Podstawowym celem wykonanych badań doświadczalnych było zweryfikowanie numerycznego modelu procesu prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego, który przedstawiono wcześniej w podrozdziale 4.3. Badania przeprowadzono przy użyciu prasy przemysłowej PXW-100A, która została przystosowana do pracy w warunkach laboratoryjnych. Jej ilustrację oraz fotografię przestrzeni roboczej umieszczono na rys. 4.41. Do celów eksperymentalnych, ustawiono maksymalny nacisk roboczy, który dla tej prasy wynosi 1600 kN. Pomiar siły kształtowania podczas prasowania wypraski dokonywano za pomocą układu pomiarowego, który składał się z aplikacji komputerowej oraz przetwornika ciśnienia PT-5261H/32MPa



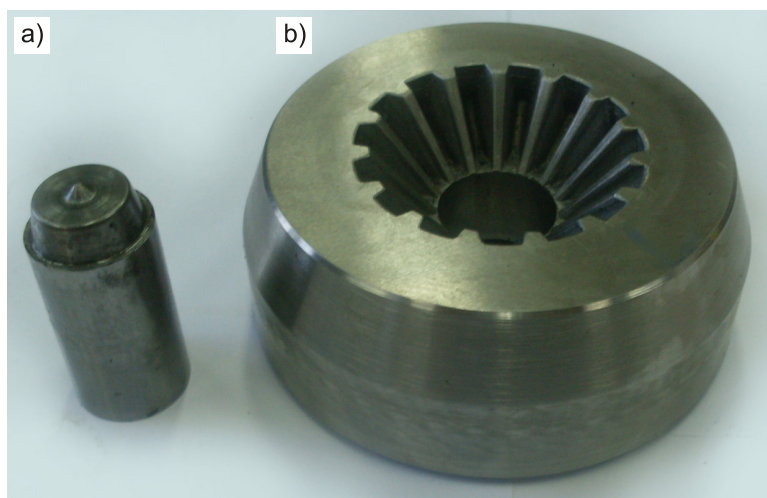
Rys. 4.41. Prasa PXW-100A użyta do weryfikacji doświadczalnej prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego: a) korpus prasy; b) przetwornik ciśnienia PT-5261H/32MPa; c) widok na przestrzeń roboczą (matryca dolna i wyrzutnik)

o klasie dokładności 0,6. Przetwornik ten (rys. 4.41b) podłączono bezpośrednio do hydraulicznego układu zasilania suwaka zewnętrznego prasy.

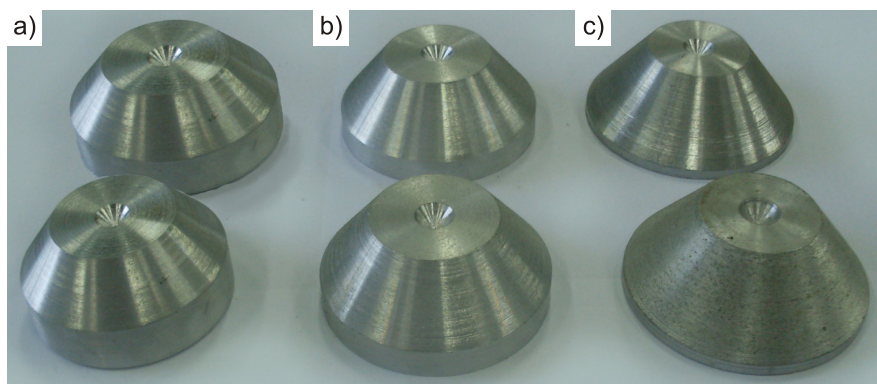
Na kolejnym rysunku 4.42 pokazano fotografię narzędzi dolnych – tj. wyrzutnika oraz wkładki matrycowej. Zostały one wykonane zgodnie z dokumentacją techniczną, którą przedstawiono wcześniej w postaci rysunków wykonawczych – odpowiednio rys. 4.9 oraz rys. 4.6. Zestaw tych narzędzi jest mocowany w suwaku prasy (rys. 4.41c). Z kolei na rys. 4.43 umieszczono fotografię przedkuwek (materiału wsadowego), które zostały wykonane ze stopu aluminium AlMgSi w stanie zmięczonym (T42). Z uwagi na doświadczalny charakter badań, materiał wsadowy (o kształcie i wymiarach zgodnych z rys. 4.10) uzyskano stosując obróbkę mechaniczną (tj. toczenie).

Badania doświadczalne zrealizowano przy następujących założeniach:

- narzędzie górne (stempel) wykonuje ruch wahający, zgodny ze schematem tzw. „po krzywej wielolistnej” (R) lub „po spirali” (S);
- narzędzia dolne, w postaci wkładki matrycowej i wyrzutnika, dosuwane są do powierzchni roboczej narzędzia górnego (stempla) z początkową prędkością ruchu dobiegowego suwaka zewnętrznego prasy, która wynosi około $43 \div 47 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;



Rys. 4.42. Zestaw narzędzi dolnych użytych w badaniach doświadczalnych:
a) wyrzutnik; b) wkładka matrycowa



Rys. 4.43. Fotografia przykładowych przedkuwek (wykonanych ze stopu aluminium AlMgSi), które użyto w badaniach doświadczalnych – patrz rys. 4.10

- wsad (przedkuwka) jest umieszczana na powierzchni czołowej wyrzutnika – centrowanie wsadu jest realizowane samoistnie, poprzez wykorzystanie cech geometrycznych;

- zasadnicze kształtowanie wypraski stożkowego koła zębatego jest realizowane z prędkością roboczą, która wynosi około $4,1 \div 4,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;
- osiągnięcie maksymalnej siły prasowania wypraski, która w rozpatrywanym przypadku badań była ustawiona na poziom maksymalny (ok. 1600 kN), powoduje przesterowanie pracy prasy – tj. następuje kształtowanie wypraski przy stałej sile, ale ze zmniejszającą się prędkością roboczą narzędzi dolnych (w sposób adaptacyjny);
- prasowanie obwiedniowe wypraski jest kończone w momencie, kiedy narzędzia dolne wykonają zadaną drogę oraz zakończy się kalibracja powierzchni czołowej wyrobu; czas kalibracji wynosił średnio $1 \div 2$ sekundy.

Ponadto przyjęto, że jedna seria badań składa się z trzech prób. Pod pojęciem próba należy rozumieć pełny przebieg procesu prasowania obwiedniowego, przy ustalonych parametrach kinematycznych narzędzi oraz przy użyciu przedkuwki o określonym kształcie i wymiarach. W trakcie realizacji próby dokonywano pomiaru siły kształtowania.

