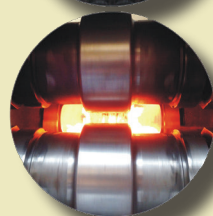
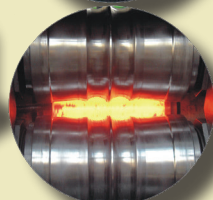
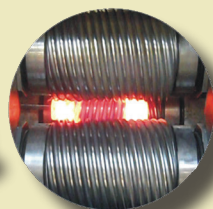
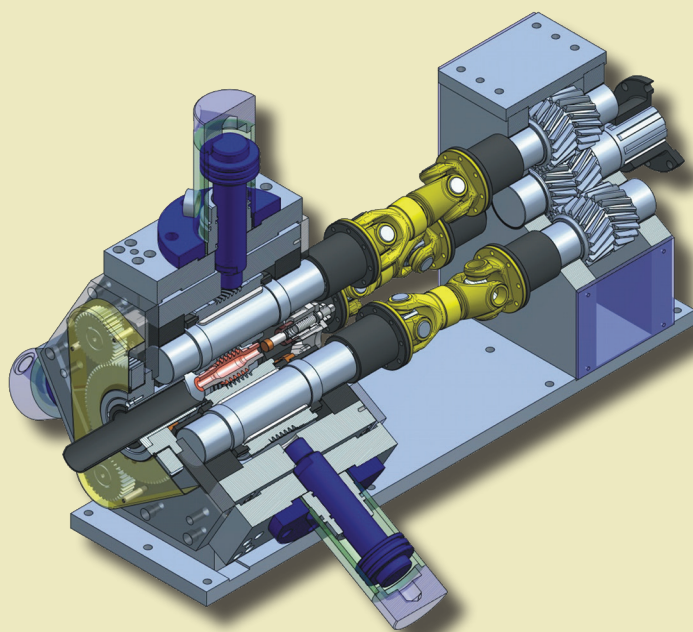




Janusz Tomczak

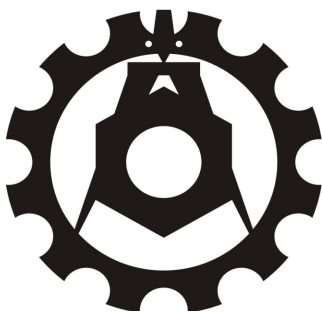
Studium procesów obciskania obrotowego odkuwek drążonych



MONOGRAFIE

Studium procesów obciskania obrotowego odkuwek drążonych

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Janusz Tomczak

Studium procesów obciskania obrotowego odkuwek drążonych



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Hadasik, Politechnika Śląska

Redakcja i skład: Janusz Tomczak

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-199-7

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

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

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

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

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract	8
1. Wstęp	9
2. Metody wytwarzania drążonych osi i wałów	11
2.1. Zgniatanie obrotowe	11
2.2. Walcowanie poprzeczno-klinowe	20
2.3. Kucie tradycyjne	26
2.4 Kucie w kowarkach	28
2.5. Kucie w kuźniarkach	36
2.6. Hydroforming (kształtowanie hydromechaniczne)	42
2.7. Procesy wyciskania wyrobów drążonych	51
2.8. Spin extrusion (wyciskanie obrotowe)	57
2.9. Innem metody kształtowania elementów drążonych	58
2.10. Podsumowanie przeglądu literatury	64
3. Cel, teza i uzasadnienie podjęcia tematu	67
4. Modelowanie numeryczne procesu obciskania obrotowego	69
4.1. Analiza MES procesu obciskania skrajnych stopni na elementarnych wałkach drążonych	71
4.2. Analiza MES procesu obciskania centralnych stopni na elementarnych wałkach drążonych	87
4.3. Modelowanie numeryczne procesu obciskania obrotowego odkuwki drążonego wałka wielostopniowego	99
4.4. Zjawiska ograniczające realizację procesu obciskania obrotowego...	108
5. Próby doświadczalne procesu obciskania obrotowego drążonych wałków stopniowanych	113
5.1. Stanowisko badawcze	113
5.2. Analiza wytrzymałościowa agregatu	119
5.3. Próby obciskania obrotowego na gorąco stopni skrajnych stalowych odkuwek drążonych	122
5.4. Próby obciskania obrotowego na zimno stopni skrajnych stalowych odkuwek drążonych	128

5.5. Próby obciskania na zimno i na gorąco odkuwek drążonych ze stopów aluminium	130
5.6. Próby obciskania obrotowego na gorąco stopni centralnych stalowych odkuwek drążonych	134
6. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z rezultatami badań doświadczalnych	139
6.1. Analiza porównawcza obciskania obrotowego skrajnych stopni odkuwek wałków drążonych	139
6.2. Analiza porównawcza obciskania obrotowego stopni centralnych odkuwek wałków drążonych	149
7. Przykłady zastosowania technologii obciskania obrotowego	157
7.1. Kształtowanie odkuwki stopniowanego wałka drążonego	157
7.1.1. Modelowanie numeryczne obciskania obrotowego drążonej odkuwki stopniowanego wałka napędowego	159
7.1.2. Próby doświadczalne obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka stopniowanego	164
7.1.3. Analiza wyników badań teoretyczno-doświadczalnych obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka stopniowanego	165
7.1.4. Próby doświadczalne obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka stopniowanego ze stopów metali nieżelaznych	168
7.2. Kształtowanie drążonych odkuwek sworzni kulistych	173
7.3. Obciskanie obrotowe odkuwek kul drążonych	179
8. Kierunki rozwoju technologii obciskania obrotowego odkuwek drążonych	185
8.1. Obciskanie obrotowe drążonych odkuwek wałków stopniowanych z uzwojeniami ślimaka	185
8.2. Kształtowanie drążonych odkuwek wałków stopniowanych z wieńcami uzębionymi	188
8.3. Obciskanie obrotowe w walcach śrubowych odkuwek stopniowanych pierścieni	190
8.4. Obciskanie obrotowe walcami mimośrodowymi odkuwek pierścieni..	193
8.5. Obciskanie obrotowe drążonych odkuwek na trzpieniu	196
Podsumowanie i wniosek	199
Literatura	203

Streszczenie

W monografii przedstawiono wyniki prac badawczych dotyczących nowatorskiej metody kształtowania drążonych odkuwek wałków stopniowanych z zastosowaniem wsadów rurowych. Analiza teoretyczna procesu obciskania obrotowego została wykonana w oparciu o metodę elementów skończonych (MES). Wykorzystując jeden z dostępnych na rynku pakiet oprogramowania MES (Simufact Forming). Obliczenia wykonano w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia, w trakcie których wyznaczono podstawowe parametry siłowe, energetyczne i kinematyczne procesu oraz określono możliwości wytwarzania odkuwek drążonych proponowaną technologią. Weryfikację doświadczalną opracowanej metody kształtowania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, stosując w tym celu własnej konstrukcji agregat kuźniczy do obciskania obrotowego.

Po krótkim wprowadzeniu w rozdziale drugim omówiono obecnie wykorzystywane w przemyśle metody wytwarzania wyrobów drążonych, charakteryzujących się symetrią osiową. Wskazano również obszary zastosowania elementów drążonych w budowie maszyn. Podsumowując przegląd literatury zaproponowano zastosowanie procesu obciskania obrotowego do kształtowania osiowosymetrycznych odkuwek drążonych. W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki wielowariantowych obliczeń numerycznych, wykonanych przy pomocy MES procesu obciskania obrotowego elementarnych wałków drążonych (ze skrajnymi i centralnymi stopniami) oraz odkuwki wałka wielostopniowego. Omówiono szczegółowo zjawiska zachodzące podczas kształtowania odkuwek oraz określono obszar parametrów, gwarantujących stabilny przebieg procesu. Zidentyfikowano również zjawiska ograniczające właściwy przebieg procesu. W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem materiałów rzeczywistych. Przedstawiono konstrukcję agregatu kuźniczego do obciskania obrotowego, który został wykonany na potrzeby badań według koncepcji autora. W kolejnym rozdziale porównano wyniki uzyskane w analizie numerycznej oraz podczas badań doświadczalnych. Rozdział siódmy poświęcono przedstawieniu możliwości technologicznych procesu obciskania obrotowego, na przykładzie kształtowania drążonych odkuwek wałków stopniowanych, sworzni kulistych oraz kul. W rozdziale ósmym omówiono kierunki rozwoju technologii obciskania obrotowego. Zaproponowano zastosowanie technologii do kształtowania między innymi drążonych odkuwek z uzwojeniami ślimaka, wieńcami zębatymi, wytwarzania na trzpieniu elementów z otworami kształtowymi. Ostatnia część opracowania dotyczy podsumowania wyników przeprowadzonych badań procesu obciskania obrotowego, w której przedstawiono końcowe wnioski. Podano również korzyści płynące z zastosowania opisanych procesów w przemyśle.

Abstract

This monograph reports the results of research on an innovative method for forming hollow stepped shafts from hollow billets. The theoretical analysis of the rotary compression process was performed by the finite element method (FEM) using the commercial FEM simulation software package Simufact Forming. The computations were performed in a three-dimensional state of strain and they involved determining basic parameters describing the forces, energy and kinematics of the process in order to verify whether the proposed forming method can be used for producing hollow parts. The proposed method was then verified in experimental tests performed under laboratory conditions at the Department of Computer Modelling and Metal Forming Technologies at the Lublin University of Technology. The experiments were conducted on a forging apparatus for rotary compression designed by the author of this monograph.

Following a brief introduction, Chapter 2 discusses current methods for producing hollow parts with axial symmetry. In addition, the applications for hollow parts in machine design are discussed. Summing up the survey of literature, it is proposed that axisymmetric hollow parts be produced by rotary compression. The next chapter reports the results of multivariant FEM numerical analyses of the rotary compression process for elementary hollow shafts (with end and central steps) and a multi-stepped shaft. Phenomena occurring during the forming process are discussed in detail, and the parameters ensuring stability of the process are determined. Moreover, failure modes occurring during the process are identified. Chapter 5 reports the results of experiments performed under laboratory conditions using real materials. It also describes the design of the forging apparatus for rotary compression constructed for the purposes of the research conducted by the author of this work. The subsequent chapter compares the numerical results and the experimental findings. Chapter 7 presents the technological capacity of the rotary compression process for producing such parts as stepped shafts, ball studs and balls. Chapter 8 discusses the trends in development of the rotary compression technology. It is proposed that this forming technique be used for forming hollow parts with screw coils or gears and mandrel-produced parts with shaped holes. The final part of the monograph offers concluding remarks on the research on the rotary compression process and its results. It also lists the advantages of applying the discussed process in industry.

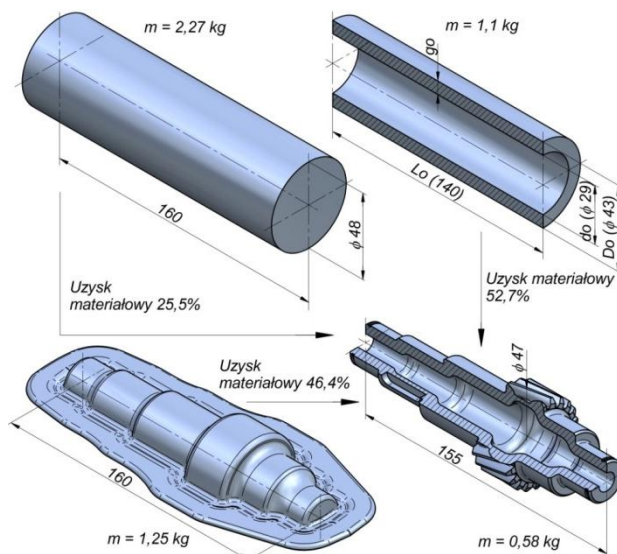
1. Wstęp

Drażone wałki i osie są obecnie szeroko spotykane w budowie maszyn. Znajdują one zastosowanie między innymi w układach napędowych maszyn, urządzeń i pojazdów. Duża popularność elementów drażonych wynika przede wszystkim z ich porównywalnych własności wytrzymałościowych w stosunku do odpowiedników pełnych (głównie przy obciążeniach momentem gnącym i skręcającym), przy jednoczesnym znacznym zredukowaniu masy. Obecnie głównym odbiorcą elementów drażonych jest przemysł motoryzacyjny i lotniczy, gdzie wyśrubowane normy ekologiczne oraz ciągle wzrastające ceny paliwa zmuszają konstruktorów do poszukiwania rozwiązań, pozwalających z jednej strony poprawić sprawność silników, zaś z drugiej strony obniżyć masę całej konstrukcji. W rezultacie możliwe jest ograniczenie zużycia paliwa oraz emisji szkodliwych substancji do otoczenia, przy jednoczesnej poprawie osiągów technicznych (moc, prędkość, ładowność, zwrotność itp.), co pozwala obniżyć koszty eksploatacji pojazdów. Elementy drażone są także coraz częściej stosowane w przemyśle maszynowym (wałki drażone przekładni zębatych, silników elektrycznych, elementy przeniesienia napędu obrabiarek, wrzeciona obrabiarek i inne), gdzie dzięki zredukowaniu masy można zmniejszyć siły bezwładności i w efekcie poprawić parametry użytkowe maszyn i urządzeń. Masę konstrukcji można również obniżyć dzięki zastosowaniu lekkich materiałów, takich jak stopy aluminium, magnezu i tytanu, a także poprzez zmniejszenie wymiarów gabarytowych dzięki zastosowaniu materiałów wysokowytrzymałych. Na uwagę zasługuje również fakt, że wymienione metody obniżania masy konstrukcji można ze sobą łączyć, a mianowicie wytwarzać elementy drażone z lekkich materiałów lub stali o wysokich własnościach wytrzymałościowych.

W przypadku maszyn i pojazdów, elementy drażone znajdują zastosowanie głównie jako wałki napędowe w skrzyniach biegów i przekładaniach zębatych, półosie w układach napędowych pojazdów oraz wałki silników elektrycznych. Porównując wytrzymałość na skręcanie wału pełnego i drażonego ustalono, że zwiększając średnicę zewnętrzną wału drażonego (o grubości ścianki wynoszącej $\frac{1}{3}$ jego średnicy zewnętrznej) o 7,5% uzyskuje się porównywalną wytrzymałość z wałem pełnym. Pozwala to jednocześnie na zmniejszenie masy w stosunku do wału pełnego o około 36% [11].

Masowość produkcji elementów drażonych powoduje, że ich półfabrykaty kształtowane są z wykorzystaniem procesów obróbki plastycznej, a często nawet z zastosowaniem wsadów rurowych, pozostawiając niewielkie naddatki na wykańczającą obróbkę mechaniczną [80, 126]. Taki proces produkcji elementów

drążonych pozwala na zmniejszenie materiałochłonności procesu wytwarzania (w stosunku do metod obróbki skrawaniem), a także na polepszenie własności wytrzymałościowych (zachowanie ciągłości włókien materiału). Jednak większość obecnie stosowanych metod kształtowania plastycznego półfabrykatów i wyrobów drążonych charakteryzuje się dużym stopniem skomplikowania procesu [11, 50, 110]. Powoduje to wzrost nakładów finansowych na wdrożenie technologii, a następnie na realizację samego procesu. W rezultacie takie technologie stają się opłacalne dopiero przy dużych seriach produkcyjnych. Poprawy efektywności procesu wytwarzania należy upatrywać w zastosowaniu niekonwencjonalnych technologii, pozwalających na efektywne kształtowanie wyrobów drążonych z półfabrykatów rurowych już przy niewielkich seriach produkcyjnych (rys. 1.1). Takie podejście pozwoli uzyskać korzyści dwojakiego rodzaju: zmniejszyć koszty produkcji dzięki obniżeniu zużycia materiałów, energii, narzędzi i nakładów robocizny, a z drugiej strony pozwoli poprawić parametry użytkowe maszyn, dzięki obniżeniu ich masy całkowitej.



Rys. 1.1. Zestawienie zużycia materiału podczas wytwarzania drążonego wałka

Na zakończenie autor chciałby złożyć wyrazy wdzięczności wszystkim tym, którzy przyczynili się do powstania prezentowanego opracowania. W szczególności podziękowania należą się pracownikom Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, którzy czynnie uczestniczyli w badaniach i wspierali autora swoim bogatym doświadczeniem. Osobne wyrazy wdzięczności kierowane są do recenzenta monografii – prof. dr hab. inż. Eugeniusza Hadasika, którego cenne uwagi i spostrzeżenia wpłynęły na ostateczną postać opracowania.

Autor

2. Metody wytwarzania drążonych osi i wałów

Drążone osie i wały obecnie wykonuje się w oparciu o cztery techniki wytwarzania: skrawanie, kształtowanie plastyczne, odlewanie oraz metalurgię proszków [35, 188]. Zastosowanie określonej technologii warunkowane jest szeregiem czynników, spośród których najważniejsze znaczenie mają takie jak: wielkość serii produkcyjnych, przeznaczenie, własności wytrzymałościowe, masa, rodzaj materiału, cena [48, 120]. Skrawanie jest wykorzystywane w przypadku produkcji jednostkowej oraz jako obróbka wykańczająca półfabrykatów ukształtowanych innymi metodami. Odlewanie i metalurgia proszków znalazły zastosowanie głównie przy wykonywaniu specyficznych grup wyrobów w dość ograniczonym zakresie.

Liczne publikacje na temat wytwarzania elementów drążonych szczególną uwagę zwracają na technologie obróbki plastycznej, które w stosunku do innych metod charakteryzują się dużą wydajnością, możliwością poprawy własności wytrzymałościowych oraz obniżeniem materiało- i energochłonności procesu produkcyjnego.

Do głównych metod wytwarzania wyrobów drążonych bazujących na procesach obróbki plastycznej zalicza się [50, 83, 110]:

- zgniatanie obrotowe rzutowe i wydłużające,
- walcowanie poprzeczno-klinowe,
- kucie tradycyjne,
- kucie w kowarkach,
- kucie w kuźniarkach,
- hydroforming (kształtowanie hydromechaniczne),
- wyciskanie,
- wyciskanie i zgrzewanie tarciove,
- wyciskanie i głębokie wiercenie,
- spin extrusion (wyciskanie obrotowe),
- inne metody.

2.1. Zgniatanie obrotowe

Technologie zgniatania obrotowego należą do rotacyjnych procesów obróbki plastycznej. Jeszcze do niedawna stosowane były głównie w produkcji wyrobów cienkościennych. Jednak szereg zalet, głównie w odniesieniu do konkurencyjnych metod tłoczenia spowodował, że procesy kształtowania obrotowego zostały

zaimplementowane również do produkcji stopniowanych wałków drążonych. Głównymi zaletami metod kształtowania obrotowego są [40, 157]:

- niewielkie siły kształtowania, związane z miejscowym oddziaływaniem narzędzi na materiał, a tym samym lokalnym odkształcaniem materiału,
- lepsze właściwości wytrzymałościowe wyrobów w stosunku do elementów skrawanych i odlewanych,
- mniejsze koszty narzędzi w stosunku do innych technologii, co czyni proces opłacalny już przy produkcji jednostkowej,
- możliwość kształtowania wyrobów z trudno odkształcalnych materiałów dzięki zastosowaniu miejscowego podgrzewania.

Klasyfikację metod kształtowania obrotowego przedstawiono na rys. 2.1. Zgodnie z podanym schematem, metody kształtowania obrotowego dzieli się na wyoblanie, kształtowanie hybrydowe oraz zginiatanie obrotowe. Z uwagi na tematykę opracowania, w schemacie pominięto szczegółową klasyfikację metod wyoblania, które jest stosowane głównie do wytwarzania elementów cienkościennych. Zginiatanie obrotowe, w którym podczas kształtowania dochodzi do zamierzonej redukcji grubości ścianki wyrobu można podzielić na zginiatanie obrotowe rzutowe oraz wydłużające. Cechy charakterystyczne dla procesów wyoblania i zginiatania obrotowego rzutowego oraz wydłużającego przedstawiono w tabeli 2.1 [31-33].