4.5.2. Siła kształtowania

Na rysunkach 4.44÷4.46 pokazano porównanie siły kształtowania F obliczonej metodą elementów skończonych (MES) oraz zmierzonej w eksperymencie. Wyniki te uzyskano podczas realizacji procesu prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego (rys. 4.3), zgodnie z opisem podanym w poprzednim podrozdziale. Natomiast symulację MES wykonano w oparciu o model numeryczny, który scharakteryzowano w podrozdziale 4.3.2. Aby uzyskać możliwie dużą zgodność warunków prasowania obwiedniowego (tj. pomiędzy rzeczywistym procesem a symulacją), do modelu ruchu narzędzi dolnych wprowadzono modyfikację. Polegała ona na tym, że w momencie osiągnięcia ekstremalnej wartości siły kształtowania F (tj. 1600 kN), symulację MES przerywano. Następnie, wprowadzając warunek brzegowy związany z kontrolą siły kształtowania, wykonano dalsze obliczenia. Efektem było uzyskanie fazy prasowania obwiedniowego przy stałej sile. Na wspomnianych wyżej rysunkach (wykresach siły), faza ta oznaczona jest cyfrą rzymską III.

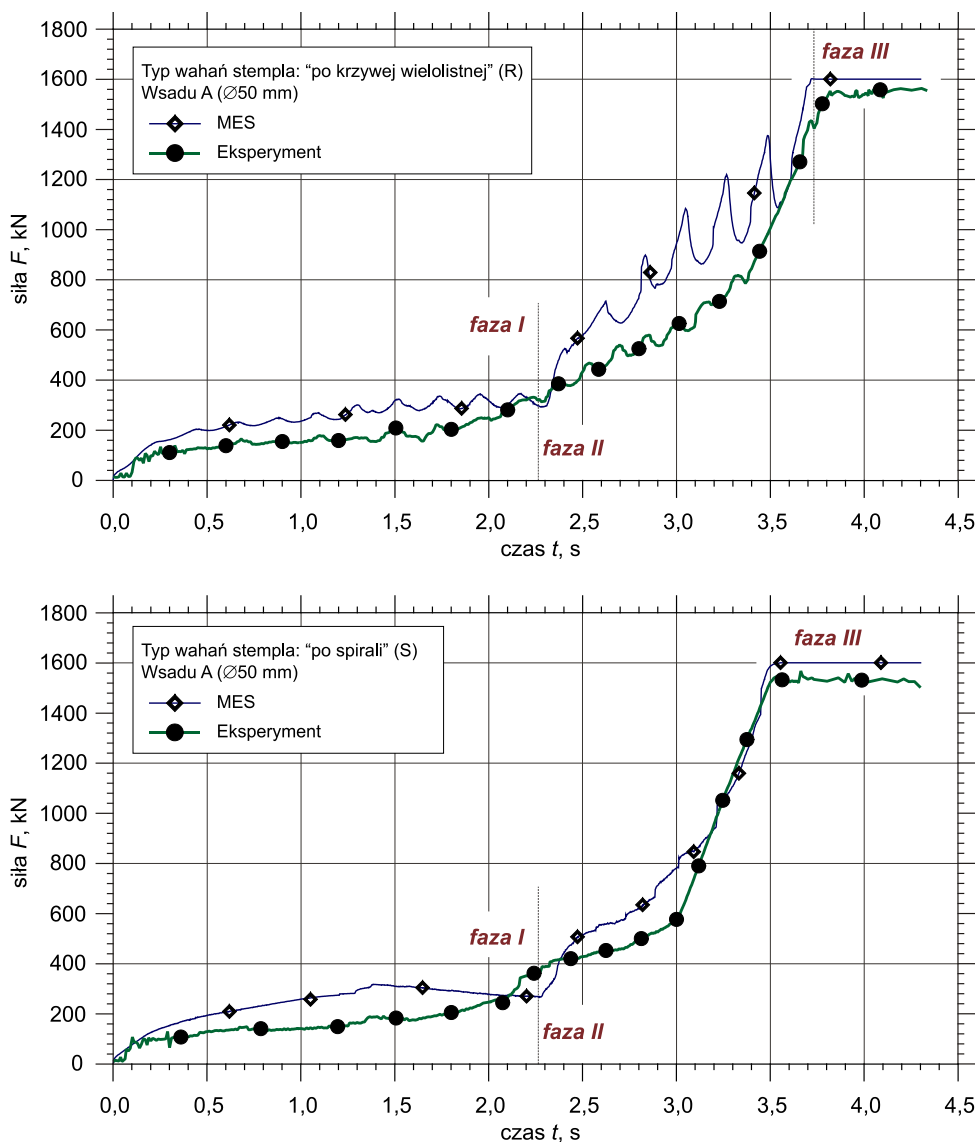
Należy dodatkowo wyjaśnić, że zaznaczone dwie fazy procesu (I oraz II) na wykresach siły, mają taką samą interpretację, jaką przyjęto w podrozdziale 4.4.1. Natomiast ostatni etap procesu prasowania obwiedniowego wyrobu w postaci kalibracji jest „ukryty” w fazie III. Przy czym, autor uznał, że po-

kazywanie na wykresie przebiegu siły F (która ma stałą wartość) dla całego etapu kalibracji jest zbędne. Ograniczono się jedynie do przedstawienia na wykresie tylko początku (ok. 0,1 sekundy) tego etapu.