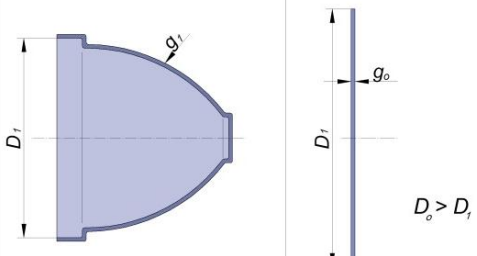
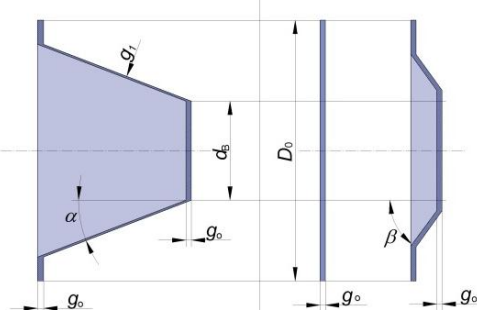
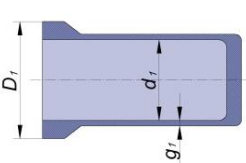
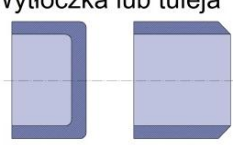


Rys. 2.1. Klasyfikacja procesów kształtowania obrotowego [40]

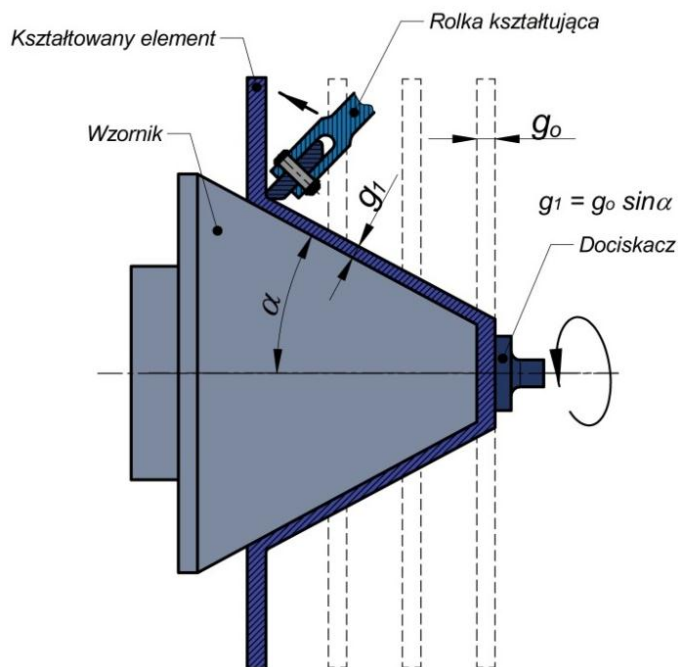
Zgodnie z danymi zamieszczonymi w tabeli 2.1, podczas wyoblania nie dochodzi do zamierzonej zmiany grubości ścianki kształtowanego elementu, tak jak w przypadku zginiatania obrotowego. W procesach zginiatania obrotowego materiałem wyjściowym mogą być oprócz blaszanych krążków również grubościennne tuleje oraz wytłoczki.

Schemat procesu zgniatania obrotowego rzutowego pokazano na rys. 2.2. W początkowym etapie procesu krążek blachy zaciskany jest między wzornikiem, a dociskaczem. Następnie wzornik i dociskacz oraz zaciśnięty między nimi wsad wprawiane są w ruch obrotowy. W tym czasie rolka kształtująca dociska materiał do wzornika i jednocześnie porusza się wzdłuż jego tworzącej, kształtując stopniowo materiał na wzorniku. Proces ten nazywany jest zgniataniem obrotowym rzutowym, ponieważ w trakcie kształtowania dochodzi do założonej redukcji grubości ścianki materiału obrabianego. Dodatkowo materiał obrabiany w trakcie kształtowania jest rzutowany za pomocą rolki kształtującej na wzornik, przyjmując jego kształt.

Tab. 2.1. Schemat przedstawiający różnice między wyoblaniem a procesami zgniatania obrotowego [163]

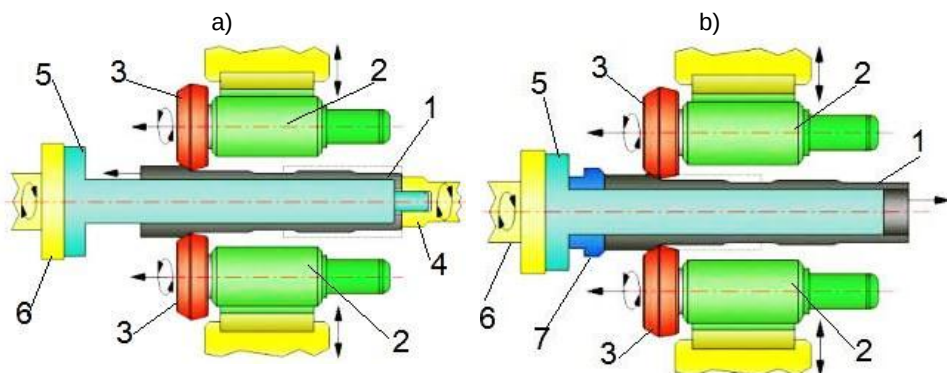
Proces		Kształt półfabrykatu	Grubość ścianki
Zgniatanie obrotowe	Wyoblanie		$g_o = g_1$
	Zgniatanie rzutowe		w obszarze bazowym $g_o = g_1$ w obszarze odkształconym $g_1 = g_o \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
	Zgniatanie wydłużające		Wytłoczka lub tuleja  w obszarze odkształconym $g_1 = \frac{1}{2}(D_1 - d_1)$

Zgniatanie obrotowe wydłużające może być realizowane według dwóch schematów: współbieżnego oraz przeciwbieżnego. Schemat procesów zgniatania obrotowego współbieżnego oraz przeciwbieżnego pokazano na rys. 2.3. Zgniatanie obrotowe wydłużające jest procesem obróbki bezwiórowej realizowanym głównie na zimno i służącym do produkcji precyzyjnych wyrobów drążonych bez szwu. W tym procesie kształtowany półfabrykat – 1 umieszczony jest na trzpieniu – 5, który zamocowany jest we wrzecionie obrabiarki – 6. Po uruchomieniu maszyny, wrzeciono – 6 obraca się wraz z trzpieniem – 5, materiałem obrabianym – 1 oraz w przypadku wydłużania współbieżnego również z dociskaczem – 4. Do kształtowania kolejnych stopni na półfabrykacie służą rolki kształtujące – 3, zamocowane w suporcie obrabiarki – 2. Typowe maszyny do zgniatania obrotowego wydłużającego wyposażone są w trzy rolki kształtujące – 3, rozmieszczone na obwodzie półfabrykatu co 120°, które w trakcie kształtowania wykonują ruch obrotowy. Wydłużanie półfabrykatu oraz kształtowanie kolejnych stopni drążonej odkuwki możliwe jest dzięki wyposażeniu maszyny w trzy suporty – 2, które mogą jednocześnie przemieszczać się w kierunku osiowym (wzdłuż osi kształtowanego materiału) oraz w kierunku promieniowym (prostopadle do osi kształtowanego materiału). Do przemieszczania suportów – 2 wykorzystywany jest napęd hydrauliczny lub mechanizm śrubowo – tocny. Sterowanie suportów – 2 realizowane jest najczęściej numerycznie (CNC).



Rys. 2.2. Schemat procesu zgniatania obrotowego rzutowego [78]

W trakcie zgniatania obrotowego wydłużającego można zredukować grubość ścianki nawet o 90% w stosunku do grubości wyjściowej. Wydłużanie materiału może być realizowane w jednym przejściu (mniejsze wartości gniotu) lub w kilku przejściach. Liczba przejść uzależniona jest od stopnia redukcji grubości ścianki, zastosowania międzyoperacyjnej obróbki cieplnej (wyżarzanie) oraz możliwości technologicznych maszyny.

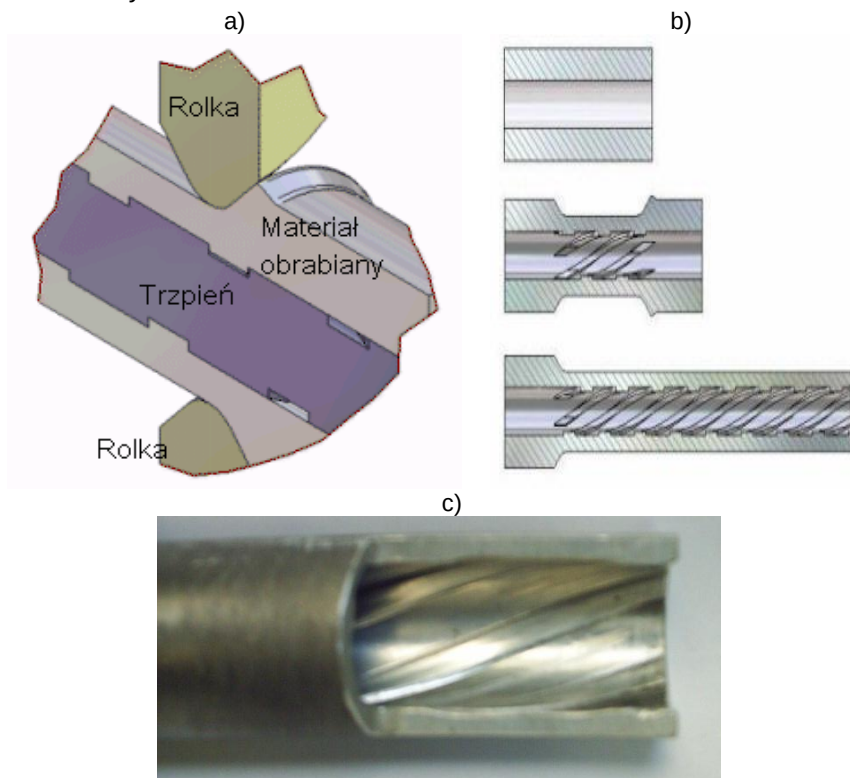


Rys. 2.3. Schemat procesu zgniatania obrotowego wydłużającego: a) współbieżnego, b) przeciwbieżnego – (opis w tekście) [167]

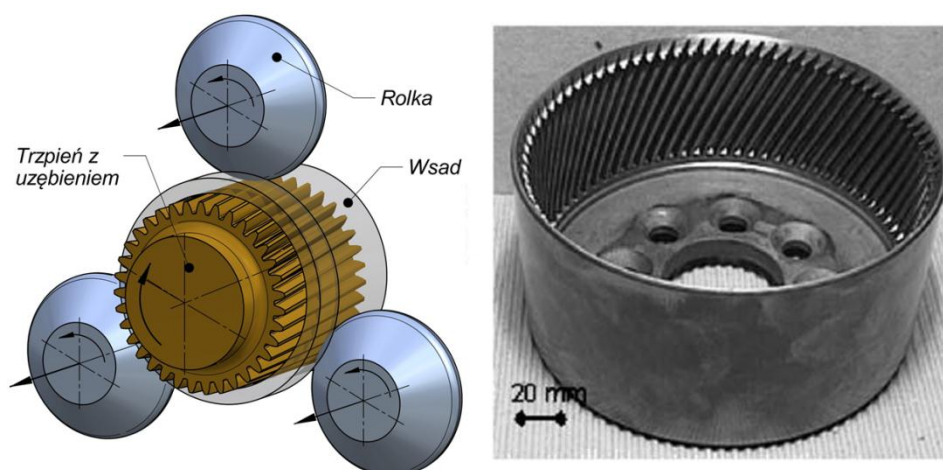
Zgniatanie obrotowe współbieżne (rys. 2.3a) służy do produkcji wyrobów częściowo lub całkowicie zamkniętych z jednej strony. W tej metodzie kształtowany półfabrykat – 1 mocowany jest do trzpienia – 5 za pomocą dociskacza – 4. Podczas odkształcania materiał wydłuża się w kierunku zgodnym z kierunkiem osiowego ruchu suportu – 2. Podczas zgniatania obrotowego przeciwbieżnego wytwarzane są wyroby z otworem przelotowym na całej długości wyrobu. W tej odmianie zgniatania materiał obrabiany mocowany jest do trzpienia – 5 za pomocą uzębionego pierścienia – 7, który służy również do usuwania obrobionego materiału z trzpienia – 7 po zakończonym procesie. Wydłużanie obrabianego materiału – 1 w tej metodzie przebiega w kierunku przeciwnym do kierunku osiowego ruchu suportu – 2.

W procesie zgniatania obrotowego wydłużającego oprócz obróbki zewnętrznej powierzchni wsadu, możliwe jest również kształtowanie powierzchni wewnętrznej półfabrykatów dzięki zastosowaniu odpowiedniego trzpienia kształtowego [30, 41, 49, 114–116, 119, 187]. Na rys. 2.4 pokazano schemat procesu redukowania średnicy zewnętrznej z jednoczesnym wygniataciem bruzd śrubowych w lufach broni palnej. Podczas zgniatania dochodzi do wydłużania materiału, w trakcie którego następuje ukształtowanie wewnętrznych występów. Technologia zgniatania obrotowego wydłużającego może być zastosowana również do kształtowania bardziej złożonych elementów, takich jak koła z uzębieniami wewnętrznymi. W takim przypadku do wytwarzania uzębień wewnętrznych stosowane są trzpienie uzębione. Schemat procesu kształtowania

uzębień wewnętrznych wraz z przykładowym kołem wykonanym tą technologią pokazano na rys. 2.5.



Rys. 2.4. Schemat procesu gwintowania lufy: a), kolejne etapy wydłużania gwintowanej lufy b) oraz przykład gwintowanej lufy c) [167]



Rys. 2.5. Schemat procesu zgniatania obrotowego kół zębatach z uzębieniem wewnętrznym oraz przykład koła zębatego wykonanego tą technologią [43]

Realizacja procesu zgniatania obrotowego wymaga zastosowania maszyn o sztywnej konstrukcji. Obecnie na rynku można spotkać wiele typów maszyn służących do zgniatania obrotowego wydłużającego. W tych maszynach ruch suportów z zamocowanymi na nich rolkami kształtującymi jest w pełni zautomatyzowany i sterowany numerycznie. Głównymi elementami maszyn do zgniatania obrotowego są: wrzeciono wprawiające w ruch obrotowy kształtowany materiał, klatka rolek kształtujących, w której może znajdować się w zależności od wielkości maszyny od 2 do 6 rolek. Rolki kształtujące mocowane są w suportach, które zapewniają im możliwość przemieszczania się liniowego w kierunku osiowym i promieniowym zgodnie z zadaniem przez operatora programem. W przedniej części maszyn znajduje się konik z obrotową tuleją, który służy do dociskania obrabianego materiału do trzpienia podczas obróbki współbieżnej. Przykładową maszyną do zgniatania obrotowego wydłużającego z czterema rolkami kształtującymi, która może pracować według schematu zgniatania współbieżnego i przeciwbieżnego przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Typowa maszyna do zgniatania obrotowego wydłużającego firmy MJC Engineering and Technology, Inc. oraz przykłady elementów w niej wytwarzanych [177]

Parametry techniczne maszyn do zgniatania obrotowego wydłużającego, produkowanych przez MJC Engineering and Technology, Inc. zestawiono w tabeli 2.2. Innymi wiodącymi producentami maszyn do zgniatania obrotowego wydłużającego są między innymi: Repkon Machine and Tool Industry & Trade Inc. oraz Global Metal Spinning Solutions, Inc. DENN USA Metal Forming.

Tab. 2.2. Parametry techniczne maszyn do zgniatania obrotowego firmy MJC Engineering and Technology, Inc. [177]

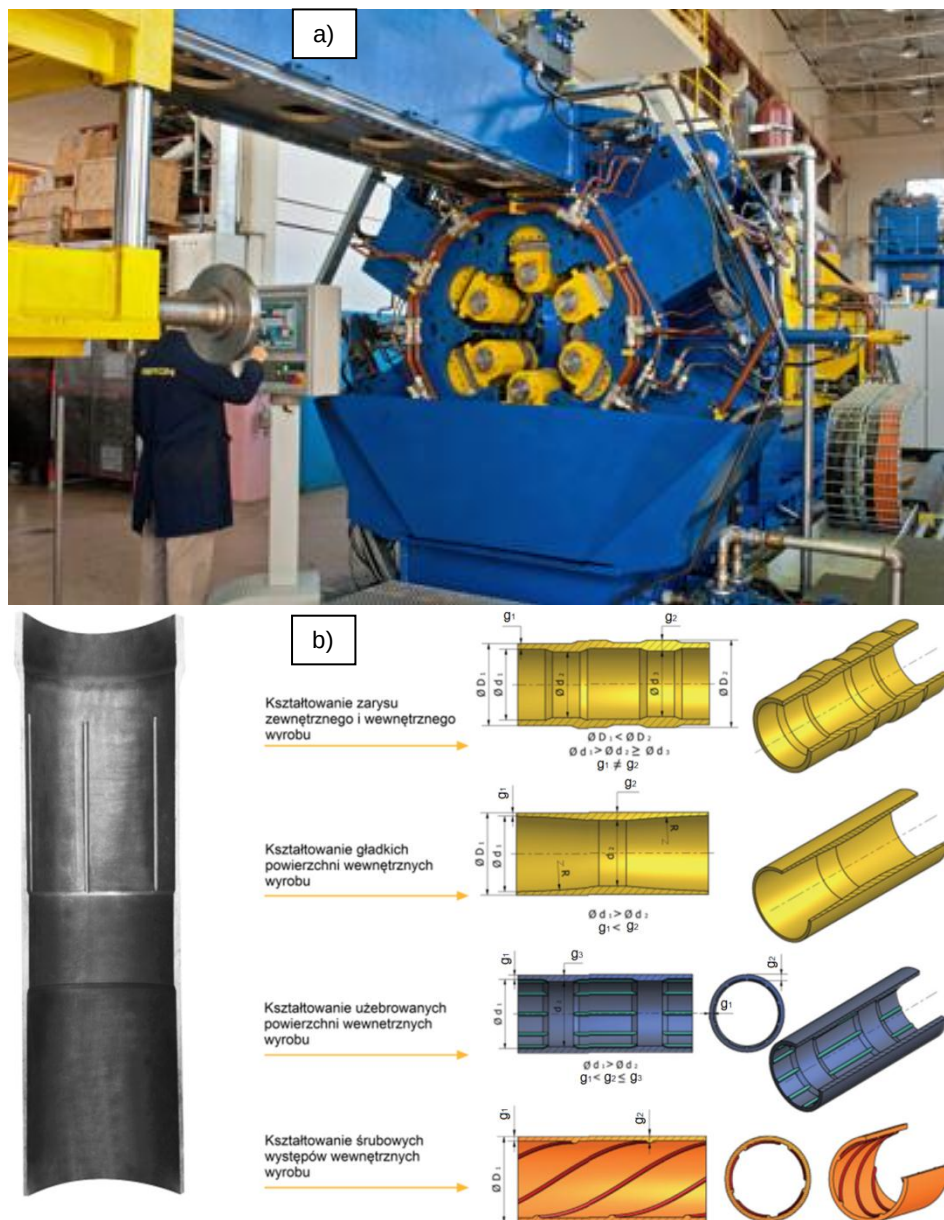
Model	MJC F450.2000-4	MJC F450.3000-4	MJC F600.2000-4	MJC F1200.2300-4
Maksymalna długość wyrobu przy wydłużaniu współbieżnym, mm	2000	3000	2000	2000
Maksymalna długość wyrobu przy wydłużaniu przeciwbieżnym, mm	4000	6000	4000	4500
Zakres średnic półfabrykatów, mm	50-450	50-450	200-600	35-1200
Prędkość obrotowa wrzeciona, obr/min	800	600	600	500
Maksymalna siła nacisku rolki w kierunku promieniowym, kN	400	400	400	650
Maksymalna siła nacisku rolki w kierunku osiowym, kN	500	500	500	1000
Skok rolki w kierunku promieniowym, mm	200	200	200	350
Skok rolki w kierunku osiowym, mm	2200	3200	2200	2300
Maksymalna prędkość rolki w kierunku osiowym, m/min	10	10	10	1,5
Maksymalna siła dociskacza, kN	147	147	147	300

Ciekawe rozwiązanie układu rolek roboczych zostało zastosowane w maszynach do zgniatania obrotowego oferowanych przez firmę Repkon. W zależności od średnicy kształtowanego materiału, proces zgniatania może być realizowany z wykorzystaniem sześciu rolek (większe średnice elementów) lub trzech rolek (mniejsze średnice elementów) (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Położenie rolek kształtujących w maszynach do zgniatania obrotowego firmy Repkon [178]

Taka konstrukcja suportu narzędziowego zwiększa wydajność i możliwości technologiczne maszyny. Przykładową maszyną do zginięcia obrotowego RFFM 645-472 firmy Repkon, wraz z możliwym do kształtowania asortymentem wyrobów pokazano na kolejnym rys. 2.8. Natomiast w tabeli 2.3 zestawiono Ważniejsze parametry techniczne maszyn firmy Repkon do zginięcia obrotowego wydłużającego.



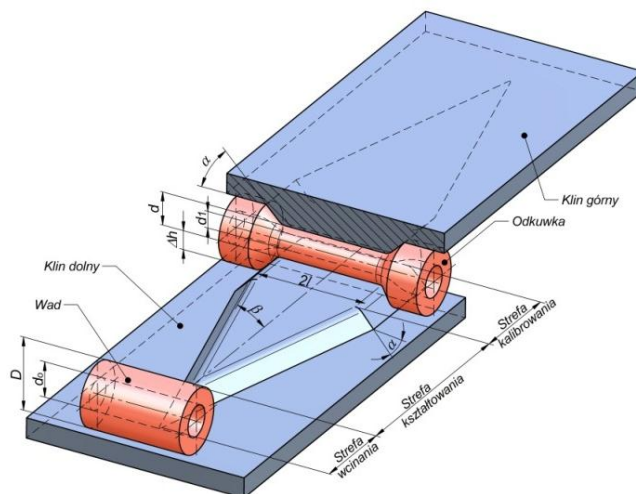
Rys. 2.8. Maszyna do zginięcia obrotowego wydłużającego firmy Repkon – model RFFM 645-472 – a) oraz przykładowe wyroby kształtowane na tej maszynie – b) [178]

Tab. 2.3. Parametry techniczne maszyn do zgniatania obrotowego firmy Repkon [178]

Wielkość maszyny			RFFM330-192	RFFM645-472		RFFM670-377	
Liczba narzędzi		szt.	3	3	6	3	6
Średnica wsadu	Ø max	mm	300	450		700	
	Ø min	mm	40	40	220	50	270
Końcowa długość wyrobu	przód	mm	2500	3000		3000	
	tył	mm	5000	6000		6000	
	swobodna	mm	2500	2500		2500	

2.2. Walcowanie poprzeczno-klinowe

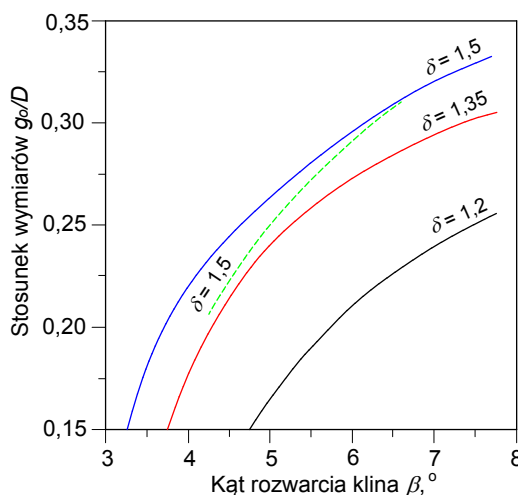
Walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) jest procesem plastycznego kształtowania stopniowanych wałów i osi, które charakteryzuje symetria osiowa [34-40]. Odkształcanie materiału w procesie WPK jest realizowane za pomocą narzędzi w kształcie klinów. Narzędzia te mogą być mocowane na walcach lub płaskich płytach walcarek. Schemat procesu walcowania porzecznno-klinowego odkuwek drążonych dwoma narzędziami płaskimi przedstawiono na rys. 2.9. Pokazane na tym schemacie podstawowe parametry geometryczne procesu to: kąt kształtowania α , kąt rozwarcia klina β , średnica wsadu D , średnica kształtowanego stopnia wałka d , średnica początkowa otworu d_0 , średnica otworu po walcowaniu d_1 oraz długość odcinka walcowanego $2l$.

**Rys. 2.9.** Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego narzędziami płaskimi [111]

Typowe narzędzia do walcowania porzecznno-klinowego mają kształt klina, w którym można wyróżnić trzy strefy: wcinania, kształtowania oraz kalibrowania. W pierwszej strefie narzędzia kształtują w materiale wsadu przewężenie

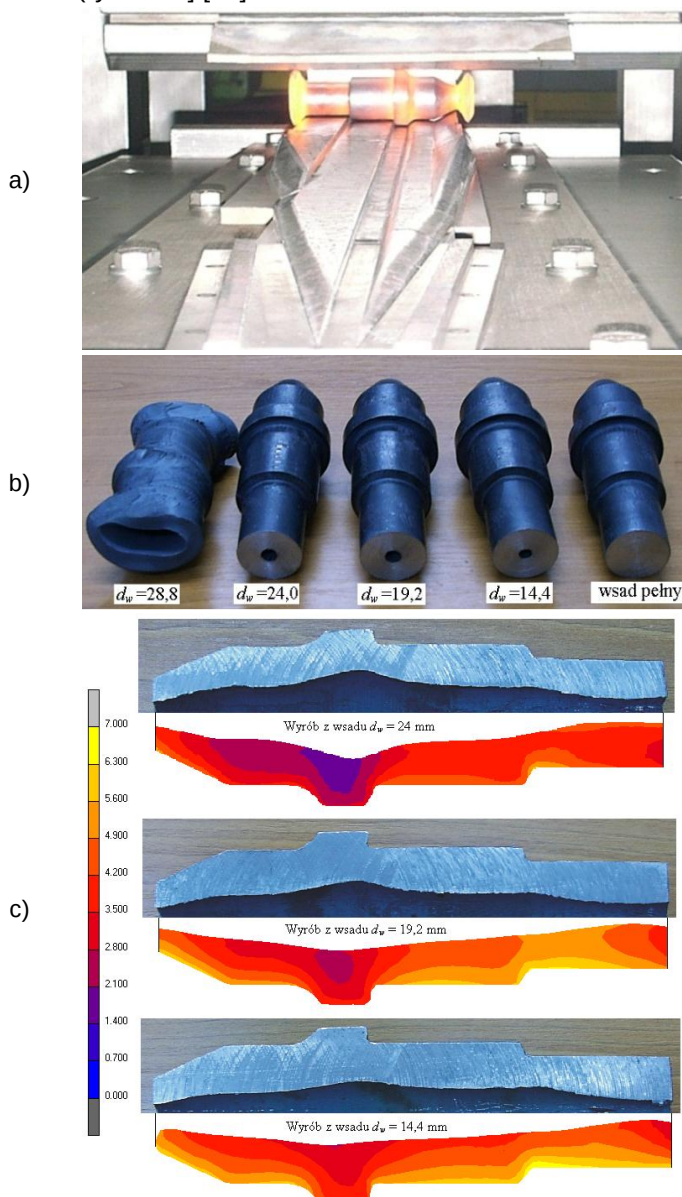
o średnicy d walcowanego stopnia odkuwki. W tym etapie procesu dochodzi do rozdzielenia wsadu na dwie symetryczne części (sytuacja z rys. 2.9). W strefie kształtowania powierzchnie boczne klina stopniowo rozpychają materiał w kierunku powierzchni czołowych, aż do osiągnięcia zakładanej długości $2l$ kształtowanego stopnia odkuwki. W strefie kalibrowania usuwane są nieprawidłowości kształtu powstałe we wcześniejszych fazach walcowania [21, 85, 87].

Obecnie walcowanie poprzeczno-klinowe stosowane jest głównie do wytwarzania odkuwek osiowosymetrycznych z wsadów litych [88, 91, 93, 107-109]. Wsadem w procesach WPK mogą być również rury i tuleje. Jednak walcowanie wsadów drążonych w procesach WPK jest znacznie trudniejsze do realizacji i obarczone niebezpieczeństwem pojawienia się zjawisk zakłócających stabilny przebieg procesu [111]. Geometria narzędzi do WPK wyrobów drążonych, jaki i litych determinowana jest poprzez kształt walcowanej odkuwki oraz wielkość kątów kształtowania α i rozwarcia klina β . Wpływ wielkości kątów α i β na przebieg procesu WPK jest bardzo istotny, gdyż decyduje m.in.: o stabilności procesu, wartości sił występujących podczas walcowania, możliwości tworzenia się pęknięć w strefie osiowej walcowanego wyrobu. Kąt rozwarcia klina β determinuje bezpośrednio długość poszczególnych stref narzędzi kształtujących. Pierwsze prace dotyczące procesu walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów drążonych miały miejsce w byłym ZSRR [112]. Według zaleceń Celikova proces walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów drążonych powinien być realizowany przy kącie kształtującym $\alpha = 45^\circ$. W celu wyznaczenia maksymalnej wartości kąta β autor ten opracował wykres (rys. 2.10) przedstawiający zależność kąta β od względnej grubości ścianki g_o/D (g_o – grubość wsadu, D – średnica zewnętrzna wsadu) oraz stopnia gniołu $\delta = D/d$.



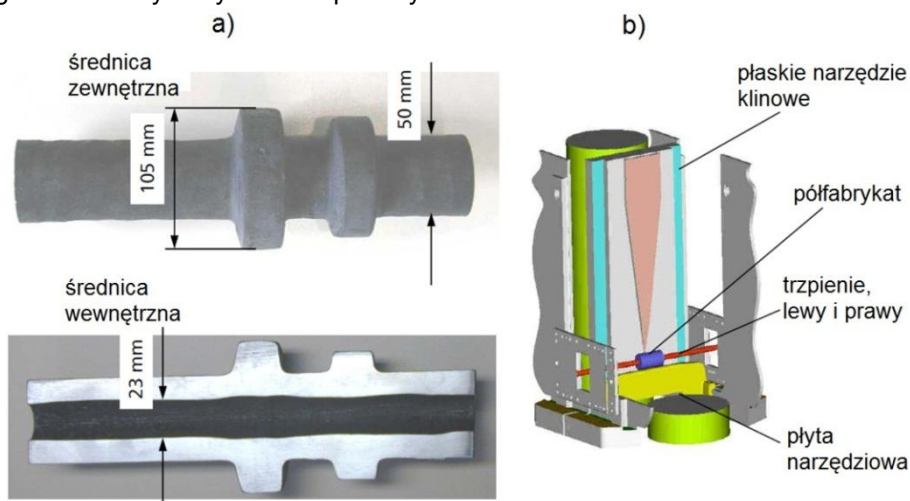
Rys. 2.10. Dopuszczalne wartości kąta β w zależności od stosunku wymiarów wsadu g_o/D oraz stopnia gniołu δ [26]

Większość prac badawczych, opisujących próby WPK wyrobów drążonych, wskazuje na ograniczone możliwości tej technologii w kształtowaniu elementów z wsadów rurowych (zwłaszcza o niewielkich grubościach ścianek). Bartnicki w rozprawie doktorskiej pokazuje na przykładzie WPK drążonych korpusów noży obrotowych ograniczenia procesu wynikające z zastosowania wsadu o zbyt małej grubości ścianki (rys. 2.11) [15].



Rys. 2.11. WPK odkuwek drążonych noży obrotowych z wsadów rurowych o różnych grubościach ścianki: a) przebieg procesu, b) ukształtowane odkuwki, c) zmiana grubości odkuwek z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia [15]

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na zadowalającą dokładność geometryczną ukształtowanych odkuwek jedynie przy zastosowaniu wsadów o większych grubościach względnych ścianek ($g_0/D > 0,3$), co ze względu na wysoki koszt półfabrykatów (konieczność wykonywania tulei grubościennych), wyklucza efektywne wykorzystanie tej technologii na skalę przemysłową. Podejmowane były również przemysłowe próby WPK odkuwek drążonych na trzpieniu, m.in. w Instytucie Naukowym im. Fraunhofera w Chemnitz. Kształtowane w układzie pionowym odkuwki wielostopniowych wałków drążonych przy pomocy płaskich narzędziami pokazano na rys. 2.12. Charakteryzują się one dużą wartością stopnia gniotu δ oraz regularnym (zbliżonym do cylindrycznego) kształtem otworu. Jednak i w tym przypadku poważnym ograniczeniem procesu jest brak dostępności handlowych półfabrykatów do walcowania (rur grubościennych, dla których $g/D > 0,3$). W rezultacie wysoki koszt przygotowania wsadu do procesu powoduje jego ograniczone wykorzystanie w przemyśle.



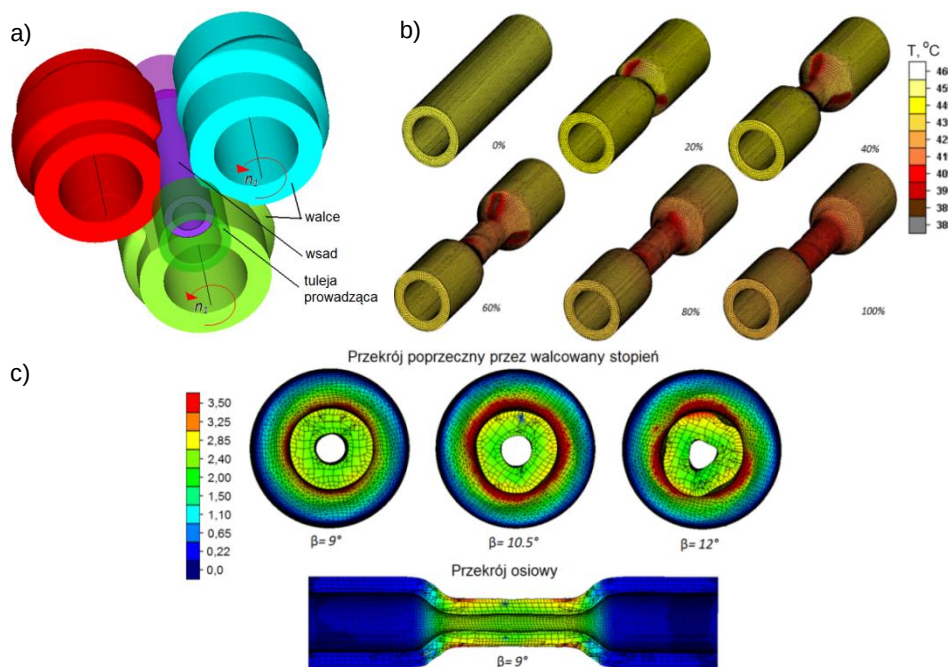
Rys. 2.12. WPK odkuwek drążonych: a) ukształtowana odkuwka, b) schemat procesu [84]

Szereg publikacji dotyczących procesu WPK odkuwek drążonych poświęconych jest zjawiskom zakłócającym stabilny przebieg procesu [10,12, 98, 124, 153, 185, 186]. Do głównych ograniczeń można zaliczyć między innymi większe niebezpieczeństwo powstawania niekontrolowanych poślizgów, wywołane mniejszą sztywnością walcowanego materiału w stosunku do wsadu pełnego, deformację i zgniecenie przekroju poprzecznego, rozwałcowanie ścianki odkuwki, prowadzące do owalizacji przekroju poprzecznego, pocienienie ścianki w obszarze kształtowanych stopni, brak możliwości walcowania odkuwek z wsadów cienkościennych [95]. Przykładowe wady drążonych przedkuwek zaworów walcowanych narzędziami klinowymi pokazano na rys. 2.13 [46].



Rys. 2.13. Wady odkuwek drążonych kształtowanych w procesie WPK [46]

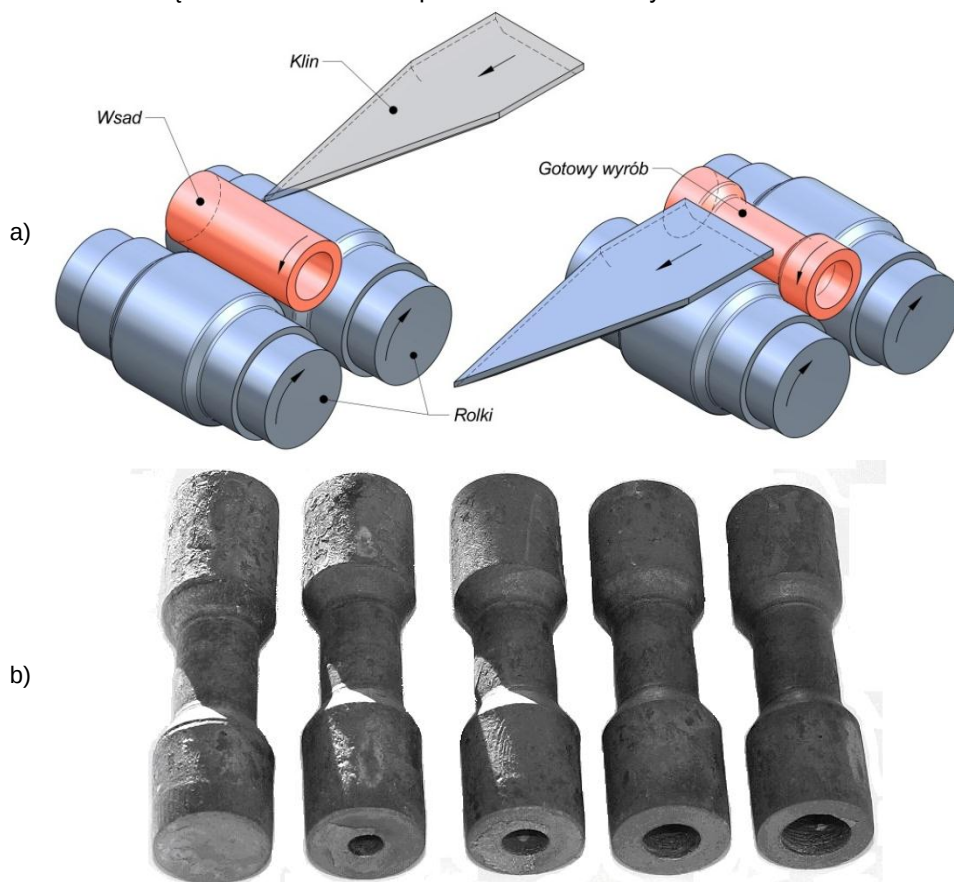
Mankamenty walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek drążonych można częściowo wyeliminować poprzez zmianę schematu kształtowania na trójwalcowy (rys. 2.14). W rezultacie zwiększa się stabilność procesu, możliwe jest kształtowanie odkuwek o mniejszych grubościach względnych ścianek oraz zmniejsza się niebezpieczeństwo deformacji przekroju poprzecznego półfabrykatów [12].



Rys. 2.14. Wyniki analizy numerycznej WPK trzema narzędziami odkuwek drążonych ze stopu Al: a) model procesu, b) progresja kształtu z zaznaczonym rozkładem temperatury, c) kształt stopni odkuwki odwalcowanych przy różnych parametrach geometrycznych narzędzi [12]

Jednak i w tym przypadku występują ograniczenia procesu, które powodują, że technologia WPK trzema wałcami ma czysto teoretyczny charakter. Do tych wad można zaliczyć między innymi ograniczenie minimalnej średnicy walcowanej odkuwki, która uzależniona jest od średnicy narzędzi ($D/d < 6$, gdzie D – średnica narzędzi, d – minimalna średnica odkuwki). Przeszkodą w rozpowszechnieniu tej technologii jest również brak na rynku maszyn do walcowania trzema wałcami, a także duży stopień ich skomplikowania, wpływający na większy koszt takich walcarek.

Podejmowano również próby walcowania odkuwek drążonych przy pomocy narzędzi klinowo-rolkowych (rys. 2.15). W takim procesie rurowy półfabrykat podparty jest na dwóch napędzanych rolkach, zaś walcowanie realizuje się jednym płaskim narzędziem w kształcie klina. W wyniku wcinania się powierzchni klinowych narzędzia we wsad następuje redukowanie jego średnicy. Materiał przemieszcza się osiowo w kierunku powierzchni czołowych.

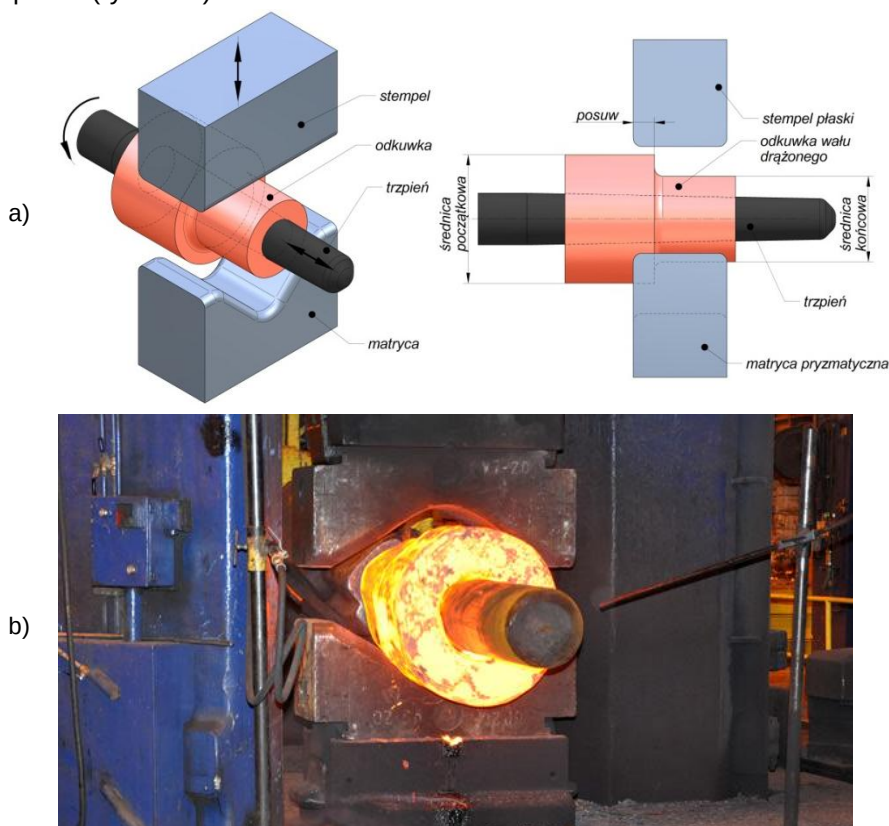


Rys. 2.15. Walcowanie klinowo-rolkowe wyrobów drążonych: a) schemat procesu, b) ukształtowane odkuwki wałków elementarnych z półfabrykatów o różnych grubościach ścianki [19]

W efekcie odkuwka w czasie kształtowania ulega wydłużeniu, a grubość ścianki w strefie oddziaływania narzędzi zmniejsza się. Prowadzi to do osłabienia wyrobu w miejscu walcowanego stopnia i wymusza stosowanie wsadów grubościennych. Przeprowadzone badania wykazały, że minimalna grubość ścianki wsadu, przy której proces WKR przebiega prawidłowo powinna być większa od $0,2D$ [19]. Ponadto kształt elementów walcowanych według takiego schematu jest stosunkowo prosty i ogranicza się do jednego przewężenia centralnego, bądź dwóch przewężeń skrajnych.