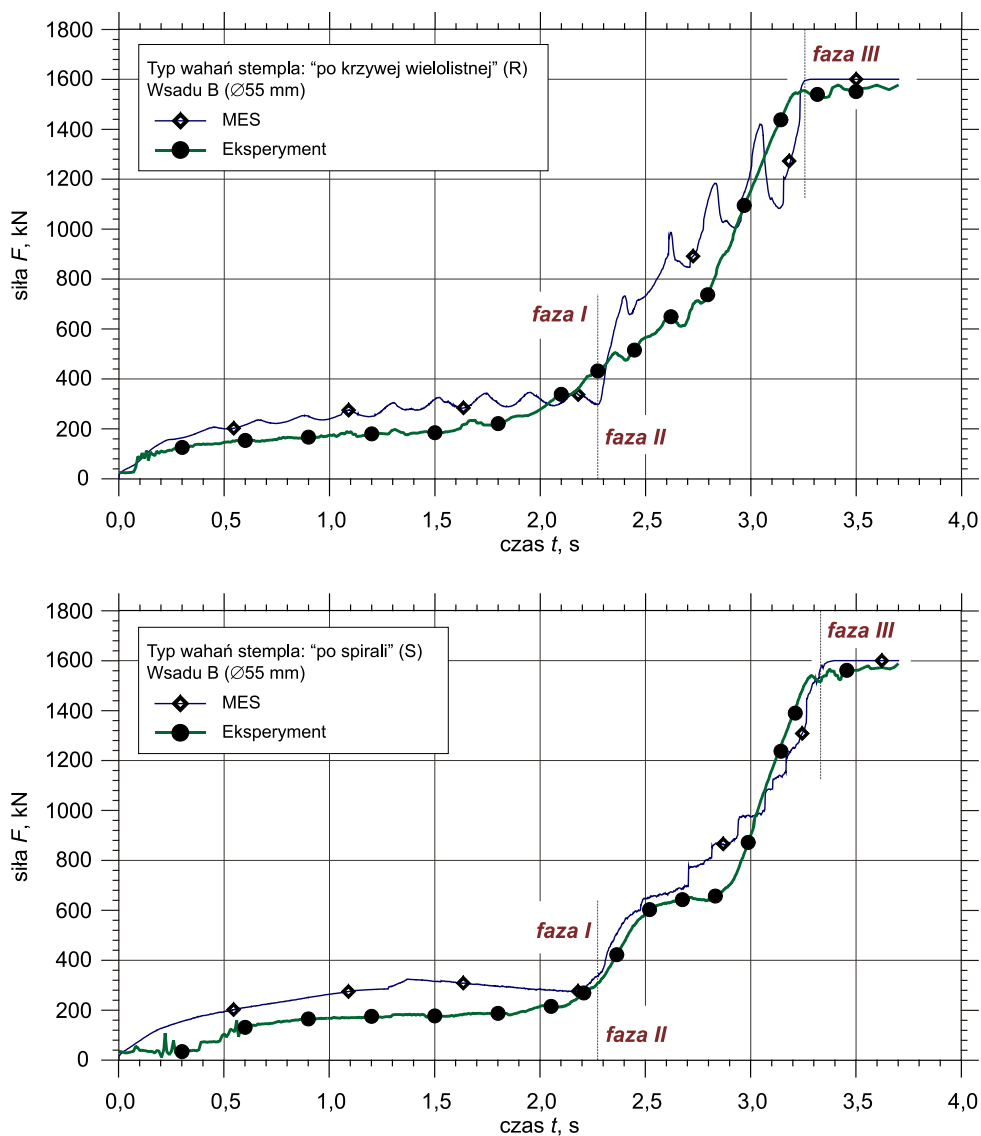
Analizując szczegółowo zestawienie siły kształtowania można zauważyć, że obliczona siła wykazuje dobrą zgodność z siłą zmierzoną, ale tylko w ocenie jakościowej. Na podstawie wyników można bez problemów wskazać poszczególne fazy kształtowania wypraski. W przypadku prasowania obwiedniowego, gdy zastosowano ruch wahający stempla typu (R), zaobserwowano również występowanie oscylacyjnego charakteru zmiany siły F , zarówno w symulacji jak i w eksperymencie. Jednak amplituda zmian siły obliczonej jest zdecydowanie większa, niż siły zmierzonej. Jednym z powodów takiej sytuacji może być fakt, że w trakcie symulacji MES wartość prędkości dosuwu narzędzi dolnych jest bezwzględnie kontrolowana. Natomiast podczas rzeczywistego procesu, chwilowa prędkość narzędzi zależy od wielu czynników – między innymi od zmiany oporów plastycznego kształtowania wypraski, chwilowej wydajności pompy układu zasilającego suwak prasy, itp. Niemniej jednak, z pomiarów prędkości suwaka, wykonanych przez autora w ramach czynności dodatkowych (stosując przetwornik oporowo-impulsowy MOK30, tzw. „enkoder” obrotowy do pomiaru przemieszczeń) wynika, że odchylenia prędkości suwaka od chwilowe wartości średniej można uznać za pomijalne. Zatem, przyjęcie w modelu MES stałej prędkości narzędzi dolnych nie powinno być traktowane jako błąd.

Natomiast w ocenie ilościowej, zgodność siły obliczonej z siłą zmierzoną jest dostateczna. Zaobserwowane różnice w chwilowych wartościach siły F są zauważalne. Podczas fazy I oraz na początku fazy II prasowania obwiedniowego wypraski, siła obliczona jest zawyżona. Początkowo, różnice te osiągają poziom przekraczający 30%. Wraz z postępem procesu, wartość siły obliczonej stopniowo „zbliża” się do siły zmierzonej. Najmniejsze różnice (pomijając obszary bardzo dobrej zgodności), pomiędzy siłą obliczoną a wyznaczoną w eksperymencie, nie przekraczają 16%. Jednocześnie należy zaznaczyć, że w analizie porównawczej siły kształtowania F nie uwzględniano, ani błędów pomiaru, ani nieznanymi czynników zakłócających pomiar.

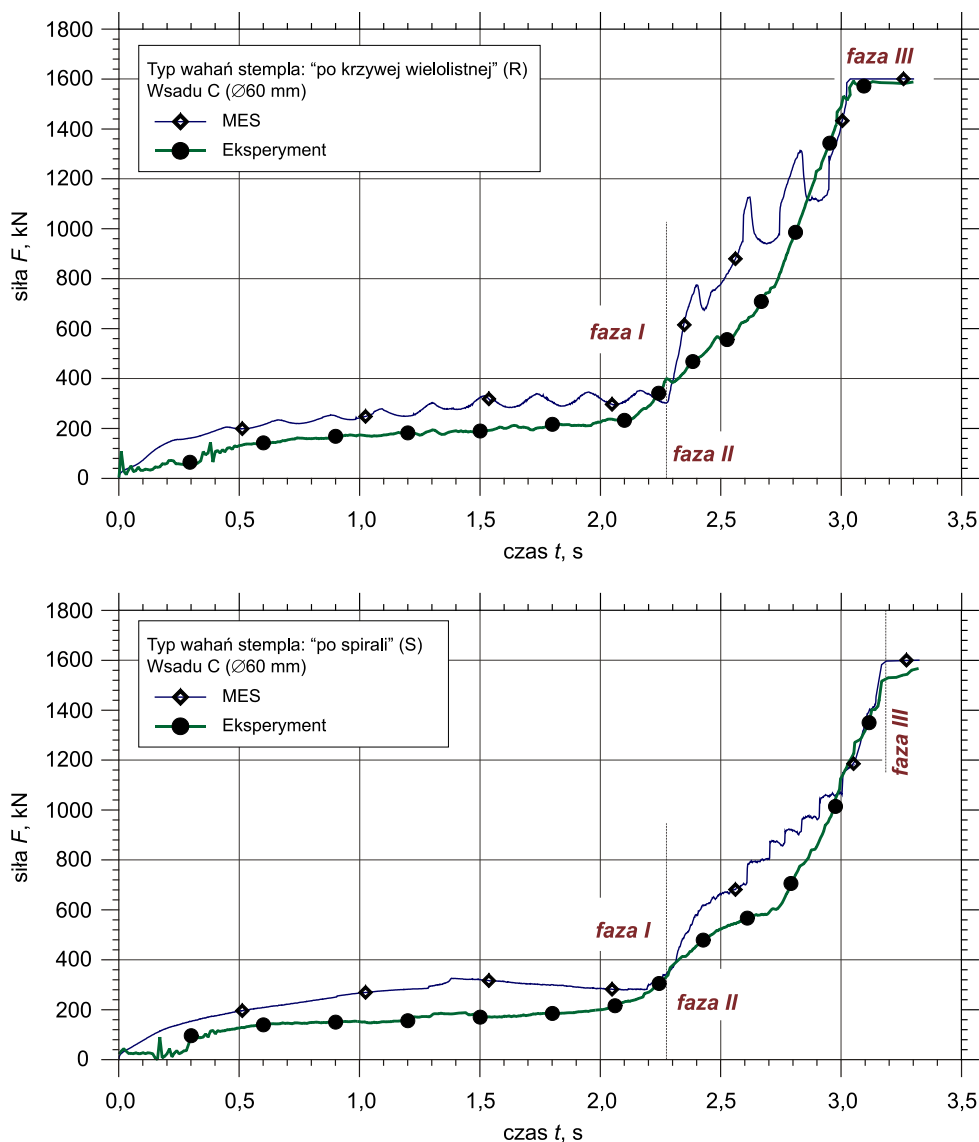
Podsumowując, na podstawie wykonanej weryfikacji doświadczalnej sił kształtowania można stwierdzić, że rozpatrywany model numeryczny prasowania obwiedniowego jest poprawny i umożliwia wykonywanie z powodzeniem obliczeń, których wyniki (choć zawyżone) są porównywalne z rzeczywistymi.