2.3. Kucie tradycyjne

W przypadku drążonych odkuwek wałów stopniowanych, charakteryzujących się dużymi wymiarami gabarytowymi niezastąpionym procesem ich wytwarzania jest kucie tradycyjne (swobodne lub półswobodne) [39, 44, 117, 118, 123, 162, 179]. W celu ukształtowania otworu, proces taki oprócz spęczniania i wydłużania składa się z operacji dziurowania wlewka, a następnie wydłużania tulei na trzpieniu (rys. 2.16).

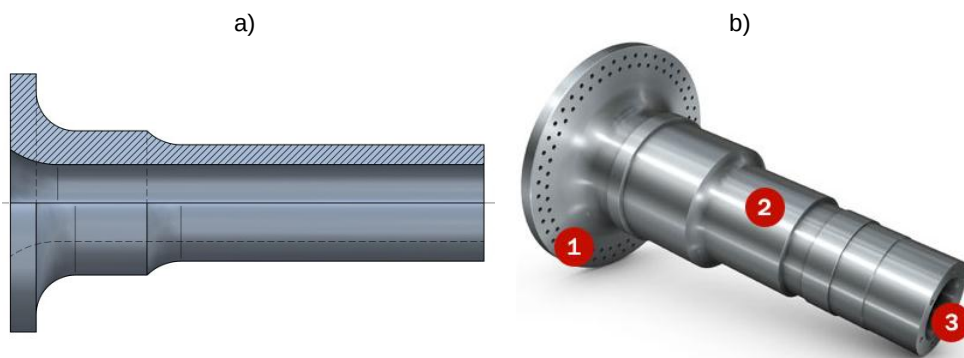


Rys. 2.16. Kucie swobodne odkuwki wału drążonego: a) schemat procesu wydłużania na trzpieniu, b) realizacja procesu w warunkach przemysłowych [162, 179]

Proces kucia odkuwek wałów drążonych jest znacznie trudniejszy do zrealizowania w stosunku do kształtowania odkuwek pierścieni i krótkich tulei oraz długich wałów pełnych. Największym problemem jest zapewnienie osiowego płynięcia kształtowanego materiału na długim trzpieniu. W tym celu wykorzystuje się pryzmatyczne kowadła, które montowane są w przestrzeni roboczej prasy hydraulicznej. Pochyłe powierzchnie kowadeł podczas zginięcia materiału zapobiegają rozkuwaniu wsadu w kierunku obwodowym, jednocześnie wymuszając jego osiowe płynie (wydłużanie materiału) (rys. 2.16).

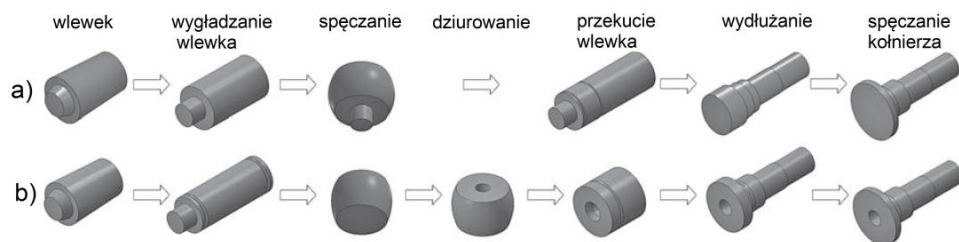
Zastosowanie dolnego kowadła pryzmatycznego, a górnego płaskiego (rys. 2.16a) jest korzystniejsze, gdyż ułatwia usuwanie trzpienia z kształtowanej odkuwki i zapobiega zaciskaniu kształtowanego materiału na trzpieniu [162].

Pomimo większych nakładów robocizny podczas kucia odkuwek drążonych w stosunku do procesu kształtowania półfabrykatów pełnych, obecnie procesy te znajdują coraz szersze zastosowanie. Przykładem może być proces kucia odkuwek drążonych wałów głównych turbin wiatrowych (rys. 2.17), w którym zastąpienie wału pełnego odpowiednikiem drążonym, pozwoliło zmniejszyć masę elementu aż o 37% (z 21,2 ton do 13,2 ton) [58].



Rys. 2.17. Drążony wał główny turbiny wiatrowej: a) odkuwka wału, b) wał po obróbce mechanicznej; 1 – tarcza mocowania głowicy łopaty, 2 – stopnie zewnętrzne wału, 3 – otwór [58, 183]

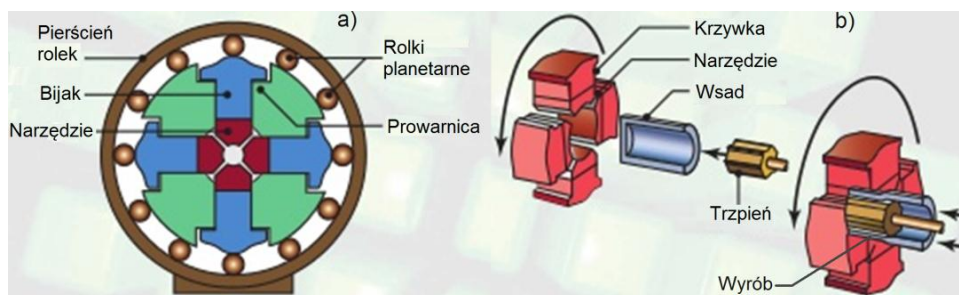
Przykładowy przebieg procesu kucia swobodnego odkuwki wału głównego (pełnego i drążonego) pokazano na rys. 2.18. W większości przypadków odkuwki wałów turbin wiatrowych wykonywane są jako pełne, a technologia kucia najczęściej prowadzona jest według schematu pokazanego na rys. 2.18a. Poprzez zmianę konstrukcji odkuwki na drążoną oraz samej technologii kucia (rys. 2.18b), możliwe jest zmniejszenie masy wlewka wsadowego, oraz poprawa własności wytrzymałościowych elementu w wyniku równomiernego przekucia materiału [123]. Pozwoliło to na zmniejszenie grubości ścianek wału i dalsze obniżenie jego masy.



Rys. 2.18. Przykładowy proces kucia swobodnego odkuwki wału głównego turbiny wiatrowej: a) pełnej, b) drążonej [123]

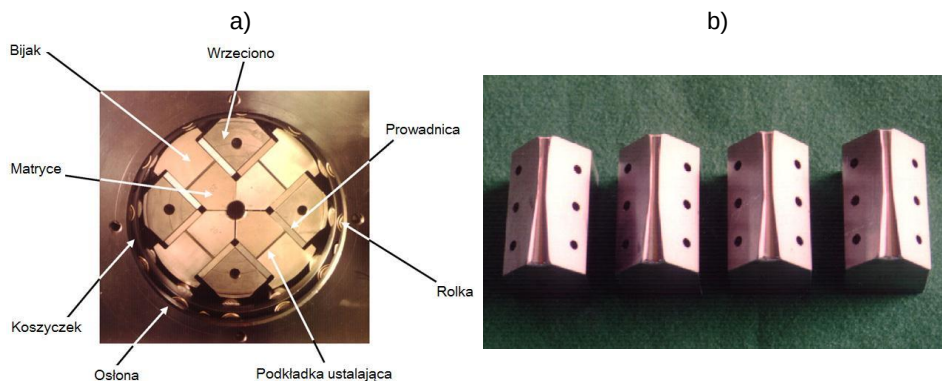
2.4. Kucie w kowarkach

Kucie w kowarkach jest specjalną odmianą kucia rotacyjnego, w której kształt wyrobu uzyskuje się przez zginięcie materiału uderzeniami kowadełek, następującymi po sobie z dużą częstotliwością. Proces stosowany jest głównie do redukcji przekrojów poprzecznych wyrobów i uzyskania żądanych kształtów na przekrojach poprzecznych, a także ukształtowania wewnętrznych otworów w przypadku elementów drążonych. Kowarki, w zależności od charakteru pracy elementów roboczych oraz ich konstrukcji można podzielić na trzy grupy: rotacyjne, mimośrodowo – korbowe oraz hydrauliczne [158]. Schemat kształtowania na trzpieniu otworu z wielowypustem w kowarce rotacyjnej pokazano na rys. 2.19. Półfabrykatem w procesie jest tuleja, wewnątrz której umieszczony jest trzpień, odwzorowujący zarys otworu. Tuleję wraz z trzpieniem umieszcza się między narzędziami, które wraz z bijakami i prowadnicami wirują dookoła osi półfabrykatu. Głowica narzędziowa kowarki podparta jest na rolkach, które toczą się po bieżni wewnętrznej pierścienia oraz bieżni zewnętrznej, znajdującej się na części cylindrycznej prowadnic, wprawiając w ruch postępowy bijaki. Częstotliwość uderzeń bijaków uzależniona jest od prędkości wirowania głowicy narzędziowej oraz liczby rolek. Kowarki rotacyjne charakteryzują się prostą konstrukcją oraz niewielkimi wymiarami gabarytowymi. Przeznaczone są głównie do kształtowania na zimno wyrobów osiowoosymetrycznych z prętów i rur.



Rys. 2.19. Schemat kucia w kowarce rotacyjnej: a) schemat głowicy narzędziowej, b) schemat procesu kształtowania otworu z wielowypustem na trzpieniu [169, 180]

Elementami roboczymi kowarek są matryce, które położone są koncentrycznie wokół kształtowanego elementu. Zazwyczaj jeden zestaw matryc składa się od dwóch do ośmiu segmentów, w zależności od wielkości i przeznaczenia kowarki. W trakcie kształtowania segmenty wykonują ruch posuwisto zwrotny w kierunku promieniowym z częstotliwością od 1500 do 10000 skoków na minutę. Całkowita wartość skoku jaką może wykonać segment podczas jednego cyklu wynosi od 0,2 do 5 mm [171]. Szczeliny między segmentami podczas kucia w kowarkach mogą powodować wypływkę wzdłuż osi kształtowanej odkuwki. Aby uniknąć tego niekorzystnego zjawiska wymagany jest względny ruch obrotowy pomiędzy segmentami i obrabianym materiałem. W tym wypadku ruch obrotowy wokół osi odkuwki mogą wykonywać segmenty narzędziowe lub alternatywnie przedmiot obrabiany, który jest obracany między segmentami. Przy kuciu wyrobu o przekroju niekołowym, zarówno segmenty jak i kształtowany element nie wykonują ruchu obrotowego. Widok głowicy kowarki rotacyjnej oraz zestaw czterech segmentów do zginięcia półfabrykatów rurowych pokazano na rys. 2.20.



Rys. 2.20. Narzędzia do kucia w kowarkach: a) widok ogólny głowicy kowarki z zamocowanymi narzędziami, b) segmenty do zginięcia rury [59]

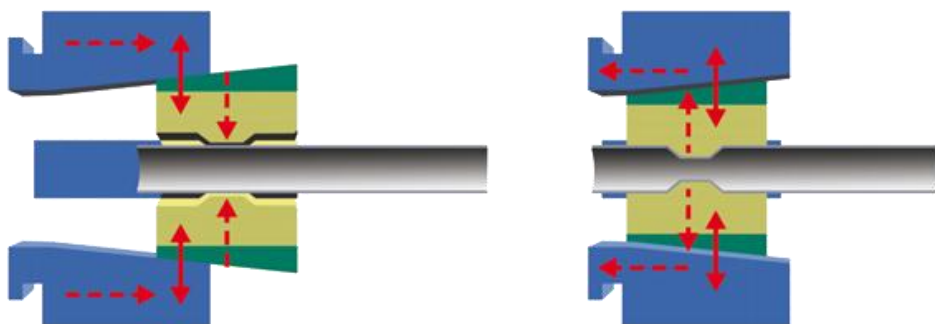
Dokładność wykonania odkuwek kutech w kowarkach jest znacznie większa niż w przypadku stosowania odpowiednich procesów konwencjonalnych. Gładkość powierzchni części kutech w kowarkach w dużej mierze zależy od: gatunku obrabianego materiału, wartości odkształcenia, stosunku prędkości posuwu materiału do częstotliwości uderzeń matryc oraz chropowatości materiału wyjściowego [60]. W porównaniu do procesów konwencjonalnych, procesy kucia w kowarkach charakteryzują się szeregiem zalet. Najważniejsze z nich to [171]:

- **Produkcja „near net shape”.** Wyroby kute w kowarkach posiadają bardzo dużą dokładność, dzięki czemu dalsza obróbka wykańczająca w wielu przypadkach nie jest wymagana. Umożliwia to znaczne oszczędności materiałowe, a także zmniejszenie liczby operacji technologicznych, co powoduje obniżenie ceny jednostkowej wyrobu.

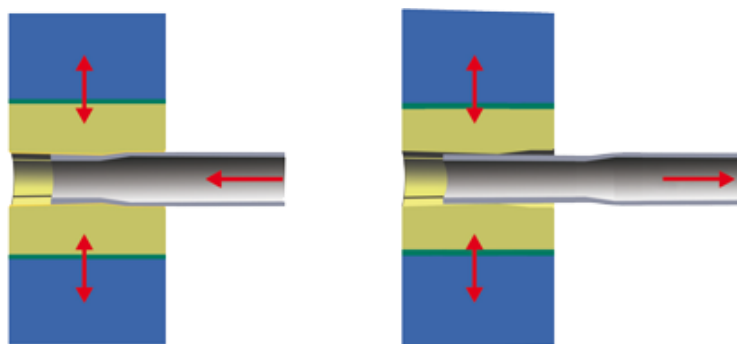
- **Szeroki zakres zastosowań.** W procesie kwaremowym można wytwarzać wiele rodzajów odkuwek o zróżnicowanych kształtach zewnętrznych, jaki i wewnętrznych (wyroby drążone). Oszczędności materiałowe wynoszą od 30 do 50% w porównaniu do odpowiednich procesów konwencjonalnych. Proces może być realizowany w warunkach obróbki plastycznej na zimno, ciepło i na gorąco.
- **Wysoka jakość odkuwek.** Polepszenie własności mechanicznych kształtowanych wyrobów oraz zachowanie ciągłości włókien.
- **Duży wskaźnik odkształcenia.** Kucie w kowarkach pozwala uzyskać duże wartości odkształceń bez konieczności stosowania obróbki w podwyższonych temperaturach (na ciepło i gorąco). Korzystny rozkład naprężeń oraz jednorodny charakter dokszałceń pozwala kształtować materiały o niskiej plastyczności.
- **Przyjazność środowisku.** W odróżnieniu od innych procesów wytwarzania, kucie w kowarkach nie wymaga stosowania środków smarnych nakładanych na powierzchnie obrabianego materiału. W przypadku stosowania oleju, jeśli jest to wymagane, smarowanie realizowane jest w obiegu zamkniętym.
- **Uniwersalność.** Czas potrzebny do przebrożenia kowarki jest bardzo krótki. Wymiana narzędzi i ustawienie maszyny realizowane jest w ciągu kilku minut.
- **Krótki czas produkcji oraz wysokie wskaźniki efektywności.** Konstrukcja kowarek umożliwia stosowanie modułów połączonych w jedną wysoko wydajną linię, tak aby ostateczny kształt wyrobu można było uzyskać w krótkim czasie. Wytrzymała i łatwa w obsłudze konstrukcja kowarek zapewnia wysoki współczynnik sprawności dla tych maszyn.

Kucie w kowarkach może być realizowane według dwóch podstawowych sposobów kształtowania. Pierwszy sposób, zwany zgniataniem promieniowym, (rys. 2.21) polega na kuciu za pomocą segmentów, których kształt i długość części roboczej odpowiada kształtowi i długości obrabianej odkuwki. Drugi sposób, nazwany zgniataniem promieniowo – posuwowym (rys. 2.22), ma miejsce, gdy długość części roboczej segmentów jest mniejsza od długości obrabianej strefy odkuwki, a kształtowanie odbywa się poprzez odpowiednie skojarzenie ruchu segmentów i materiału obrabianego.

Odkuwki drążone w zależności od kształtu i dokładności mogą być wykonywane poprzez kucie swobodne lub na trzpieniu. Kucie swobodne odkuwek drążonych z wsadu rurowego powoduje zwiększenie grubości ścianki. W celu utrzymania stałej grubości ścianki oraz uzyskania odpowiedniej dokładności i chropowatości otworu wewnętrznego proces kucia powinien być realizowany na trzpieniu.



Rys. 2.21. Schemat procesu zginięcia promieniowego [176]



Rys. 2.22. Schemat procesu zginięcia promieniowo – posuwowego [176]

Procesy kucia w kowarkach są szeroko rozpowszechnione w przemyśle. Przykładowo firma Heinrich Müller Maschinenfabrik GmbH zajmuje się produkcją szerokiej gamy odkuwek kutych w kowarkach dla przemysłu motoryzacyjnego, maszynowego oraz lotniczego. W swojej ofercie posiada również kowarki oraz oprzyrządowanie niezbędne do realizacji procesów technologicznych opierających się na tych maszynach. Przykładowe odkuwki drążone kute na kowarkach w warunkach firmy Heinrich Müller Maschinenfabrik GmbH przedstawiono na rys. 2.23. Kowarki rotacyjne z uwagi na prostą konstrukcję i niezawodność działania są najczęściej spotykanymi maszynami tego typu na rynku. Produkowane są między innymi przez takie firmy jak: Felss GmbH, HMP Umformtechnik GmbH, Metalltechnik Menges GmbH, Torrington Forming Machinery INC, J.B. Machining Inc, Glyne Manufacturing Inc, Fenn-Power i inne. W zależności od stopnia zautomatyzowania spotyka się maszyny manualne, w których kształtowany półfabrykat podawany jest ręcznie. Są one stosowane głównie do kształtowania prostych elementów, lokalnego zakuwania tulei oraz wydłużania prętów na zimno. Występują również maszyny w pełni zautomatyzowane, wyposażone w układy sterowania numerycznego, które przeznaczone są do precyzyjnego kucia złożonych geometrycznie wyrobów, takich jak stopniowane wałki pełne i drążone.

Przemysł motoryzacyjny



Przemysł maszynowy

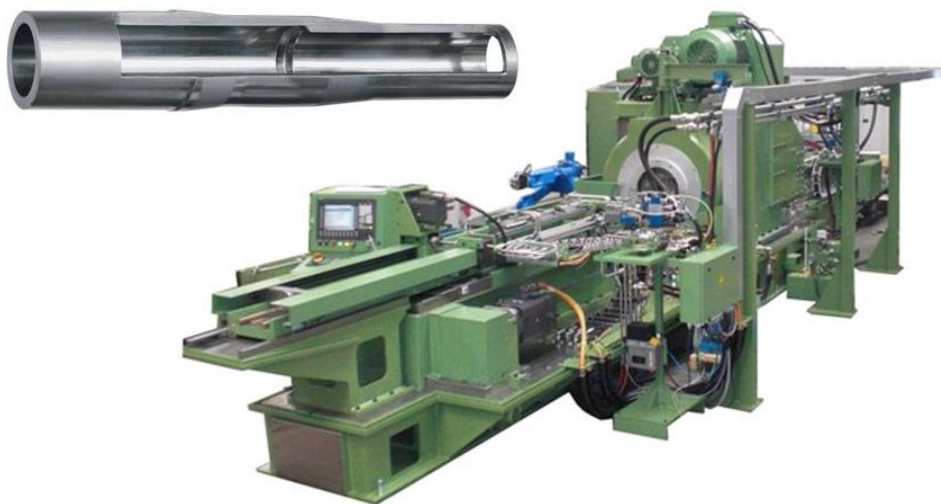


Przemysł lotniczy



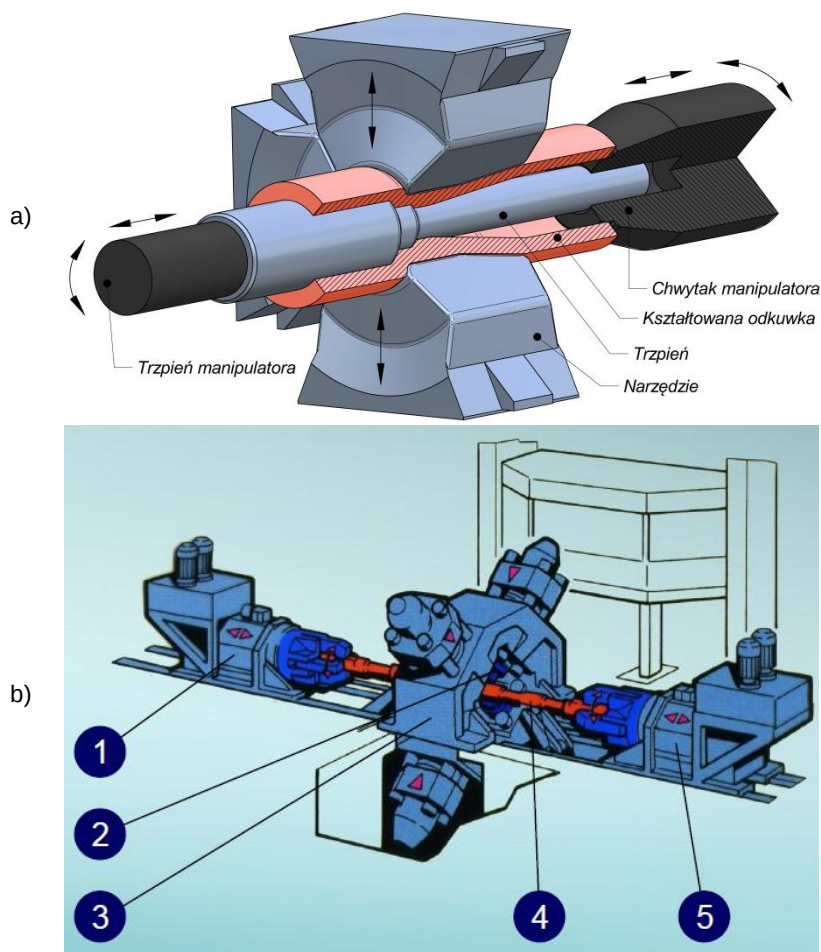
Rys. 2.23. Odkuwki drążone kute w kowarkach w warunkach firmy Heinrich Müller Maschinenfabrik GmbH [171]

Przykład kowarki rotacyjnej sterowanej numerycznie firmy HMP typu URS-10-4-DD-55-LH-CNC pokazano na rys. 2.24. Maszyna wyposażona jest w ramię robota, który dostarcza półfabrykaty do przestrzeni roboczej, gdzie są mocowane w tulei zaciskowej, a po zakończonym procesie usuwa ukształtowane elementy z kowarki. W tego typu kowarce można kształtować elementy pełne o średnicy od 10–65 mm oraz drążone od 12–110 mm i długościach dochodzących do 2500 mm [171].



Rys. 2.24. Kowarka rotacyjna typu URS-10-4-DD-55-LH-CNC, sterowana numerycznie firmy HMP [171]

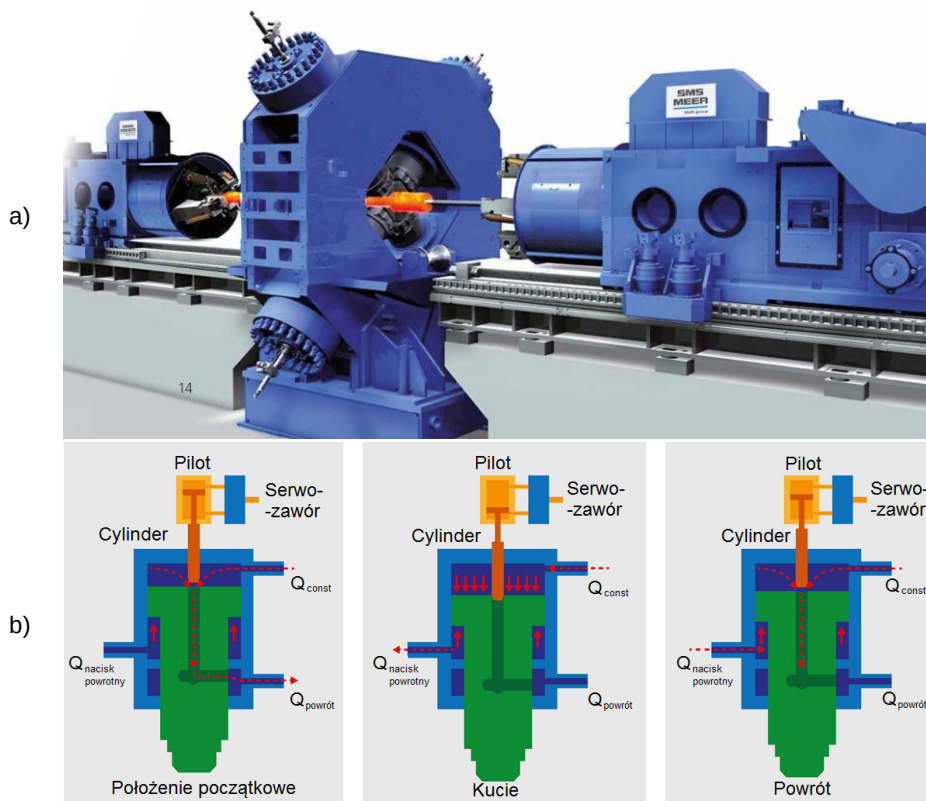
W przypadku kucia wielkogabarytowych elementów stosuje się kowarki o hydraulicznym napędzie narzędzi. Maszyny tego typu umożliwiają kształtowanie głównie na gorąco elementów o średnicach przekraczających 1000 mm i długościach do kilkunastu metrów. W odróżnieniu od kowarek rotacyjnych, narzędzia wykonują jedynie ruch postępowo-zwrotny, natomiast kształtowany półfabrykat wykonuje ruch postępowy (wzdłuż swojej osi) oraz obrotowy lub wahadłowy dookoła swojej osi (rys. 2.25). Zastosowanie napędu hydraulicznego pozwala na uzyskanie mniejszej częstotliwości uderzeń bijaków (od 200 do 300 skoków na min.) i jednocześnie znacznie większych sił nacisku narzędzi na materiał (do 22 MN). Z uwagi na wielkość kutej elementów, półfabrykaty mocowane są dwustronnie w uchwytach manipulatorów (przedniego i tylnego), których prędkość i położenie są ze sobą ściśle sprzężone i najczęściej sterowane numerycznie.



Rys. 2.25. Kucie w kowarce z narzędziami stacjonarnymi: a) schemat procesu kucia tulei na trzpień, b) schemat kowarki hydraulicznej: 1 – manipulator tylny, 2 – narzędzie, 3 – zespół roboczy, 4 – kształtowana odkuwka, 5 – manipulator przedni [182]

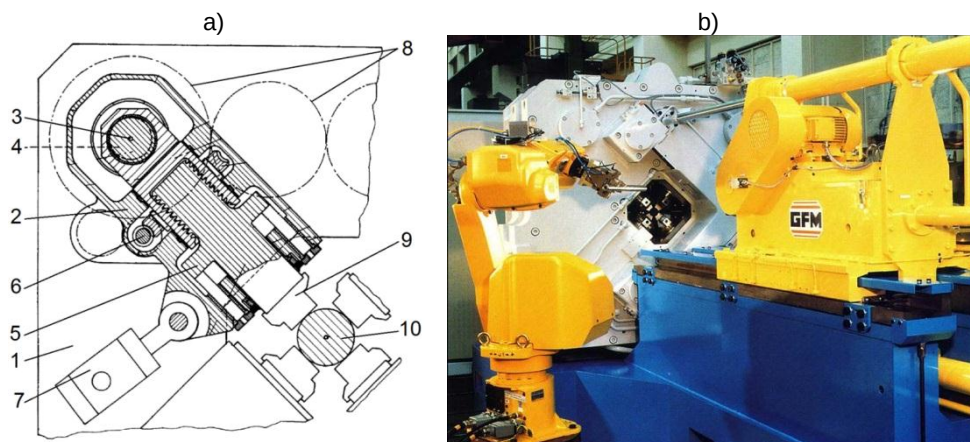
Do wiodących producentów kowarek o napędzie hydraulicznym można zaliczyć takie firmy jak: SMS Meer oraz GFM. Przykładową maszynę o napędzie hydraulicznym z serii SMX, oferowaną przez firmę SMS Meer i przeznaczoną do kucia obrotowego na gorąco pokazano na rys. 2.26. Każdy z czterech bijaków kowarki napędzany jest własnym cylindrem hydraulicznym, przy czym mogą one pracować synchronicznie lub niezależnie. Do sterowania przepływem cieczy do cylindrów wykorzystuje się serwo-zawory umieszczone w pokrywach cylindrów (rys. 2.26b). Materiał w czasie kucia utrzymywany jest w szczękach dwóch manipulatorów, które mają możliwość osiowego przemieszczania się po prowadnicach maszyny. Prędkości liniowe manipulatorów oraz prędkości obrotowe chwytaków zsynchronizowane są z prędkościami narzędzi, a ich sterowanie odbywa się numerycznie. Pozwala to na uzyskanie dużej precyzji

kucia. Kowarka umożliwia kształtowanie elementów pełnych oraz drążonych na trzpieniu o średnicach półfabrykatu od 200 do 1100 mm, przy minimalnej średnicy kształtowanego wyrobu od 40 do 120 mm. Długość kutych elementów może dochodzić do 18000 mm i ich masa do 10000 kg.



Rys. 2.26. Kowarka o napędzie hydraulicznym serii SMX firmy SMS Meer – a) oraz układ sterowania przepływem cieczy w cylindrach hydraulicznych – b) [182]

Ciekawe rozwiązanie konstrukcyjne kowarek wprowadziła firma GFM (rys. 2.27). Przeznaczone są one do kucia rotacyjnego zarówno na zimno, jak i na gorąco stopniowanych wałów (pełnych i drążonych). Maszyny tego typu wyposażone są w cztery stacjonarne bijaki, które napędzane są przy pomocy sprzężonych ze sobą mechanizmów korbowych (rys. 2.27a). Dzięki zastosowaniu korbowego układu napędowego narzędzia mogą pracować z częstotliwością dochodzącą do 1600 uderzeń na minutę (w zależności od wielkości maszyny). Naciski wywierane przez narzędzia mogą osiągać wartość do 4 MN. Kowarki tego typu są stosowane do kształtowania półfabrykatów w zakresie średnic wsadów od 60 do 270 mm i masie dochodzącej do 1200 kg. W trakcie kucia, wsad jest zamocowany w chwytaku manipulatora, który synchronicznie do ruchu narzędzi obraca i przesuwa materiał w przestrzeni roboczej maszyny.



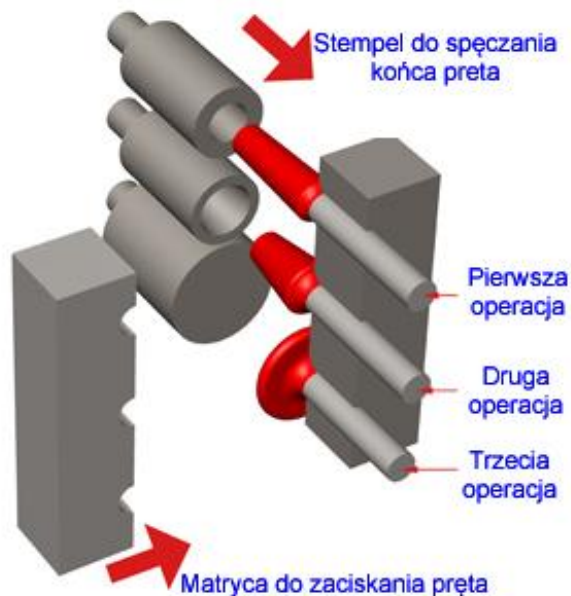
Rys. 2.27. Kowarka o napędzie korbowym: a) schemat układu napędowego, b) widok maszyny serii SKK firmy GFM: 1 – korpus, 2 – zespół bijaka, 3 – wał mimośrodowy, 4 – mimośród, 5 - bijak, 6 – przekładnia ślimakowa, 7 – siłownik hydrauliczny, 8 – przekładnia zębata, 9 – narzędzie, 10 – kształtowany element [38, 164]

2.5. Kucie w kuźniarkach

Jednym z procesów kucia, który umożliwia kształtowanie odkuwek z otworami przelotowymi, zarówno z wykorzystaniem wsadu pełnego, jak i rurowego jest technologia kucia w kuźniarkach. Kuźniarki są prasami mechanicznymi o napędzie korbowym, które mają dwa suwaki, poruszające się względem siebie pod kątem prostym. Na rys. 2.28 przedstawiono schemat kucia w kuźniarce. Nagrzany do temperatury kucia materiał umieszcza się w pierwszym wykroju matrycy stałej. Po uruchomieniu kuźniarki następuje zaciśnięcie materiału między matrycami (w układzie poziomym lub pionowym). Następnie koniec zaciśniętego pręta jest spęczany przez stempel, poruszający się w układzie poziomym. Procesy kucia w kuźniarkach najczęściej realizuje się w kilku operacjach (rys. 2.28 przedstawia spęczanie końca pręta w trzech operacjach).

Procesy kucia odkuwek drążonych w kuźniarkach charakteryzują się szeregiem zalet [158, 159, 168], spośród których do najważniejszych można zaliczyć, takie jak:

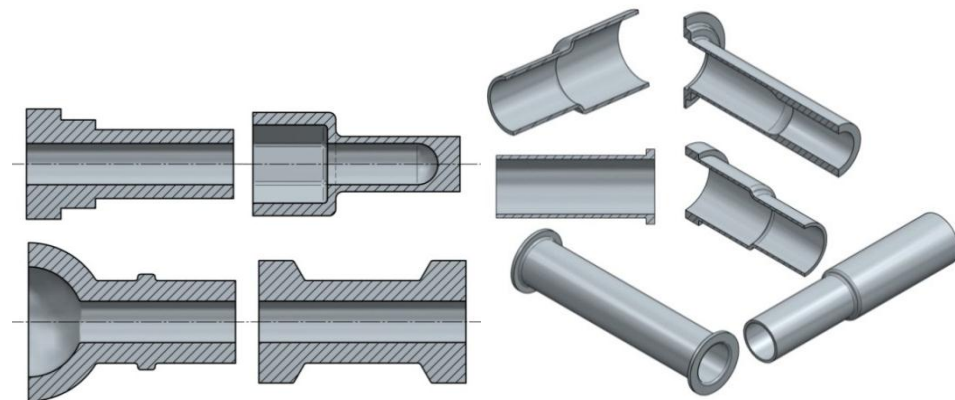
- dużą dokładność wymiarową oraz małe zbieżności kuźnicze odkuwek;
- dużą oszczędność materiału oraz małe naddatki na obróbkę skrawaniem;
- redukcję masy wyrobu, wynikającą z optymalnego rozkładu grubości ścianki;
- prawidłowy przebieg włókien oraz jednakowy stopień przekucia;
- możliwość kształtowania wyrobów drążonych z wsadu w postaci pręta lub rury;
- częściowe lub całkowite wyeliminowanie procesu spawania.



Rys. 2.28. Schemat procesu kucia w kuźniarce [166]

Odkuwki drążone kute w kuźniarkach znajdują zastosowanie jako półfabrykaty takich elementów jak: wałki rozrządu, wały napędowe, kolumny kierownicze, wałki skrzyni biegów, półosie napędowe, żerdzie wiertnicze, a także rury ogólnego przeznaczenia. Według klasyfikacji podanej przez Wasiunika odkuwki wykonane w kuźniarkach można podzielić na dziewięć grup [158, 159], przy czym wydłużone odkuwki drążone zostały zaklasyfikowane do grupy VI oraz VIII. Do grupy VI zalicza się odkuwki drążone o złożonych kształtach, posiadające na obwodzie dowolną liczbę kołnierzy. Otwór wewnętrzny w tych odkuwkach może być wykonywany jako przelotowy lub nieprzelotowy. Przykłady odkuwek zakwalifikowanych do grupy VI przedstawiono na rys. 2.29. Do grupy VIII zalicza się odkuwki wykonane z półfabrykatów w postaci rur. Przykładowe odkuwki grupy VIII kute bezpośrednio z wsadu rurowego przedstawiono na rys. 2.30. Zaklasyfikowanie odkuwki do danej grupy wpływa na sposób prowadzenia procesu kucia. Odkuwki grupy VI wykonuje się zazwyczaj z pręta poprzez dziurowanie, stosując wytyczne do opracowania procesu technologicznego zbliżone dla odkuwek pełnych. Ilość przejść oraz głębokość dziurowania w każdym z przejść wyznacza się z zależności empirycznych, podanych m.in. w opracowaniu [158]. Gotową odkuwkę oddziela się od pręta przez dziurowanie, przewężanie i dziurowanie lub przewężanie i odcinanie nożami bocznymi. Dwa pierwsze sposoby odcinania stosuje się wyłącznie dla odkuwek mających otwory przelotowe. Pierwszy sposób stosowany jest w przypadku, gdy średnica otworu odkuwki jest równa średnicy pręta wyjściowego. W drugim przypadku, operację przewężania stosuje się, gdy średnica otworu odkuwki jest mniejsza od średnicy

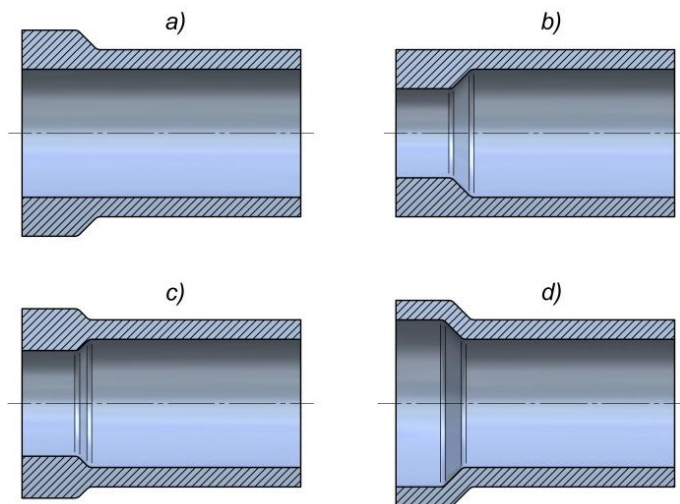
pręta wyjściowego. Przewężanie i odcinanie nożami bocznymi stosuje się w przypadku, gdy odkuwka nie posiada otworu przelotowego lub średnica wsadu jest dużo większa od średnicy otworu odkuwki. Trzeci sposób odcinania stosuje się również w przypadku kucia odkuwek krótkich.



Rys. 2.29. *Drążone odkuwki grupy VI [158]* **Rys. 2.30.** *Drążone odkuwki grupy VIII [158]*

Kucie w kuźniarkach odkuwek grupy VIII realizowane jest bezpośrednio z wsadu rurowego, proces ten określany jest również mianem spęczania rur (z ang. tube upsetting). W wielu przypadkach zalecane jest stosowanie jako wsadu rur bez szwu, a w szczególności dla odkuwek wydłużonych z otworem przelotowym. Zastosowanie wsadu rurowego pozwala ograniczyć liczbę operacji koniecznych do uzyskania wyrobu finalnego oraz zmniejszyć zużycie materiału. Podczas kucia na kuźniarkach odkuwek drążonych z półfabrykatów rurowych wykorzystuje się cztery podstawowe operacje spęczania [47], które pokazano na rys. 2.31:

- spęczanie zewnętrzne: średnica zewnętrzna rury jest zwiększana, natomiast wewnętrzna pozostaje bez zmian,
- spęczanie wewnętrzne: średnica wewnętrzna rury jest zmniejszana, natomiast zewnętrzna pozostaje bez zmian,
- jednocześnie spęczanie zewnętrzne i wewnętrzne: średnica zewnętrzna rury jest zwiększana, podczas gdy średnica wewnętrzna jest zmniejszana,
- rozszerzanie rury: średnica zewnętrzna jest zwiększana, natomiast grubość ścianki pozostaje stała.



Rys. 2.31. Typowe przykłady spęczania rur: a) spęczanie zewnętrzne, b) spęczanie wewnętrzne, c) jednoczesne spęczanie zewnętrzne i wewnętrzne, d) rozszerzanie rur [47]

Kuźniarki charakteryzują się dużą uniwersalnością, która wynika między innymi z możliwości kształtowania odkuwek w kilku wykrojach, które umieszczone są w dzielonych matrycach oraz w stemplach. W większości przypadków kuźniarki są zaliczane do maszyn kuźniczych o mechanicznym układzie napędowym (najczęściej korbowym). Ostatnio pojawiły się również na rynku kuźniarki o napędzie hydraulicznym (np. Lasco, Bar-Us) [165, 174]. W przypadku maszyn o napędzie korbowym podstawą klasyfikacji kuźniarek jest położenie płaszczyzny podziału matryc, zaciskających materiał. Według tego kryterium wyróżnia się kuźniarki z poziomym oraz pionowym podziałem matryc. Wielkość kuźniarek określana jest wartością siły nacisku suwaka oraz maksymalną średnicą spęczanego pręta. Do najczęściej spotykanych maszyn tego typu zalicza się kuźniarki wytwarzane przez takie firmy jak: AJAX, SMS (dawne Eumuco), National, a także Smeral. Produkowaną obecnie przez firmę Smeral kuźniarkę z poziomym podziałem matryc pokazano na rys. 2.32. Maszyna przeznaczona jest do kucia na gorąco z prętów lub rur odkuwek z jednostronnymi kołnierzami, stopniowanych odkuwek wałów drążonych, zaworów, zakuwania łbów dużych śrub itp. Kuźniarka wyposażona jest w suwak zaciskający matryce, który porusza się w układzie pionowym (poziomy podział matryc) oraz w suwak kształtujący, który porusza się w układzie poziomym. Maszyny produkowane są w zakresie nacisków suwaka kształtującego od 2,5 MN do 12 MN. Podstawowe parametry kuźniarek firmy Smeral zestawiono w tabeli 2.4.