Rys. 4.44. Porównanie siły kształtowania zmierzonej w eksperymencie i obliczonej MES; wykonanie wypraski ze wsadu A (rys. 4.10a, rys. 4.43a)



Rys. 4.45. Porównanie siły kształtowania zmierzonej w eksperymencie i obliczonej MES; wykonanie wypraski ze wsadu B (rys. 4.10b, rys. 4.43b)



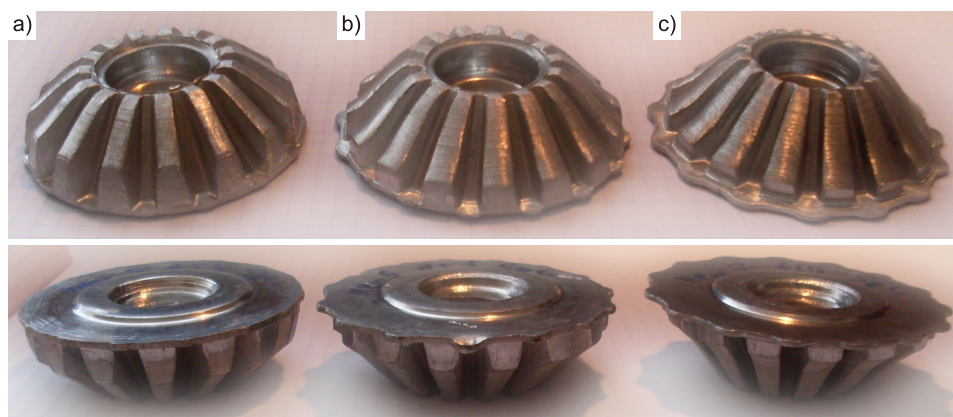
Rys. 4.46. Porównanie siły kształtowania zmierzonej w eksperymencie i obliczonej MES; wykonanie wypraski ze wsadu C (rys. 4.10c, rys. 4.43c)

4.5.3. Kształt wypraski

Fotografię przykładowych wyprasek stożkowego koła zębatego, które wykonano ze stopu AlMgSi, umieszczono na rys. 4.47. Uzyskano je w procesie prasowania obwiedniowego, gdy stempel wykonywał ruch wahający zgodny ze schematem (R). Do wykonania poszczególnych wyprasek zastosowano różne przedkuwki (rys. 4.43), które różniły się między sobą wymiarami. Na podstawie oceny jakościowej można stwierdzić, że zastosowanie wsadu o odpowiednich wymiarach ma istotne znaczenie na poprawność kształtu wypraski. Większa średnica charakterystyczna materiału wsadowego nie tylko wpływa na jakość wykonania uzębienia, ale również determinuje wielkość wpływki.

Na podstawie oględzin wyprasek stwierdza się, że:

- minimalne promienie zaokrąglenia ($R = 1$ mm), zastosowane w wykroju uzębionym matrycy, nie pogarszają jakości wykonania wypraski; promienie te zostały z powodzeniem odwzorowane;
- stosując wsad A (tj. o najmniejszej średnicy charakterystycznej – $\varnothing 50$ mm) uzyskano w wyprasce zęby, które mają oczekiwany wymiary oraz odznaczają się bardzo wysoką jakością wykonania;

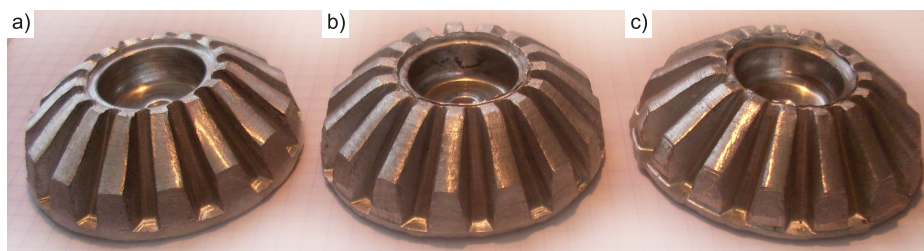


Rys. 4.47. Fotografia przykładowych wyprasek wykonanych ze stopu aluminium AlMgSi, które uzyskano w procesie prasowania obwiedniowego, gdy stempel wykonywał ruch wahający według schematu (R); górny rysunek przedstawia widok na uzębienie, dolny rysunek – na powierzchnię kształtowaną przez stempel; rysunki a), b) i c) reprezentują wypraski otrzymane ze wsadu A, B lub C (tj. o różnych wymiarach podanych odpowiednio na rys. 4.10)

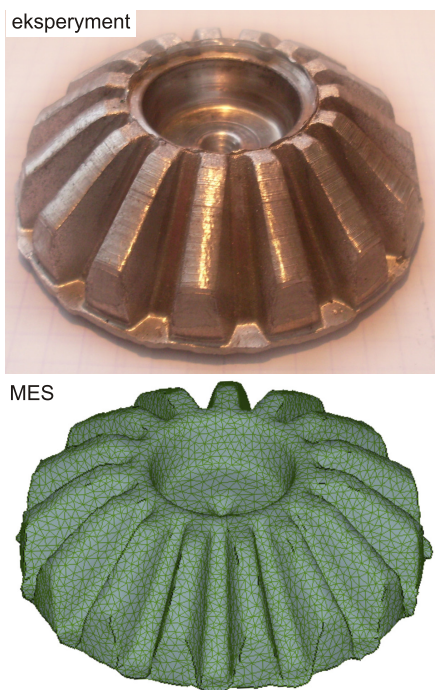
- powierzchnie wypraski, które są odwzorowane przez wykrój roboczy narzędzi dolnych, posiadają chropowatość tej samej klasy, z jaką wykonano te narzędzia;
- powierzchnia wypraski ukształtowana przez stempel (tj. narzędzie wahające) posiada wygląd powierzchni polerowanej;
- powstała w procesie prasowania obwiedniowego wypływka promieniowa (o grubość mniejsza od 1 mm) nie posiada żadnych wad geometrycznych oraz pęknięć; strefy wypraski otaczający wypływkę również są wolne od wad.

Ponadto, na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych stwierdzono, że zmiana rodzaju ruchu wahającego stempla nie wpływa na cechy geometryczne wypraski w sposób znaczący. Potwierdzeniem tego jest porównanie wyprasek pokazanych na rys. 4.48. We wszystkich zaobserwowanych przypadkach procesu prasowania obwiedniowego, kształt i wymiary wypraski nie różniły się między sobą.