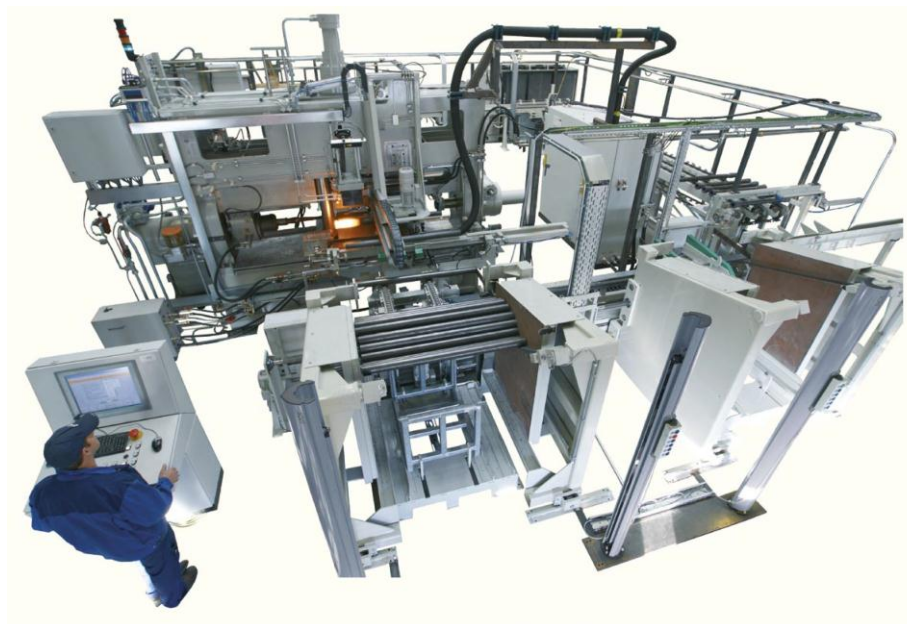
Rys. 2.32. Kuźniarka z poziomym podziałem matryc firmy Smeral – a) oraz przykładowe odkuwki kształtowane przy jej zastosowaniu – b) [181]

Tab. 2.4. Ważniejsze parametry kuźniarek z poziomym podziałem matryc firmy Smeral [181]

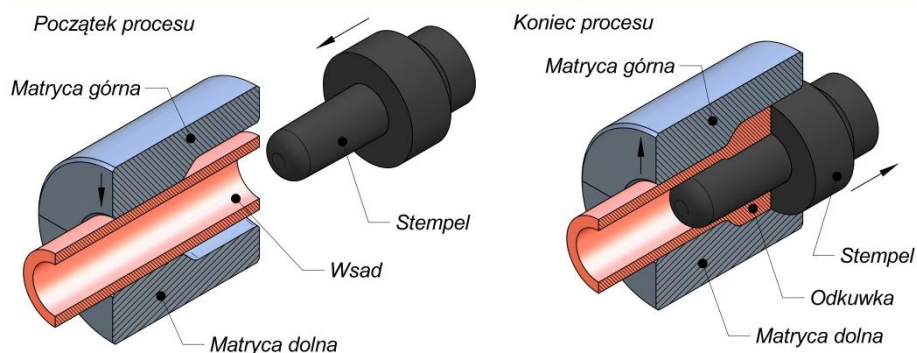
Wielkość maszyny		LKL250A	LKL400A	LKL500A	LKH800S	LKH1200S
Siła kucia	MN	2,5	4	5	8	12
Maksymalna średnica wsadu	mm	50	65	75	100	150
Liczba skoków suwaka	min ⁻¹	63	50	45	35	27
Całkowity skok suwaka	mm	220	270	300	380	500
Skok roboczy suwaka	mm	140	180	200	250	318
Skok suwaka zaciskającego	mm	95	115	130	159	215
Moc silnika napędowego	kW	17	33	37	40	75
Wymiary maszyny h x b x l	m	2,6x2,1x3,3	3x2,1x4	2,2x3,4x4,1	2,4x3,6x5,4	3x4,5x6,4

W ostatnim czasie powstały również wielozadaniowe agregaty kuźnicze, wyposażone w kuźniarki o hydraulicznym układzie napędowym suwaków, które wykorzystuje się do kształtowania elementów drążonych, głównie na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego i maszynowego. Przykładem może być w pełni zautomatyzowana linia kuźnicza firmy GFU do kształtowania elementów drążonych metodą spęczania rur (głównie skrajnych odcinków) (rys. 2.33).

a)



b)



c)



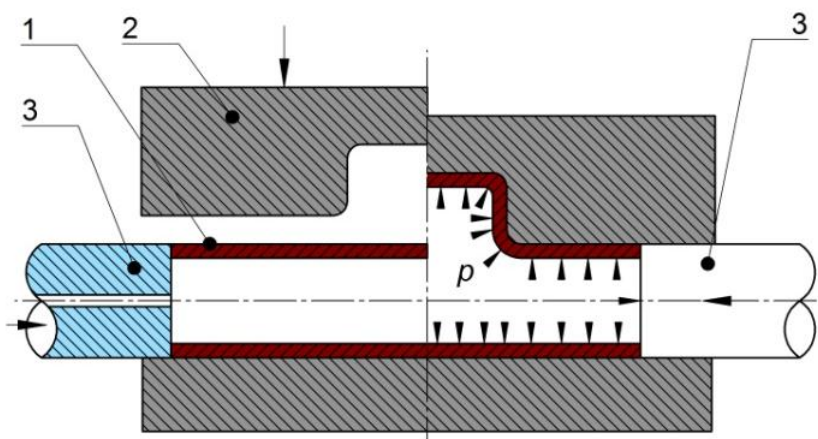
Rys. 2.33. Kształtowanie odkuwek drążonych metodą spęczania rur: a) wielozadaniowy agregat kuteńcy firmy GFU, b) schemat procesu, c) przykładowe odkuwki kute w agregacie [168]

Linia wyposażona jest w zintegrowany magazyn półfabrykatów, automatyczny układ podawania wsadów, nagrzewnicę indukcyjną do lokalnego nagrzewania wsadu, kuźniarkę z napędem hydraulicznym, układ odbioru i transportu odkuwek oraz magazyn gotowych wyrobów. Cały proces kształtowania, począwszy od załadunku, po kucie i odbiór gotowych elementów realizowany jest w sposób automatyczny.

2.6. Hydroforming (kształtowanie hydromechaniczne)

Hydroforming, często nazywany kształtowaniem hydromechanicznym lub wysokociśnieniowym jest procesem obróbki plastycznej polegającym na odkształcaniu metali i ich stopów ciśnieniem płynu (najczęściej cieczy). Ze względu na rodzaj materiału wsadowego rozróżnić można hydroforming blach (SHF) oraz hydroforming rur (THF) [151]. W procesie hydroformingu rur materiałem wyjściowym mogą być rury, wyciskane profile, wstępniaki rurowe spawane lub gięte. Generalnie proces ten jest stosowany do kształtowania drążonych elementów o skomplikowanych kształtach na zimno pod wpływem wysokiego ciśnienia oraz jednoczesnego ściskania osiowego i promieniowego.

Schemat procesu kształtowania hydromechanicznego przedstawiono na przykładzie wytwarzania trójnika z wsadu rurowego (rys. 2.34). Półfabrykat w postaci odcinka rury – 1 umieszczany jest w wykroju matrycy – 2. Matryce po zamknięciu tworzą szczelny wykrój o kształcie odpowiadającym geometrii gotowego elementu. Osiowe stemple – 3 uszczelniają końce rury – 1 i jednocześnie przez wykonane w nich otwory doprowadzają medium pod wysokim ciśnieniem do wnętrza półfabrykatu. Równoczesne działanie na rurę – 1 wysokiego ciśnienia i siły nacisku przemieszczających się stempli – 3 powoduje rozpęcznie odcinka rury – 1, która przyjmuje kształt wykroju matrycy – 2.



Rys. 2.34. Schemat hydromechanicznego kształtowania trójnika

Po zakończeniu formowania matryce – 2 są otwierane, a gotowy wyrób usuwany jest z wykroju. Poprawną realizację procesu kształtowania uzyskuje się poprzez odpowiednie skoordynowanie ze sobą ciśnienia wewnętrznego p oraz siły nacisku stempli osiowych. Nieodpowiednie dobranie parametrów procesu może skutkować występowaniem dwóch typowych defektów charakterystycznych dla procesu hydroformowania. Zbyt wysokie ciśnienie wewnętrzne p powoduje nadmierne rozpęcznie materiału pod wpływem naprężeń rozciągających, w efekcie czego może dochodzić do pęknięcia ścianki kształtowanego materiału. Natomiast zbyt wysoka siła nacisku stempli osiowych może skutkować nieodwracalnym pofałdowaniem materiału.

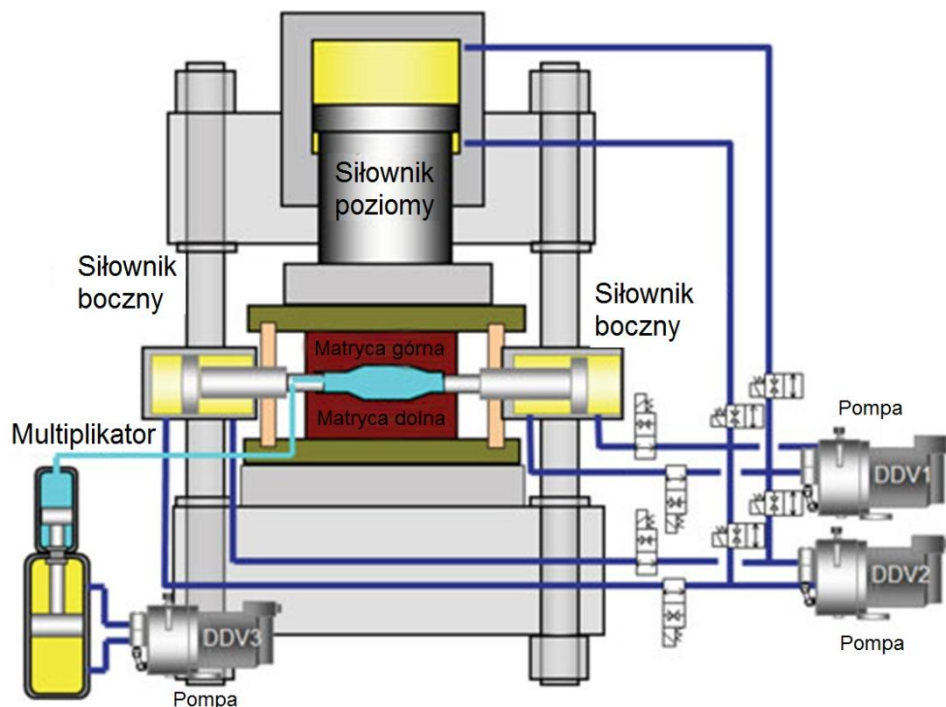
Proces hydroformowania w stosunku do konwencjonalnych procesów tłoczenia i spawania charakteryzuje się szeregiem zalet [71, 2, 3, 25, 34, 36, 37, 52, 57, 66], do których można zaliczyć między innymi:

- Możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanych kształtach, które nie mogły być dotychczas wytwarzane jako monolityczne.
- Możliwość otrzymania jednolitej konstrukcji, co eliminuje konieczność spawania i podnosi estetyczność wyrobu.
- Możliwość uzyskania wysokiej dokładności konturów i wymiarów elementów hydroformowanych.
- Umocnienie odkształceniowe pozwala kształtować elementy o dużym stopniu sztywności skrętnej. Sprężynowanie powrotne elementów hydroformowanych jest mniejsze niż konstrukcji spawanych. Z tego powodu, elementy wytwarzane w procesie hydroformingu mogą posiadać cieńszą ściankę niż elementy odlewane. Efekt ten wykorzystywany jest w celu zmniejszania masy, zwiększenia wytrzymałości oraz sztywności.
- W przypadku układów wydechowych wytwarzanych poprzez hydroforming, obserwuje się mniejsze opory przepływu oraz większą wytrzymałością zmęczeniową.
- Ograniczenie do minimum liczby operacji potrzebnych do uzyskania gotowego elementu oraz niewielkie zużycie materiału.

Głównymi ograniczeniami w stosowaniu procesu hydroformingu są wysokie koszty oprzyrządowania, wolnobieżność procesu, brak szerszej wiedzy o procesie oraz projektowaniu narzędzi, a także niewielka grubość ścianek kształtowanych półfabrykatów.

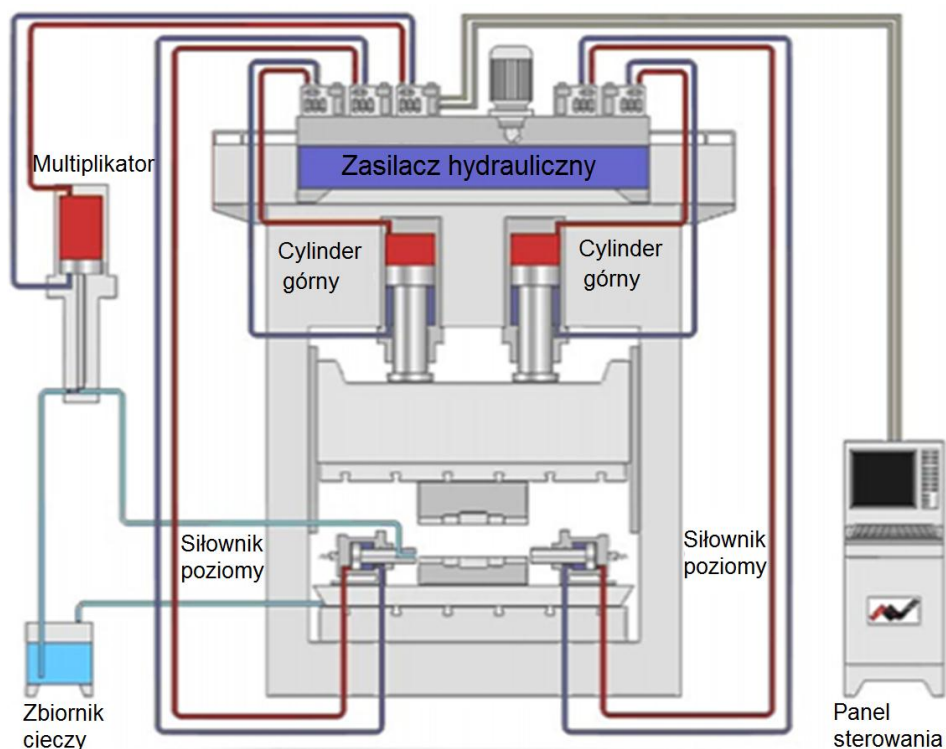
W większości przypadków proces hydroformingu realizowany jest na cztero-kolumnowych prasach hydraulicznych lub prasach o konstrukcji ramowej. Prasy cztero-kolumnowe zapewniają optymalny dostęp do matryc, kontrolę procesu oraz wymiany oprzyrządowania. Położenie poziomych siłowników w tych prasach może być dowolnie zmieniane w zależności od wymagań procesu technologicznego (rys. 2.35). Często w tego typu prasach stosuje się specjalne układy zasilania hydraulicznego, umożliwiające pulsacyjne narastanie ciśnienia

podawanej cieczy. Pozwala to na zmniejszenie oporów tarcia między materiałem, a narzędziami i w rezultacie na lepsze wypełnienie wykroju matrycy.



Rys. 2.35. Schemat hydraulicznej prasy pulsacyjnej o konstrukcji czterokolumnowej stosowanej do kształtowania hydromechanicznego [184]

Prasy ramowe wykorzystywane są głównie do produkcji drobnych i nieskomplikowanych elementów z rur, takich jak armatura hydrauliczna. Stosuje się je również do kształtowania wyrobów z blach. Położenie poziomych siłowników w tych prasach jest stałe, w związku z tym charakteryzują się one mniejszą elastycznością produkcyjną w stosunku do pras kolumnowych (rys. 2.36). Układy zasilania hydraulicznego muszą zapewnić wymagany wydatek i ciśnienie cieczy dostarczanej do cylindrów pionowych i poziomych prasy (najczęściej do 35 MPa), a także niezbędne ciśnienie cieczy podawanej do wnętrza rury (nawet do 700 MPa). Do napędu cylindrów hydraulicznych najczęściej stosuje się układy pompowo-akumulatorowe, natomiast ciecz używana do rozpęczania materiału dostarczana jest z multiplikatorów hydraulicznych, zwielfokratniających ciśnienie wytwarzane przez pompy.



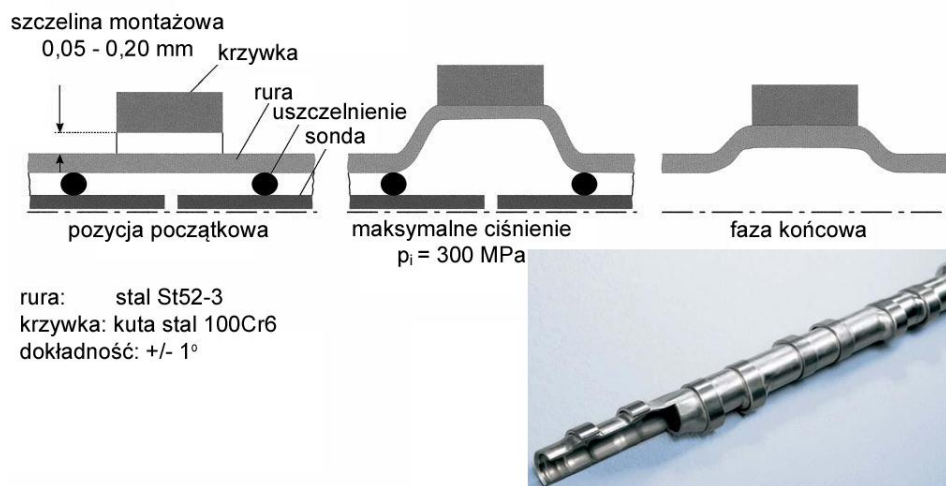
Rys. 2.36. Schemat hydraulicznej prasy o konstrukcji ramowej, wykorzystywanej do kształtowania hydromechanicznego [175]

Hydroforming jest stosowany do produkcji elementów o wysokiej wytrzymałości oraz skomplikowanych kształtach. Obecnie proces ten znalazł szerokie zastosowanie do wytwarzania cienkościennych części maszyn, a w szczególności:

- elementów hydraulicznych oraz elektrycznych (kolanka, trójniki, orurowania, zwężki);
- części dla przemysłu motoryzacyjnego (ramy, belki, elementy karoserii, elementy układu wydechowego);
- elementy rurowe ogólnego przeznaczenia.

Ostatnio procesy kształtowania hydromechanicznego zaczęto stosować również do wytwarzania drążonych elementów silników spalinowych, takich jak: wałki stopniowane, zawory, wałki rozrządu. Jeszcze do niedawna tego typu elementy wykonywano jako jednolite w oparciu o konwencjonalne technologie (skrawanie, odlewanie, kucie). Następnie w szczególnych przypadkach w celu zredukowania masy konstrukcji wiercono otwory odciążające. Jednak masowość produkcji elementów dla przemysłu motoryzacyjnego spowodowała konieczność poszukiwania efektywniejszych technologii wytwarzania, między innymi zaimplementowano technologię hydroformingu do kształtowania składanych

wałków rozrządu [26]. Wałki takie wykonywane są z rur i kutech krzywek, a do ich łączenia wykorzystuje się procesy hydroformingu. Technologia ich wytwarzania polega na łączeniu na gładkim wałku rurowym takich części jak: krzywki, czopy wałów, koła uzębione. Zasadę łączenia krzywek na wałku rurowym przedstawiono schematycznie na rys. 2.37. Krzywki umieszczane są na rurze z odpowiednim luzem, który wynosi od 0,05 do 0,2 mm. Do rury wprowadzane są dwie sondy, które doprowadzają ciśnienie w obszarze montażu krzywki. Na sondach umieszczone są uszczelki, które ograniczają strefę, w której ma dojść do rozpęczania rury. Poprzez sondy do obszaru ograniczonego uszczelkami podawana jest ciecz przez czas około 2 s pod ciśnieniem wynoszącym 300 MPa. Wysokie ciśnienie powoduje rozpęczanie rury. W momencie zamknięcia się szczeliny montażowej dochodzi do sprężystego odkształcania krzywki. Ponieważ materiał, z którego wykonana jest krzywka ma większą granicę plastyczności od materiału rury, sprężynowanie krzywki powoduje bardzo mocne połączenie obu części. Zastosowanie hydroformingu do wytwarzania składanych wałków rozrządu charakteryzuje się dużą dokładnością, wytrzymałym połączeniem oraz możliwością łączenia ze sobą części wykonanych z różnych materiałów.