Na kolejnym rys. 4.49 zestawiono porównanie kształtu przykładowej wypraski, którą otrzymano podczas realizacji badań doświadczalnych oraz wykonując symulację MES. Ocena jakościowa oraz ilościowa (obejmująca również porównanie charakterystycznych wymiarów wyrobu) wykazała, że podczas kształtowania stożkowego koła zębatego ze wsadu A (rys. 4.10a – tj. posiadającego najmniejszą rozpatrywaną średnicę części walcowej), zgodność kształtu oraz wymiarów wypraski jest stosunkowo duża. Największe zaobserwowane różnice, pomiędzy wynikami zmierzonymi a obliczonymi, nie przekraczały poziomu 6%. Na tej podstawie można uznać, że MES jest



Rys. 4.48. Wypraski otrzymane ze wsadu A w procesie prasowania obwiedniowego, gdy stempel wykonywał ruch wahający zgodny ze schematem tzw. „po okręgu” (a); „po krzywej wielolistnej” (b) lub „po spirali” (c)

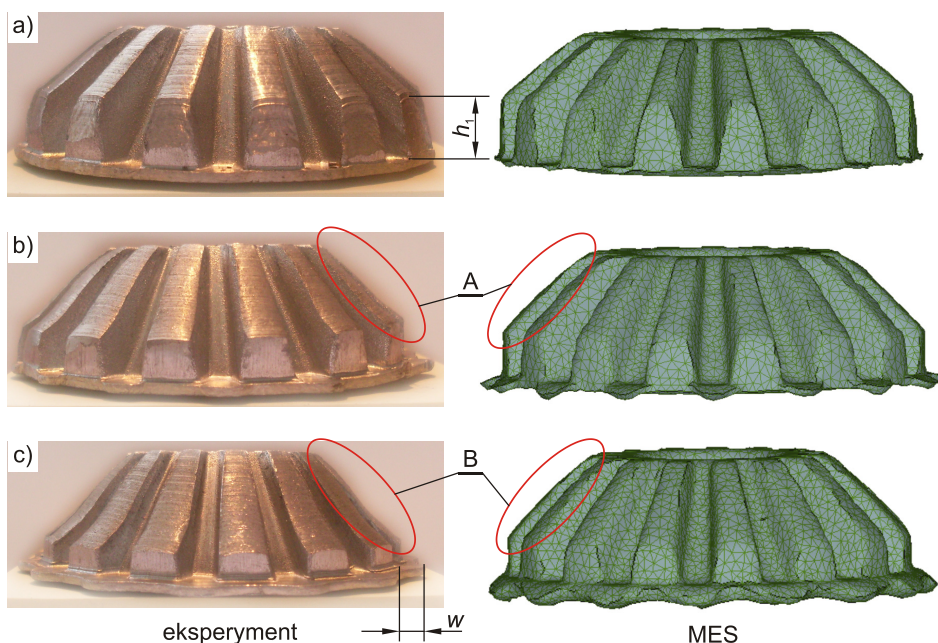


Rys. 4.49. Porównanie kształtu wypraski uzyskanej ze wsadu A ($\varnothing 50$ mm) podczas prasowania obwiedniowego, gdy stempel wykonywał ruch wahający według schematu „po krzywej wielolistnej” (R)

metodą modelowania numerycznego, która z powodzeniem może zostać użyta do wspomagania czynności projektowych.

Niestety, analiza wariantów prasowania obwiedniowego wypraski, gdy zastosowano wsad o większej średnicy części walcowej – tj. wsad B lub wsad C (rys. 4.10, rys. 4.43), wykazała pewne niezgodności pomiędzy wynikami eksperymentu, a obliczeniami MES. Dotyczą one w zasadzie tylko zarysu tworzącej powierzchni wierzchołków zębów. Zgodnie z rys. 4.50, w badaniach doświadczalnych uzyskano wypraski, w których powierzchnie wierzchołków były wklęsłe (szczegół A oraz B), a ich tworząca przyjmowała kształt linii przypominającej spłaszczoną literę „S”. Natomiast w symulacji MES, tworzące tych powierzchni pozostawały albo liniami prostymi, albo względnie wypukłymi. Pomiary wykazały,

że w przypadku wypraski pokazanej na rys. 4.50b, największe odchylenie zarysu od linii prostej wynosiło ok. 0,3 mm. Natomiast wypraski z rys. 4.50c – odchylenie to było nie większe niż 0,8 mm. Uwzględniając wnioski z badań doświadczalnych oraz zakładając, że powierzchnia wierzchołków będzie mechanicznie wyrównywana, okazuje się, że odchyłki te są stosunkowo małe i nie powinny mieć większego znaczenia podczas realizacji procesu technologicznego. Ponadto należy podkreślić, że dokładne porównanie umownej wysokości zęba wypraski (parametr h_1 – rys. 4.50) wykazało, że wartość obliczona w MES jest bardzo bliska wartości zmierzona – różnice oscylowały w przedziale 0,5÷4,5%.



Rys. 4.50. Porównanie wyprasek, uzyskanych w eksperymencie oraz obliczonych MES, podczas prasowania obwiedniowego, gdy stempel wykonywał ruch wahający zgodny ze schematem (R); użyty materiał wsadowy (rys. 4.10, rys. 4.43):
a) wsad A, b) wsad B, c) wsad C; gdzie: h_1 – umowna wysokość zęba,
 w – umowna szerokość wypływki promieniowej

Pozostaje jeszcze omówienie kwestii wypływki promieniowej. Zgodnie ze obliczeniami MES, nadmierna wypływka powstaje podczas wykonywania wypraski z materiału wsadowego o największej średnicy – tj. wsadu C. Eksperyment potwierdził wyniki symulacji. Zgodnie z wykonanymi pomiarami (rys. 4.50c), umowna szerokość wypływki wynosi $w = 2,5$ mm (na wysokości powierzchni wierzchołków zęba) oraz $w = 4,5 \div 5,0$ mm (na wysokości powierzchni podstaw).

Wnioskiem podsumowującym wykonane badania teoretyczno-doświadczalne jest stwierdzenie, że proces prasowania obwiedniowego przedmiotowego stożkowego koła zębatego należy realizować stosując:

- materiał wsadowy o wymiarach zbliżonych do wsadu A (rys. 4.10a);
- ruch wahający stempla zgodny ze schematem (R);

- dostatecznie dobre smarowanie powierzchni wykroju uzębionego w matrycy oraz wykonanie jej z możliwie najmniejszą chropowatością – pozwoli to ograniczyć zjawisko „wklęsłej” powierzchni wierzchołków.

Zaproponowana technologia wykonania wypraski umożliwia uzyskanie oczekiwanych efektów – tj. stożkowego koła zębatego posiadającego centralne wgłębienia oraz powierzchnie o dużej dokładności wykonania i małej chropowatości. Ponadto, podczas projektowania procesu, należy przewidzieć obróbkę wykańczającą dla powierzchni wierzchołków oraz powierzchnie bocznych zębów. Warto podkreślić, iż badania doświadczalne wykazały, że na poprawność płynięcia materiału w wykroju uzębionym ma ogromny wpływ jakość wykonania powierzchni narzędzia. Zauważono, że zbyt duża chropowatość wykroju uzębionego może w znaczącym stopniu przyczynić się do powstania falistości powierzchni wierzchołków uzębienia w kształtowanej wyprasce.