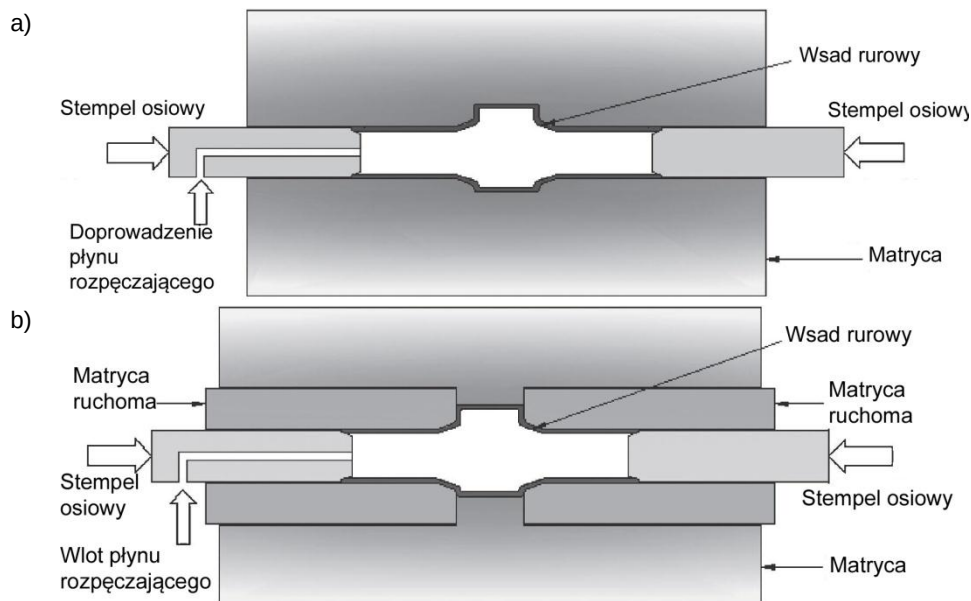


Rys. 2.37. Łączenie krzywek z drążonym wałkiem przez lokalne rozpęczanie materiału [77, 155]

W porównaniu do wałków pełnych wykonywanych konwencjonalnymi metodami odlewania bądź kucia, wałki drążone charakteryzują się licznymi zaletami [77], takimi jak:

- zmniejszenie masy przekraczające 50%;
- elastyczne dostosowanie konstrukcji, zwiększające wydajność silników;
- wzrost wytrzymałości;
- zmniejszenie kosztów produkcji.

Prowadzone są również badania mające na celu określenie możliwości aplikacji hydroformingu do produkcji stopniowanych wałków. Zhang przedstawił nową koncepcję kształtowania przez hydroforming drążonych wałków mimośrodowych [29]. Schemat tradycyjnej i nowej metody rozpęszczania wałków mimośrodowych przedstawiono na rys. 2.38.

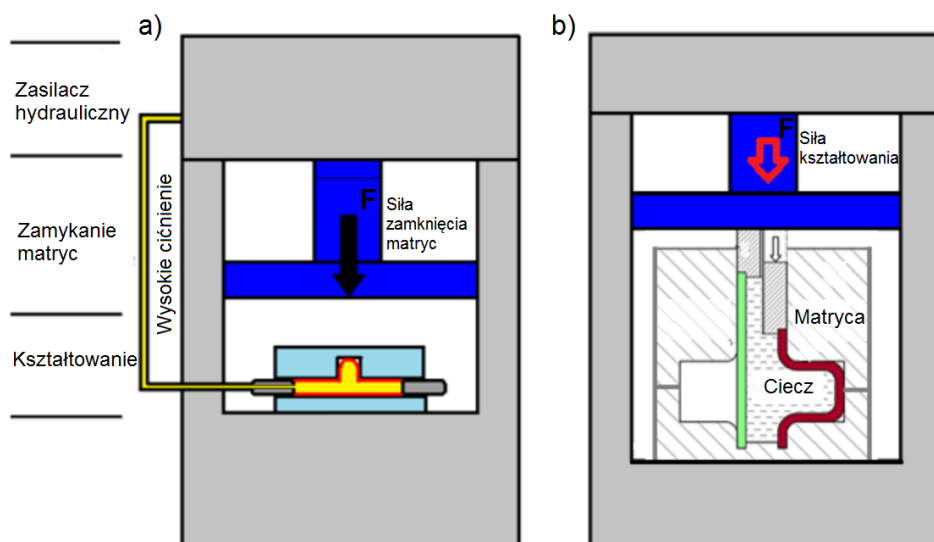


Rys. 2.38. Schemat rozpęszczania wałka mimośrodowego wg: a) tradycyjnej koncepcji, b) nowej metody [189]

Konwencjonalna metoda hydroformowania wałka mimośrodowego z wsadu rurowego (rys. 2.38a) polega na zaciśnięciu wsadu w matrycy dolnej i górnej, a następnie na wprowadzeniu z obu stron rury osiowych stempli, które uszczelniają końce rury. Pod wpływem ruchu osiowego stempli wywierany jest nacisk wzdłuż osi wsadu. W tym czasie przez otwór w jednym ze stempli podawana jest cieczy do wnętrza rury. W wyniku ruchu osiowego stempli i ciśnienia działającego na ścianki wewnętrzne rury, materiał stopniowo przyjmuje kształt wykroju matrycy. Wysokie ciśnienie cieczy powoduje występowanie dużych sił tarcia pomiędzy kształtowaną rurą a matrycami, co utrudnia dokładne wypełnienie wykroju matrycy i powoduje konieczność stosowania większych wartości ciśnień. W celu wyeliminowania niekorzystnych skutków tarcia zmodyfikowano metodę kształtowania. Zasadę nowej koncepcji hydroformingu zobrazowano na rys. 2.38b. W metodzie tej stosowane są dwie dodatkowe matryce ruchome, zadaniem których jest zmniejszenie sił tarcia, a w konsekwencji lepsze wypełnienie wykroju matrycy. Dodatkowe matryce uruchamiane są w końcowej fazie procesu. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano dokładniejsze wypełnienie naroży w wykroju matrycy. Zapotrzebowanie na

ciśnienie wewnętrzne zmalało blisko czterokrotnie, a siła rozpierająca matrycę zmniejszyła się pięciokrotnie. Również rozkład grubości ścianki ukształtowanych nową metodą elementów jest bardziej równomierny niż uzyskiwany w konwencjonalnych metodach hydroformingu [189].

Jednym z podstawowych utrudnień w realizacji procesu kształtowania hydromechanicznego rur jest konieczność skorelowania ze sobą prędkości i siły nacisku stempli poziomych z wartością ciśnienia cieczy, podawanej do wnętrza kształtowanego elementu. Często problemem jest również wytworzenie wysokich wartości ciśnień. W rezultacie procesy hydroformingu mogą być realizowane na specjalnie przystosowanych do tego prasach hydraulicznych, które charakteryzują się skomplikowanymi i drogimi układami zasilania [1, 4, 51, 62]. W celu wyeliminowania mankamentów konwencjonalnych procesów kształtowania hydromechanicznego zaproponowano modyfikację technologii, która polega na wykorzystaniu zwykłych pras hydraulicznych, bez konieczności stosowania dodatkowych siłowników poziomych oraz układów przygotowania wysokiego ciśnienia cieczy, podawanej do wnętrza półfabrykatu [4, 51]. Schemat tradycyjnego oraz zmodyfikowanego procesu hydroformowania pokazano na rys. 2.39. W obydwu przypadkach odkształcenie materiału jest efektem spęczania materiału oraz działania ciśnienia cieczy wewnątrz półfabrykatu rurowego.



Rys. 2.39. Schemat procesu kształtowania hydromechanicznego: a) tradycyjnego, b) zmodyfikowanego [4]

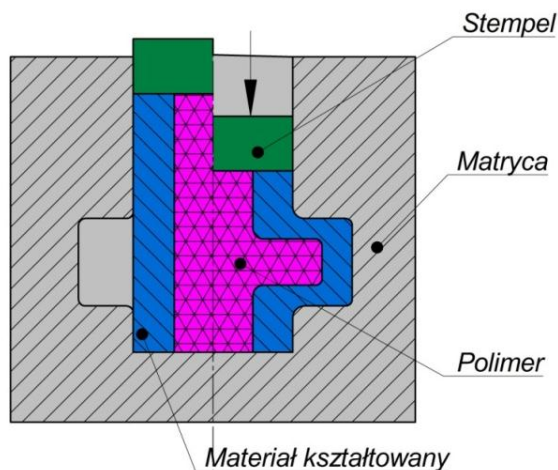
W tradycyjnym procesie ciecz pod wysokim ciśnieniem podawana jest do wnętrza rury z multiplikatora hydraulicznego, zaś w zmodyfikowanym procesie wzrost ciśnienia cieczy (zamkniętej w rurze) spowodowany jest spęczaniem rurowego półfabrykatu w wykroju narzędzi. Tą metodą można kształtować

drążone elementy o niewielkiej długości, takie jak: stopniowane wałki, drążone koła zębate (stożkowe i walcowe) cylindryczne wyroby z kołnierzami itp. Przykładowe elementy ukształtowane zmodyfikowaną metodą hydroformingu pokazano na rys. 2.40.



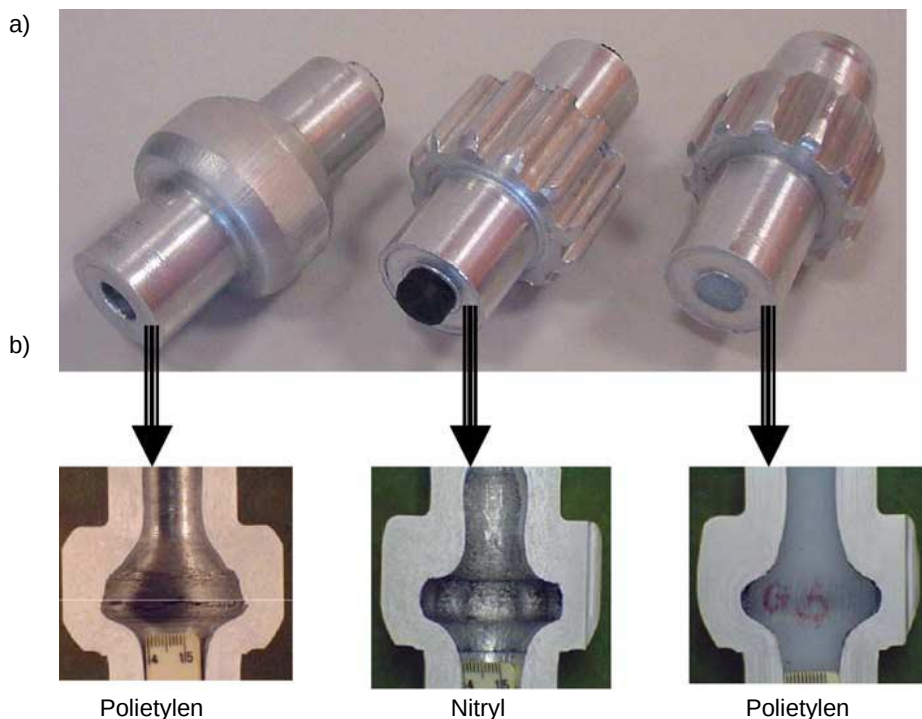
Rys. 2.40. Przykładowe elementy drążone wykonane zmodyfikowaną metodą kształtowania hydromechanicznego [4]

Na podobnej zasadzie formowania wysokociśnieniowego opiera się proces kształtowania elementów drążonych z wykorzystaniem polimerów jako medium roboczego [113, 161]. W opracowaniu Ma przedstawiono sposób wytwarzania wałków uzębionych metodą kucia wspomaganego ciśnieniem wewnętrznym (z ang. Pressure – Assisted Injection Forging PAIF) (rys. 2.41) [61]. Wsad w postaci rury, wewnątrz której znajduje się materiał polimerowy umieszczany jest w wykroju matrycy. Siła wywierana przez stempel przykładana jest jednocześnie do półfabrykatu i medium (polimeru). W trakcie ruchu stempla ściskany polimer wywiera nacisk na wewnętrzną powierzchnię odkształcanej rury, dzięki czemu możliwe jest kształtowanie stopniowanych wałków bez utraty stateczności kształtu rury (wyboczenia). W celu wyeliminowania wpływu zmiany objętości materiału polimerowego, stosuje się stemple stopniowane, które wstępnie ściskają polimer i zwiększają jego gęstość. Wielkość ciśnienia wewnętrznego może być regulowana poprzez odpowiednie dobranie materiału polimerowego o określonych właściwościach lub poprzez zastosowanie dwóch stempli, z których jeden odpowiedzialny jest za ściskanie materiału wewnętrznego, natomiast drugi realizuje właściwy proces kształtowania [113].



Rys. 2.41. Schemat rozpęczania rury przy użyciu tworzywa polimerowego [113]

Przeprowadzone przez Ma badania wykazały, że najlepsze rezultaty podczas kucia metodą PAIF uzyskuje się stosując jako medium nityl lub polietylen. Wałki uzębione wykonane tą metodą przedstawiono na rys. 2.42.



Rys. 2.42. Wałki uzębione wykonane metodą PAIF: a) widok ogólny, b) przekroje osiowe [61]

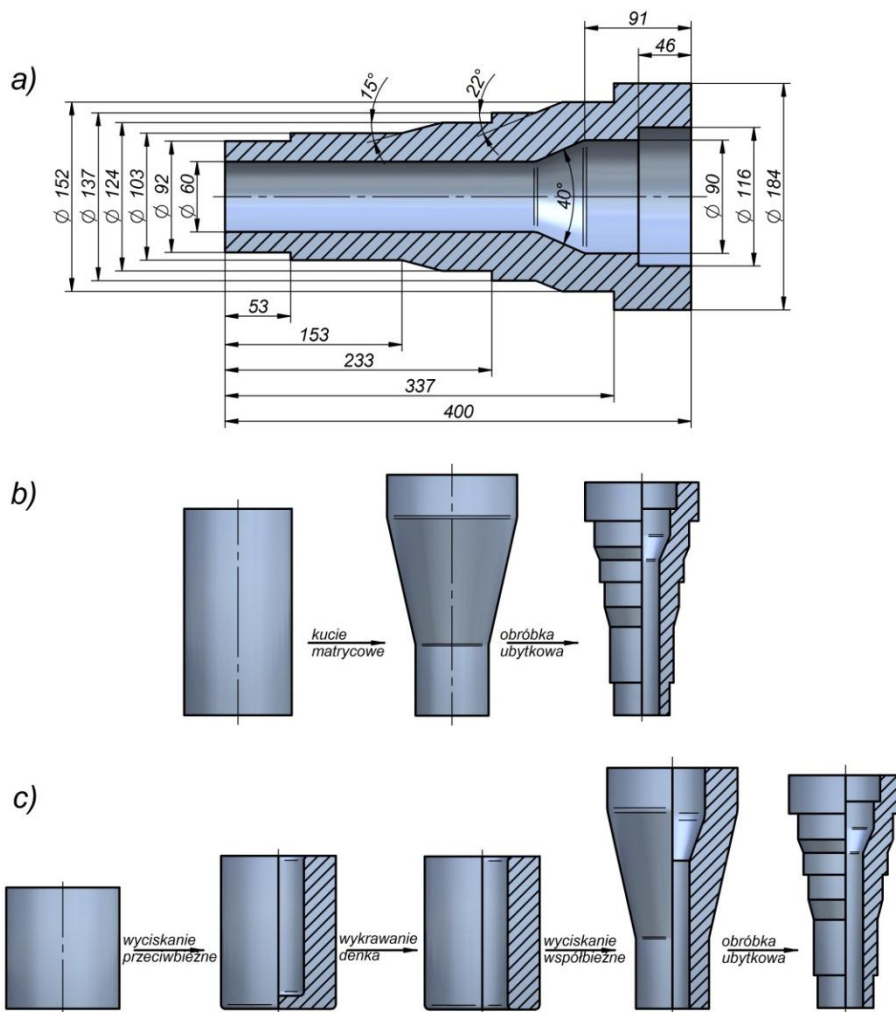
2.7. Procesy wyciskania wyrobów drążonych

Ostatnio szerokie zastosowanie w produkcji stopniowanych osi i wałów znalazły procesy wyciskania, zarówno na gorąco, jak i na zimno. Technologia wyciskania elementów drążonych charakteryzuje się szeregiem zalet, do których można zaliczyć między innymi: prosty schemat realizacji procesu, niewielkie straty materiałowe, korzystny układ włókien, możliwość kształtowania elementów na gotowo lub z pozostawieniem minimalnych naddatków na obróbkę wykańczającą (głównie dla procesów realizowanych na zimno i na ciepło), korzystny schemat naprężeń podczas kształtowania, zapobiegający pękaniu materiału. Do głównych ograniczeń technologii wyciskania (zwłaszcza na zimno) zalicza się: ogromne siły kształtowania, co wymaga zastosowania pras o dużych naciskach, silne obciążenie narzędzi, przekładające się na ich niewielką trwałość i wpływające na konieczność stosowania wysokowytrzymałych materiałów narzędziowych, przy wyciskaniu złożonych geometrycznie elementów konieczność stosowania procesu wieloetapowego z wyżarzaniem międzyoperacyjnym. Pomimo licznych ograniczeń technologia ta znalazła obecnie szerokie zastosowanie do kształtowania elementów stosowanych w motoryzacji, których produkcja charakteryzuje się dużymi seriami [22, 42, 45, 54, 55, 56, 76, 86, 121, 152, 154, 156, 160, 170, 173, 187]. Wynika to z przede wszystkim z opracowania nowych materiałów narzędziowych, które są w stanie przenieść duże obciążenia i zachować trwałość przy większych seriach produkcyjnych.

Wyciskanie na gorąco

Odkuwki drążone o większych wymiarach gabarytowych mogą być wyciskane na gorąco. Dzięki podniesieniu temperatury materiału możliwa jest realizacja procesu przy stosunkowo niewielkich siłach kształtowania. Ponadto, wartości odkształceń są znacznie większe w stosunku do uzyskiwanych w procesach realizowanych na zimno. Przykład procesu kształtowania odkuwki wałka, stosowanego w motoryzacji pokazano na rys. 2.43. Pierwotnie wałek był wykonywany z pełnej odkuwki matrycowej (rys. 2.43a), następnie przeprowadzano obróbkę mechaniczną, podczas której wykonywano otwór. Dążenie do obniżenia pracochłonności i materiałochłonności procesu spowodowało, że zdecydowano się na zmianę procesu technologicznego w taki sposób, aby podczas kształtowania odkuwki wykonać jednocześnie otwór (rys. 2.43b) [156]. Taka modyfikacja procesu produkcyjnego pozwoliła na zmniejszenie zużycia materiału o około 10%, przy jednoczesnym obniżeniu czasu obróbki mechanicznej o blisko 20%, co w przypadku produkcji masowej jest ekonomicznie uzasadnione. Ponadto własności wytrzymałościowe tak kształtowanego elementu są lepsze w stosunku do wałka wytwarzanego w tradycyjny sposób. Proces wytwarzania wałka według nowego schematu realizowany jest na gorąco z półfabrykatu w kształcie pręta. W pierwszej operacji

następuje przeciwbieżne wyciskanie materiału, następnie wykrawa się pozostałe denko. Powstałą w ten sposób tuleję poddaje się wyciskaniu współbieżnemu, aż do uzyskania drążonej odkuwki wałka, która następnie obrabiana jest mechanicznie.