LITERATURA

1. Bernet A.: *Wobble-die forging machine*. U.S. Patent No. 4698992 (1987)
2. Canta T. et al.: Some aspects of energy distribution in rotary forming processes. *Journal of Materials Processing Technology* Vols. 80-81 (1998) pp. 195-198
3. Deng X., Hua L., Han X., Song Y.: Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. *Materials and Design* vol. 32 (2011) pp. 1376-1389
4. Erbel S. i inni: *Technologia Obróbki Plastycznej. Laboratorium*. Warszawa: Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej 2003
5. Garczyński Z.: Kształtowanie odkuwek metodą prasowania obwiedniowego. *Obróbka Plastyczna Metali* tom IX nr 3 (1998) s. 31-36
6. Garczyński Z.: Warianty prasowania obwiedniowego odkuwek dokładnych. Możliwości technologiczne. *Obróbka Plastyczna Metali* tom XI nr 2 (2000) s. 18-22
7. Garczyński Z., Gulczyński R.: Prasowanie obwiedniowe odkuwek o złożonym kształcie z otworem w trzpieniu. *Obróbka Plastyczna Metali* tom XII nr 2 (2001) s. 43-47
8. Garczyński Z., Ziółkiewicz S.: Badania procesu dokładnego kształtowania na zimno podczas prasowania obwiedniowego z przetłaczaniem otworu w wyprasce. *Obróbka Plastyczna Metali* tom XIII nr 2 (2002) s. 51-60
9. Global Metal Spinning Solutions, Inc.: *Rotary Forge Press (rotary forging machine)*, 2011 [dostęp grudzień 2011]. Dostępny w Word Wide Web: http://www.dennusametalforming.com/rotary_forging/rotary_forging.htm
10. Grześkowiak J.: Kształtowanie obwiedniowe na prasie z wahającym się narzędziem w produkcji odkuwek. *Obróbka Plastyczna Metali* nr 3 (1989) s. 61-66

11. Grześkowiak J.: Perspektywy prasowania obwiedniowego z zastosowaniem krajowych pras typu PXW. *Mechanik* nr 2 (1982) s. 75-78
12. Guangchun W., Guoqun Z.: A three-dimensional rigid-plastic FEM analysis of rotary forging deformation of a ring workpiece. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 95 (1999) pp.112-115
13. Guangchun W. et al.: Methods of dealing with some problems in analyzing rotary forging with the FEM and initial application to a ring workpiece. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 71 (1997) pp. 299-304
14. Hayama M.: Theoretical analysis of rotary forging of cylindrical rod. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity* Vol. 24 (1983) pp. 386-393
15. Hawkyard J.B. et al.: Pressure distribution measurements in rotary forging. *Journal of Mechanical Engineering Science* Vol. 19 (1977) pp. 135-142
16. Han X., Hua L.: 3D FE modeling of cold rotary forging of a ring workpiece. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 209 (2009) pp. 5353–5362
17. Han X., Hua L.: Effect of size of the cylindrical workpiece on the cold rotary-forging process. *Materials and Design* Vol. 30 (2009) pp.2802-2812
18. Han X., Hua L.: Comparison between cold rotary forging and conventional forging. *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol. 23 (2009) pp. 2668-2678
19. Hu Y.: The research on the cold orbital forming technology of the start contrate gear profile. *Materials Science and Technology* No. 2 (1993) pp. 43-46
20. Hua L., Han X.: 3D FE modeling simulation of cold rotary forging of a cylinder workpiece. *Materials and Design* Vol. 30 (2009) pp.2133-2142
21. INOP-Z/144-10-79: *Prasowanie obwiedniowe. Prasy specjalne typu PXW*. Poznań: Instytut Obróbki Plastycznej 1979
22. INOP-Z/140-10-79: *Prasowanie obwiedniowe. Zasada działania i zakres możliwości*. Poznań: Instytut Obróbki Plastycznej 1979

23. Kalinowska-Ozgowicz E., et al.: Orbital forging of an oxygen cylinder web. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 64 (1997) pp. 215-222
24. Kutjajkin V.G., Kuryšev V.L., Buntjan G.V., Wdrożenie procesu prasowania obwiedniowego na prasach serii PXWp. *Obróbka Plastyczna Metali* nr 2/3 (1993) s. 73-76
25. Lee Y.S. et al: A study on the process to control the cavity and the thickness distribution of superplastically formed parts. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 112 (2001) pp. 114-120
26. Lisowski J., Olszewski M., Stróżewski M.: Klasyfikacja, typizacja i analiza krajowej produkcji odkuwek matrycowych, także odkuwek kół zębatach, zakwalifikowanych wstępnie do kształtowania na prasach PXW z wahającą się matrycą. *Obróbka Plastyczna Metali* nr 3 (1984) s. 143-149
27. Liu G., et al.: Numerical analysis on rotary forming mechanism of a flange. *Journal of Materials Science & Technology* Vol. 17 (2001) pp. 129-130
28. Liu G. et al.: Applications of numerical simulation to the analysis of bulk-forming processes – case studies. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 150 (2004) pp. 56-61
29. Liu G., Yaun S.: Explanation of the mushroom effect in the rotary forging of cylinder. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 151 (2004) pp. 178-182
30. Łunarski J., Stachowicz F.: *Prasowanie radialne w procesach kształtowania i łączenia małych elementów*. Rzeszów: Wydawnicza Oficyna Politechniki Rzeszowskiej 1999
31. Massey H.F.: *Rotary forging machine*. British Patent Specification No. 319065, 1929
32. Marcianiak Z.: Prasowanie obwiedniowe. *Mechanik* 41 nr 11 (1968), s. 587-589
33. Marciniak Z.: Cold Forming of Wedge-Shaped Workpieces. *Proc. 1st Intl. Conf. on Rot. Metalworking Processes*, London U.K (1979) pp. 137-146
34. Marciniak, Z.: Rotary Upsetting of Flanges in Warm Forging Temperature Range. *Proc. 3rd Intl. Conf. on Rot. Metalworking Processes*, Kyoto Japan (1984) pp. 23-30

35. Marcianiak Z.: *Prasa do plastycznego kształtowania przedmiotów metalowych metodą wahającej matrycy*. PL Patent nr 159493 (1989)
36. Moon H.K., et al.: An approximate efficient finite element approach to simulating a rotary forming process and its application to wheel – Bering assembly. *Finite Elements in Analysis and Design* Vol. 44 (2007) pp. 17-23
37. Nagiel W.: Kształtowanie wahającą matrycą – przegląd stanu, perspektywy. *Mechanik* nr 6 (1984) s. 312-314
38. Niezgodziński T.: *Mechanika ogólna*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN 2008
39. Nowak J. et al.: Recent development in orbital forging technology. *International Journal of Material Form* (2008) Suppl. 1, pp. 387-390
40. Oh H.K., Choi S.: A study on center thinning in the rotary forming of circular plate. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 66 (1997) pp. 101-106
41. Oh H.K., Choi S.: Ductile fracture in the central region of a circular plate in rotary forging. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 68 (1997), pp.23-26
42. Oudin J., et al.: Force, torque and plastic flow analysis in rotary upsetting of ring shaped billets. *International Journal of Mechanical Science* Vol. 27 (1985) pp.761–780
43. Pater Z., Samołyk G.: *Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2011
44. Pei X.H., Zhou D.C., Wang Z.R.: A study of the rotary forging. *Proc. 2nd Internat. Conf. Rotary Metalworking Processes*, Stratfordupon-Avon UK (1982) pp. 91-100
45. Pei X.H., Zhou D.C., Wang Z.R.: Same basic problems of the rotary forging and its practical applications. *Proc. 2nd Internat. Conf. Rotary Metalworking Processes*, Stratfordupon-Avon UK (1982), pp. 81-90
46. Penny W.A., Slater R.A.C.: *Rotary forging machine*. U.S. Patent No. 4313332, 1982
47. Plasomat: *Prasa z wahającą matrycą typ PXW 100AAb. Dokumentacja technologiczno-rozruchowa*. Warszawa: Plasomat 1975
48. Plasomat: *Prasa z wahającą matrycą typ PXW 100AAb. Instrukcja technologiczna*. Warszawa: Plasomat 1975

49. Plewiński A.: Technologische Möglichkeiten des Abwälzpressens auf einer polnischen Presse PXW. *Umforttechnik* 19 (1985) pp. 204-210
50. Plewiński A., Garczyński Z.: Możliwości technologiczne pras PXW. *Obróbka Plastyczna Metali* nr 2 (1991) s. 25-31
51. Richert J., Skaza P.: Warunki kinematyczne kształtowania obwiedniowego wyrobów czołowo uzębionych. *Obróbka Plastyczna Metali* tom VII nr 4 (1995) s. 43-51
52. Samołyk G.: *Sposób i urządzenie do prasowania obwiedniowego na zimno*. Zgłoszenie patentowe nr P.392860 (2010)
53. Samołyk G.: *Sposób i narzędzia do wywijania kołnierza z jednoczesnym prasowaniem obwiedniowym*. Zgłoszenie patentowe nr P.394432 (2011)
54. Samołyk G.: *Podstawy teoretyczne i modelowanie prasowania obwiedniowego*. Lublin: Wyd. Pol. Lubelskiej 2012
55. Samołyk G.: Prasowanie na zimno. Analiza stanu zagadnienia. W: *Aspekty teoretyczne i badawcze prac zrealizowanych w KKMiTOP w 2008 r.* Lublin: Wyd. Pol. Lubelskiej 2009, s. 37-54
56. Samołyk G.: The alternative methods of a rotary forging. *International Scientific Conference "Progressive Technologies and Materials"*, Rzeszów-Bezmiechowa 2009, pp. 83-84
57. Samołyk G.: Analiza numeryczna kształtowania stopu AZ31 sposobem prasowania obwiedniowego na ciepło. *Hutnik. Wiadomości hutnicze* Nr 8 (2009) s. 653-656
58. Samołyk G.: Prędkość posuwu w prasowaniu obwiedniowym wyprasek pierścieniowych. *Rudy i Metale Nieżelazne* Nr 11 (2009) s. 806-808
59. Samołyk G.: Model płynięcia stopu Al z serii 6000 odkształcanego na zimno. *Rudy i Metale Nieżelazne* Nr 6 (2010) s. 326-329
60. Samołyk G.: Powierzchnia kontaktu wypraska-stempel podczas prasowania obwiedniowego stopu AlMgSi. *Rudy i Metale Nieżelazne* Nr 6 (2010) s. 372-376
61. Samołyk G.: Analiza płynięcia metalu podczas prasowania obwiedniowego wyrobu typu tarcza. *Hutnik. Wiadomości Hutnicze* Nr 1 (2011) s. 109-112
62. Samołyk G.: Wpływ zmiany rodzaju ruchu wahającego stempla na wybrane parametry siłowe prasowania obwiedniowego wypraski. *Mechanika. Zeszyt naukowy* nr 238. Warszawa: OWPW 2011, s. 31-36

63. Samołyk G.: Wpływ ruchu i prędkości narzędzi na płynięcie metalu w prasowaniu obwiedniowym. *Rudy i Metale Nieżelazne* Nr 11 (2011) s. 714-718
64. Samołyk G., Bartnicki J.: Wpływ wartości kąta pochylenia stempla na wybrane parametry w prasowaniu obwiedniowym. *Rudy i Metale Nieżelazne* Nr 12 (2009) s. 866-869
65. Samołyk G., Bartnicki J., Gontarz A.: Fracture Model for FEM Modelling of Cold Metal Forging. *Steel Research International* Vol. 81 (2010) No 9, pp. 302-305
66. Samołyk G., Tomczak J. Bartnicki J.: Cold forming of AlCu4MgSi alloy by orbital forging. *Archives of Metallurgy and Materials* Vol. 57 (2012), pp. 205-209
67. Samołyk G., Pater Z., Bartnicki J.: Wpływ zmiany rodzaju ruchu narzędzi na wybrane parametry w prasowaniu obwiedniowym. *Mechanika. Zeszyt naukowy* nr 226. Warszawa: OWPW 2009, s. 91-96
68. Sato T., Kozaki Y., Hirota K.: Plastic working method and apparatus. U.S. Patent No. 4984443 (1991)
69. Schlatter W.: *Wobble press*. U.S. Patent No. 5398536 (1995)
70. Schlatter W.: *Wobble press*. U.S. Patent No. 5615569 (1997)
71. Schmid Ltd.: *Orbital Forming Presses from Heinrich Schmid Ltd.*, 2010 [dostęp styczeń 2010]. Dostępny w Word Wide Web: <http://www.schmidpress.ch/index.php>
72. Shivpuri R.: Past Developments and Future Trends in the Rotary or Orbital Forging Process. *Journal of Material Shaping Technology* No. 6 (1988) pp. 55-71
73. Silichev A.N.: *Device for stamping metal blanks*. U.S. Patent No. 3494161 (1970)
74. Slick E.E.: *Method of and apparatus for making shafts*. U.S. Patent No. 1359625 (1920)
75. Standring P.M.: *Rotary forging*. U.S. Patent No. 4795333, 1989
76. Szyndler R. i inni: Zalety i wady procesu prasowania obwiedniowego. *Obróbka Plastyczna Metali* tom XV nr 3 (2004) s. 47-55
77. Tozawa Y., et al.: Improved three-dimensional analysis for strip rolling. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity* Vol. 23 (1982) pp. 1181-1187

78. Turno A. I inni: *Obróbka plastyczna kół zębatach*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne 1973
79. Wilson G.: *Upsetting or forging machines*. U.S. Patent No. 3703823 (1972)
80. Yuan S. et al.: The precision forging of pin parts by cold-drawing and rotary-forging. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 86 (1999) pp. 252-256
81. Zhang C., Xu B.: Research on orbital cold forging for the wedge cam of automobile fuel injection pump. *Poroc. of SPIE* Vol. 6040 (2005) 60400S, pp. 1-5
82. Zhang M.: Calculating force and energy during rotating forging. *3rd International Conference RoMP, Bedford 1988, Unaited Kingdom. IFS Conferences Ltd.* Vol. 6, No. 1 (1988) pp. 55-71
83. Zhou D., et al.: Defects caused in forming process of rotary forged parts and their preventive methods. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 32 (1992) pp. 471-479
84. Ziółkiewicz S., Garczyński Z.: Prasowanie obwiedniowe. *Obróbka Plastyczna Metali* tom XIX nr 3 (2008) s. 55-66

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A – punkt na osi symetrii stempla,
- D – średnica charakterystyczna wypraski lub narzędzi,
- E – moduł sprężystości wzdłużnej (Younga),
- F – siła kształtowania,
- O – środek ruchu kulistego stempla
- S – pole powierzchni,
- T – temperatura, siła tarcia,
- V – objętość,
- W – praca odkształcenia plastycznego,
- a, b, c – parametry geometryczne do opisu cech wypraski,
- d, h, l – średnica i wysokość charakterystyczna wsadu lub wypraski,
- g – grubość wypraski,
- k – granica plastyczności materiału przy czystym ścinaniu,
- m – czynnik tarcia, wykładnik w krzywej umocnienia,
- q – naciski powierzchniowe,
- q_n – jednostkowy nacisk powierzchniowy,
- $q_{\acute{s}r}$ – średni nacisk powierzchniowy,
- t – czas,
- w – umowna szerokość wypływki promieniowej,
- v_z – prędkość ruchu postępowego,
- $\{x, y, z\}$ – nieruchomy kartezjański układ współrzędnych,
- $\{x', y', z'\}$ – ruchomy kartezjański układ współrzędnych,
- $\{r, \theta, z\}$ – nieruchomy walcowy układ współrzędnych zgodny z kierunkami: promieniowym, obwodowym i osiowym,
- $\{R, \theta, Z\}$ – kierunki naprężenia i prędkości odkształcenia: promieniowy, obwodowy i osiowy,
- (P) – identyfikator ruchu wahającego (tzw. „po prostej”) wykonywanego przez stempel na prasie PXW.

- (R) – identyfikator ruchu obwiedniowego planetarnego (tzw. „po krzywej wielolistnej”) wykonywanego przez stempel na prasie PXW.
- (S) – identyfikator ruchu obwiedniowego spiralnego wykonywanego przez stempel na prasie z serii PXW,
- (T) – identyfikator ruchu obwiedniowego (tzw. „po okręgu”) wykonywanego przez stempel na prasie z serii PXW,
- α – kąt obrotu własnego,
- β – kąt precesji,
- ε – odkształcenie względne,
- γ – kąt nutacji, kąt pochylenia stempla,
- φ – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne),
- λ – wskaźnik powierzchni kontaktu stempel-wypraska,
- μ – współczynnik tarcia,
- ν – liczba Poissona,
- ρ – gęstość materiału,
- σ – naprężenie,
- σ_p – granica plastyczności materiału,
- σ_H – intensywność naprężenia (naprężenie huberowskie),
- σ_m – naprężenie średnie,
- τ – naprężenie styczne,
- ω – prędkość kątowa,
- $\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma$ – prędkość kątowa obrotu własnego, precesji, nutacji,
- ω_1 – ruch obrotowy wokół osi własnej,
- ω_2 – ruch precesyjny, ruch precesyjno-nutacyjny,
- ω_{zew} – prędkość kątowa mimośrodowi zewnętrznego w prasie PXW,
- ω_{wew} – prędkość kątowa mimośrodowi wewnętrznego w prasie PXW,

STRESZCZENIE

Monografia dotyczy wybranych aspektów technologii i teorii prasowania obwiedniowego na zimno. Szczególną uwagę zwrócono na problem wytwarzania wyprasek o złożonym kształcie, które są wykonane ze stopu aluminium. Przedstawione wyniki uzyskano realizując projekt badawczy nr N N508 439036, który był finansowany ze środków na naukę w latach 2009-2012. Celem przewodnim opracowania jest przedstawienie w formie zwartej, usystematyzowanej i uzupełnionej wiedzy na temat kształtowania wyprasek (odkuwek) na zimno, sposobem prasowania obwiedniowego. Treść książki podzielono na trzy obszerne części. Po krótkim wprowadzeniu do tematu książki, w rozdziale drugim przedstawiono ogólną charakterystykę procesów kształtowania obwiedniowego, klasyfikację oraz omówiono rozwój technologii i maszyn obwiedniowych. Przedstawiono szereg kluczowych rozwiązań technicznych maszyn i urządzeń stosowanych do kształtowania obwiedniowego. Rozdział trzeci dotyczy zasad projektowania technologii prasowania obwiedniowego. Uwagę zwrócono na aspekty kształtowania wyprasek na prasach obwiedniowych – typu PXW oraz z serii T. Ostatnia część monografii poświęcona jest technologii i teorii prasowania obwiedniowego stożkowego koła zębatego. Omówiono zarówno zasady projektowania, jak również przedstawiono wyniki badań teoretyczno-doświadczalnych. Analizę numeryczną wykonano w oparciu o MES, natomiast badania eksperymentalne przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych z użyciem prasy przemysłowej PXW-100A. Przedstawiony proces wytwarzania stożkowego koła zębatego znamieny jest tym, że składa się on z połączonych zabiegów wykonywanych etapowo na jednym zestawie narzędzi. Pokazano również wpływ rodzaju ruchu wahającego narzędzia oraz wymiarów wsadu na warunki realizacji procesu technologicznego.

SUMMARY

The present selected technological and theoretical aspects of the orbital forging process in cold forming conditions. In there, the particular attention was given to problem of the production of forging with a complex shape. Forgings are made from aluminium alloy. The presented results were obtained in the research, which was financed by funds from the Polish Ministry of Science and Higher Education over years 2009-2012, as an own project No. N N508 439036. Main purpose of the monograph is to present the knowledge about an orbital forging process in complete form. Content of the book is divided into three major chapters. After a short introduction to subject, the general characteristics of the forming processes, its classification and the development of technology were been presented in the first chapter. The important technical solutions of the machines and equipments for an orbital forming process were been presented, too. The next chapter presents design rules of the orbital forging technology. A particular attention is given to aspect of the forming, which is realised on the PXW press (PLASOMT) or T-series press (SCHMiD). The last chapter covers the technology and theory of the orbital forming of a bevel gear. In there, design rules and results of the theoretical and experimental research were been discussed. The numerical modelling of an orbital forging process is made by using FEM (finite elements method). The experiment is carried out on PXW press in the laboratory conditions. Presented process of a bevel gear forming is characterized in that it consists of connected treatments, which are realized stepwise on the one set of tools on PXW press. Additionally, an influence of changes the kind of upper die rocking motion and changes the dimensions of a workpiece were presented in this chapter.