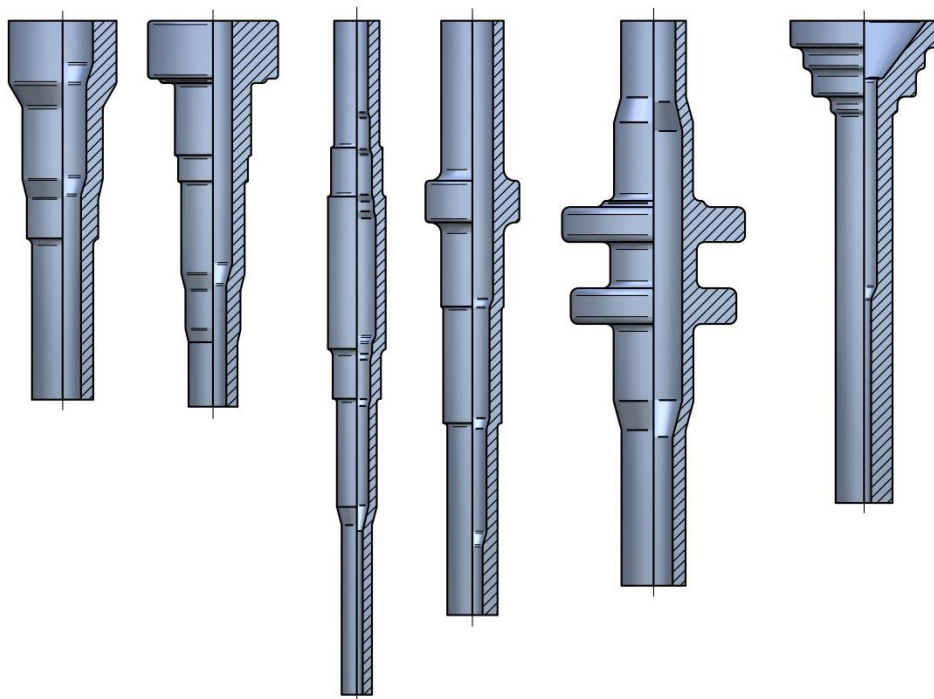


Rys. 2.43. Schemat wytwarzania wału drążonego stosowanego w motoryzacji: a) kształt i wymiary wałka, b) proces wytwarzania z pełnej odkuwki matrycowej, c) z drążonej odkuwki wyciskanej na gorąco [45, 156]

Wyciskanie na zimno

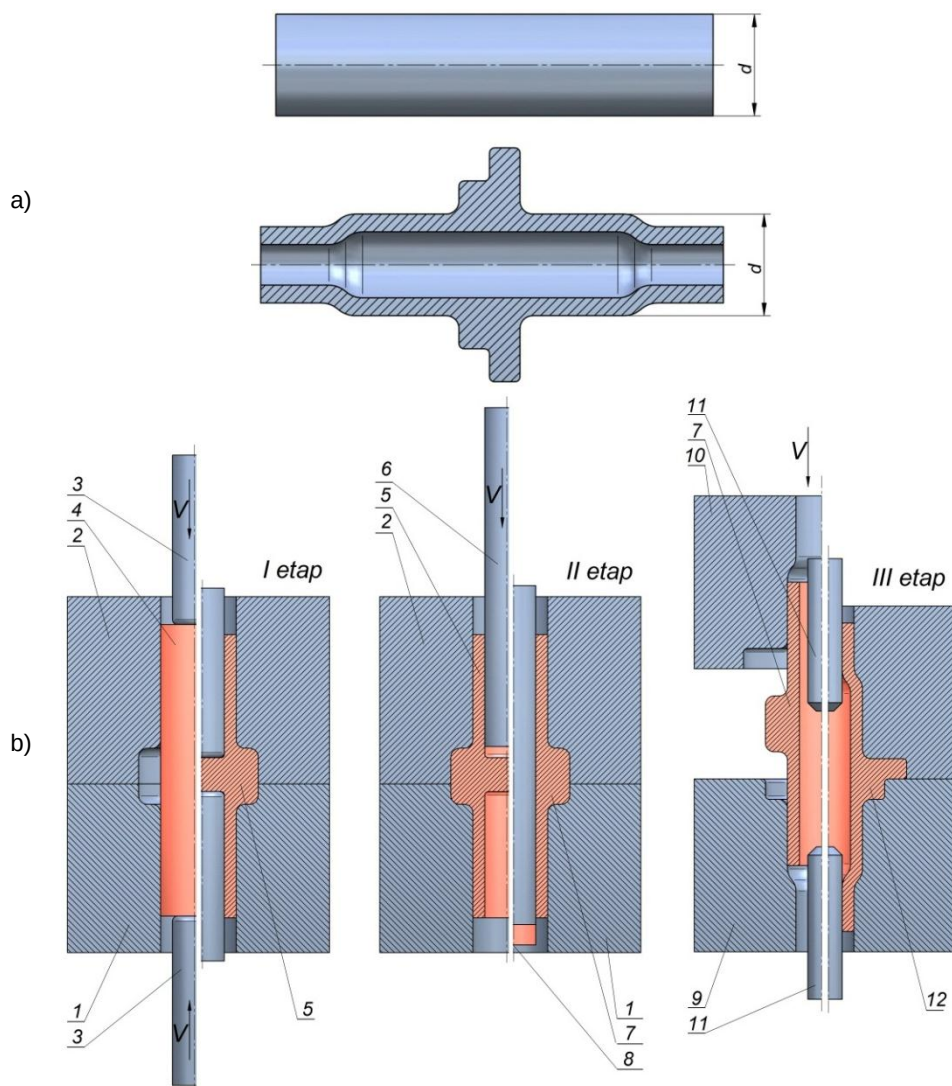
Wzrastające zapotrzebowanie na precyzyjne wały drążone dla przemysłu motoryzacyjnego i maszynowego spowodowało intensywny rozwój procesów wyciskania na zimno. Asortyment drążonych wyrobów, które obecnie na szeroką skalę wytwarza się metodami wyciskania na zimno pokazano na rys. 2.44.

W większości są to typowe wałki drążone stosowane w motoryzacji do przekładni manualnych i automatycznych. Wytwarzane są one w technologii „near net shape” (na gotowo lub z bardzo małymi nadładkami na obróbkę wykańczającą). Proces kształtowania takich elementów realizowany jest w kilku etapach najczęściej z wykorzystaniem wsadów pełnych.



Rys. 2.44. Przykładowe wałki drążone wytwarzane w procesach wyciskania na zimno [54, 121]

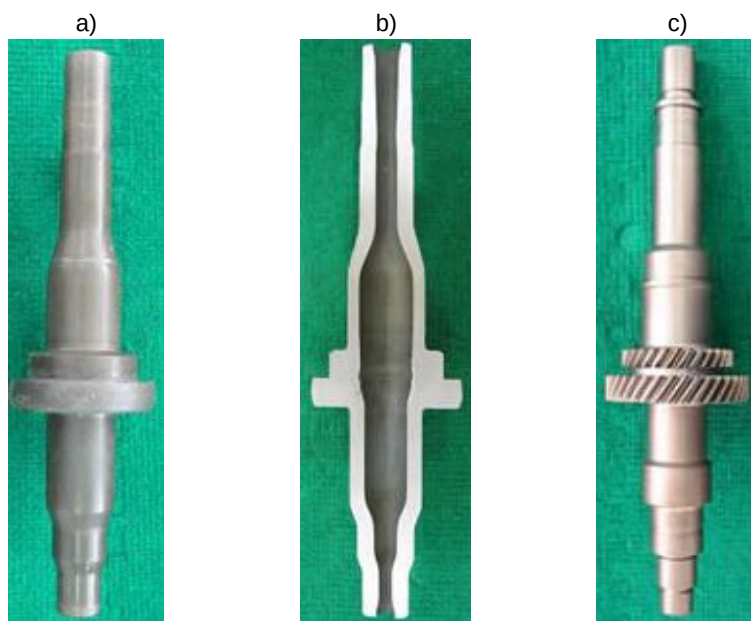
Przykładowo japońska firma Kubota Iron Works Co., Ltd. zaproponowała realizację procesu wyciskania odkuwki wałka na zimno w trzech etapach [54, 173], które obejmują takie operacje jak: dwustronne wyciskanie (przeciwbieżne i promieniowe), dziurowanie oraz dalsze wyciskanie dwustronne (promieniowe i przeciwbieżne) z jednoczesnym kalibrowaniem otworów (rys. 2.45). Proces realizowany jest w matrycach dzielonych. Dwustronne wyciskanie przeciwbieżne odbywa się w cylindrycznych otworach, znajdujących się w obu matrycach. Stopnie centralne, które powstają w wyniku wyciskania promieniowego, kształtowane są w wykrojach umieszczonych w płaszczyźnie podziału obu matryc. W ostatnim etapie, podczas kształtowania przewężień kalibrowane są jednocześnie otwory skrajnych stopni wałka. W tym celu wykorzystuje się dwa trzpienie, znajdujące się w strefie zginięcia materiału.



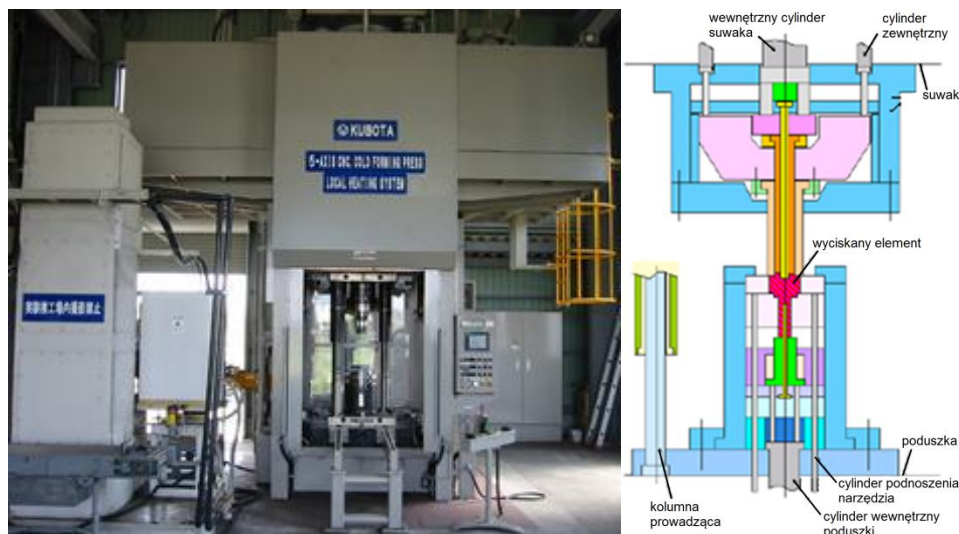
Rys. 2.45. Wyciskanie na zimno drążonego wałka: a) wsad, b) odkuwka, c) schemat procesu; 1 – matryca dolna, 2 – matryca górna, 3 – stemple do wyciskania, 4 – wsad, 5 – półfabrykat po pierwszej operacji, 6 – stemple dziurujący, 7 – półfabrykat po operacji dziurowania, 8 – wykrawany odpad, 9 – matryca dolna końcowa, 10 – matryca górna końcowa, 11 – trzpień kalibrujący otwór, 12 – gotowa odkuwka [54, 1173]

Zaproponowana metoda wyciskania drążonych odkuwek wałków może być stosowana do bardziej złożonych elementów. Wsadem mogą być również odcinki rur. Jednak w tym przypadku, podczas wyciskania elementów o większych średnicach kołnierzy pojawia się niebezpieczeństwo tworzenia się zakuć w obszarze wyciskania promieniowego. W oparciu o przedstawiony schemat procesu firma Kubota Iron Works kształtuje drążone odkuwki wałka

w warunkach przemysłowych (rys. 2.46). Do realizacji procesu wykorzystywane są pięcioosiowe prasy hydrauliczne podwójnego działania o nacisku 6000 kN własnej produkcji (rys. 2.47).



Rys. 2.46. Drążony wałek napędowy kształtowany przez firmę Kubota Iron Works Co., Ltd w procesie wyciskania na zimno: a) ukształtowana odkuwka, b) przekrój osiowy odkuwki, c) drążony wałek po obróbce mechanicznej [173]



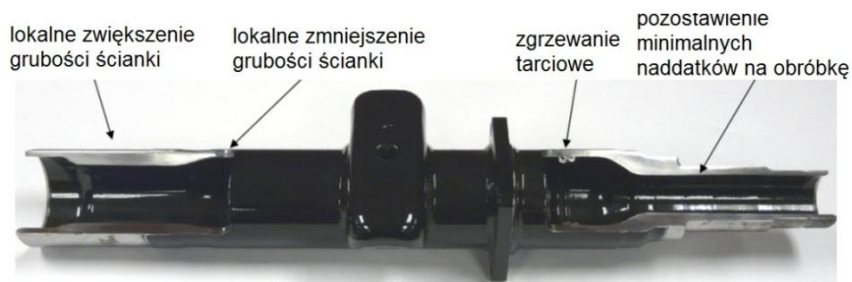
Rys. 2.47. Pięcioosiowa prasa hydrauliczna opracowana przez firmę Kubota Iron Works Co., Ltd wykorzystywana w procesie wyciskanie na zimno elementów drążonych [53,173]

Także niemiecka firma Hirschvogel Automotive Group opracowała technologię wyciskania na zimno, którą stosuje do kształtowania drążonych wałków dla przemysłu motoryzacyjnego (rys. 2.48) [170]. W procesie wyciskania kształtowane są stopnie wałka z minimalnymi nadadkami na obróbkę wykańczającą. Dodatkowo w trakcie procesu kształtowany jest na gotowo wielowypust. Wyciskanych elementów nie poddaje się już obróbce cieplnej, a wzrost wytrzymałości jest efektem umocnienia materiału podczas jego odkształcania na zimno.



Rys. 2.48. Drążona odkuwka wałka kształtowana na zimno [170]

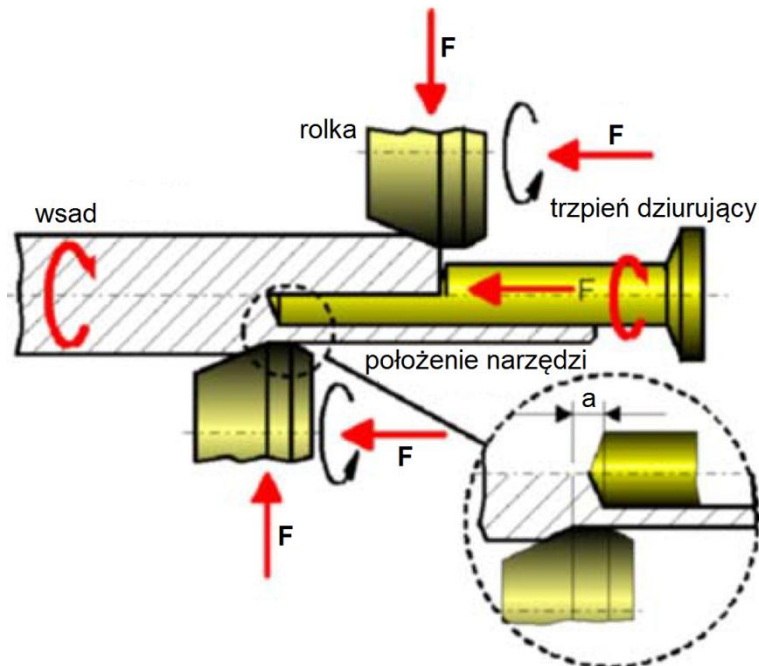
W przypadku długich elementów o dużym zróżnicowaniu średnic i grubości ścianek stosuje się kombinowane procesy, które stanowią połączenie wyciskania na zimno, wiercenia oraz zgrzewania tarcowego. Takie technologie znalazły zastosowanie głównie do wytwarzania elementów dla motoryzacji, m.in. przez firmę U.S. Manufacturing Corporation. Stosuje ona połączone technologie kształtowania na zimno, wiercenia i zgrzewania do produkcji elementów przeniesienia napędu, układów kierowniczych, a także przekładni samochodowych wielu znanych marek motoryzacyjnych [152]. Przykładowy element, stanowiący drążoną oś tylną pojazdów ciężarowych, wykonany w technologii kombinowanej pokazano na rys. 2.49. Dzięki zastosowaniu takiego procesu wytwarzania obniżono masę elementu o około 20% w stosunku do konwencjonalnych metod wytwarzania.



Rys. 2.49. Drążona oś tylna pojazdu ciężarowego wytwarzana przez firmę U.S. Manufacturing Corporation w oparciu o technologię kombinowaną [152]

2.8. Spin extrusion (wyciskanie obrotowe)

Kolejną technologią, która umożliwia kształtowanie plastyczne elementów drążonych jest proces wyciskania obrotowego, opracowany i rozwijany przez Instytut Naukowy Fraunhofer pod nazwą spin extrusion. Głównym przeznaczeniem technologii jest kształtowanie obrotowych elementów drążonych z wykorzystaniem wsadów pełnych (najczęściej prętów) [24, 68-70, 73, 79, 81, 82, 138, 172]. Proces zgniatania materiału realizowany jest między trzema wirującymi rolkami o ściśle określonej geometrii, które obracają się w tym samym kierunku i jednocześnie przemieszczają się wzdłuż osi kształtowanego półfabrykatu (rys. 2.50). Jednocześnie wraz z rolkami przemieszcza się trzpień dziurujący, który wykonuje otwór w kształtowanym elemencie. W wyniku oddziaływania narzędzi materiał płynie w kierunku przeciwnym do ruchu postępowego rolek i trzpienia (podobnie jak w procesie wyciskania przeciwbieżnego). Kształtowany półfabrykat mocowany jest w uchwycie, który dodatkowo wprawia go w ruch obrotowy. Położenie trzpienia dziurującego w stosunku do rolek zgniatających jest ściśle określone i wynika z rozkładu naprężeń w strefie zgniatania i dziurowania. Głównka dziurująca trzpienia powinna znajdować się w strefie kalibrującej narzędzi. Przy takim położeniu możliwe jest wykorzystanie efektu Mannesmanna podczas dziurowania materiału, co zmniejsza siły kształtowania otworu oraz obciążenie trzpienia.



Rys. 2.50. Schemat procesu spin ekstrusion (wyciskania obrotowego) [79]

Kinematyka procesu umożliwia kształtowanie wyrobów o kołowym przekroju poprzecznym zewnętrznej ścianki, natomiast otwory mogą mieć bardziej złożony kształt w zależności od geometrii zastosowanego trzpienia. Główną zaletą tej metody w stosunku do procesów głębokiego wiercenia jest skrócenie o 30% – 40% czasu obróbki oraz zmniejszenie zużycia materiału. Jakość kształtowanych wyrobów jest bardzo wysoka, co umożliwia otrzymanie elementów gotowych, bez konieczności dalszej obróbki (w przypadku procesów realizowanych na zimno). Prototypową maszyną BDM 2000 do realizacji procesu spin extrusion opracowano w Instytucie Fraunhofer (rys. 2.51), zaś przykładowe elementy kształtowane tą technologią zostały pokazane na rys. 2.52.



Rys. 2.51. Maszyna BDM 2000 do kształtowania wyrobów metodą spin extrusion [79]

Prowadzone badania wykazały przydatność metody do kształtowania technologią spin extrusion stali, stopów aluminium, stopów miedzi oraz stopów tytanu [68, 83].



Rys. 2.52. Elementy kształtowane metodą spin extrusion [15, 23, 179]

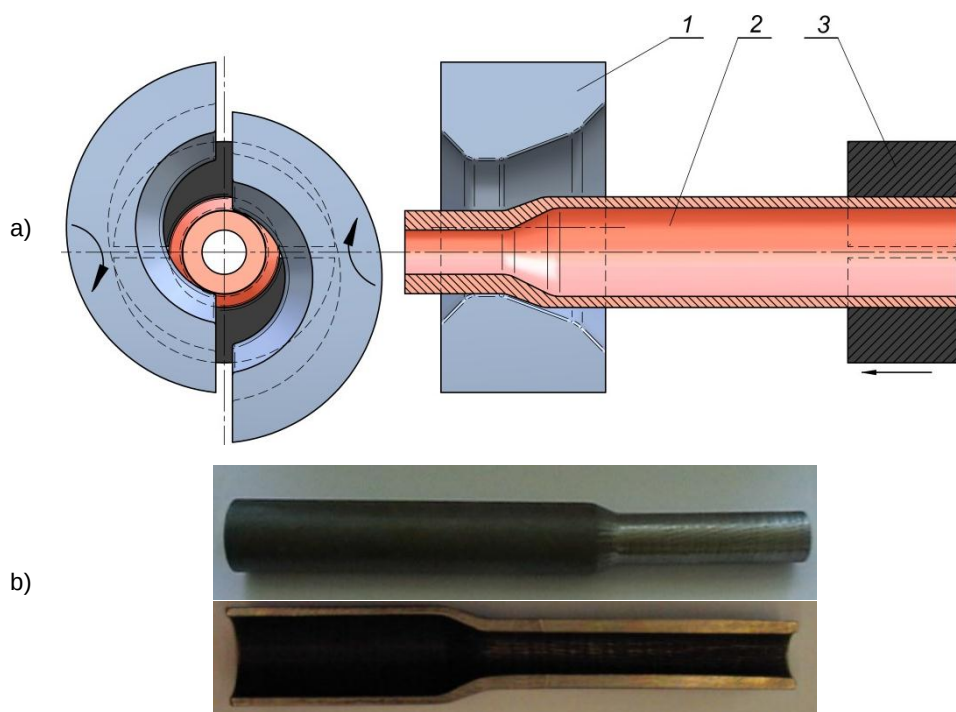
2.9. Inne metody kształtowania elementów drążonych

Oprócz opisanych powyżej technologii kształtowania plastycznego elementów drążonych (głównie stopniowanych osi i wałów) można spotkać inne sposoby wytwarzania takich elementów. Są to procesy znacznie rzadziej stosowane w przemyśle, bądź znajdujące się dopiero w fazie prób. Do takich niekonwencjo-

nalnych metod można zaliczyć między innymi procesy obciskania półfabrykatów rurowych metodą WPM [27, 28, 67, 74, 75], przepychanie obrotowe [6, 7, 13, 14, 16–20] oraz obciskanie obrotowe z wykorzystaniem narzędzi klinowo-rolkowych [4, 5, 65, 190].

Obciskanie półfabrykatów rurowych metodą WPM

Jedną z metod redukowania średnicy półfabrykatów rurowych jest walcowanie na zimno wklęsłymi segmentami. Pierwotnie metoda ta została opracowana w 1970 r. przez Marciniaka oraz Kopacza pod nazwą WPM i była przeznaczona do walcowania na zimno uzębień kół zębatach, wielowypustów i wielokarbów [27, 28, 67, 74, 75]. W procesie wykorzystywano segmenty narzędziowe o wklęsłych powierzchniach roboczych, na których wykonane były uzębienia lub wielowypusty. W trakcie kształtowania segmenty poruszały się po okręgach o osiach obrotu przesuniętych w stosunku do osi wsadu. Taka kinematyka ruchu powodowała wprowadzenie materiału w ruch obrotowy i cykliczne zginięcie materiału przez wklęsłe powierzchnie narzędzi. Dzięki wykorzystaniu gładkich powierzchni kształtujących narzędzi możliwe stało się kształtowanie tą metodą przewężeń na prętach i rurach (rys. 2.53a).



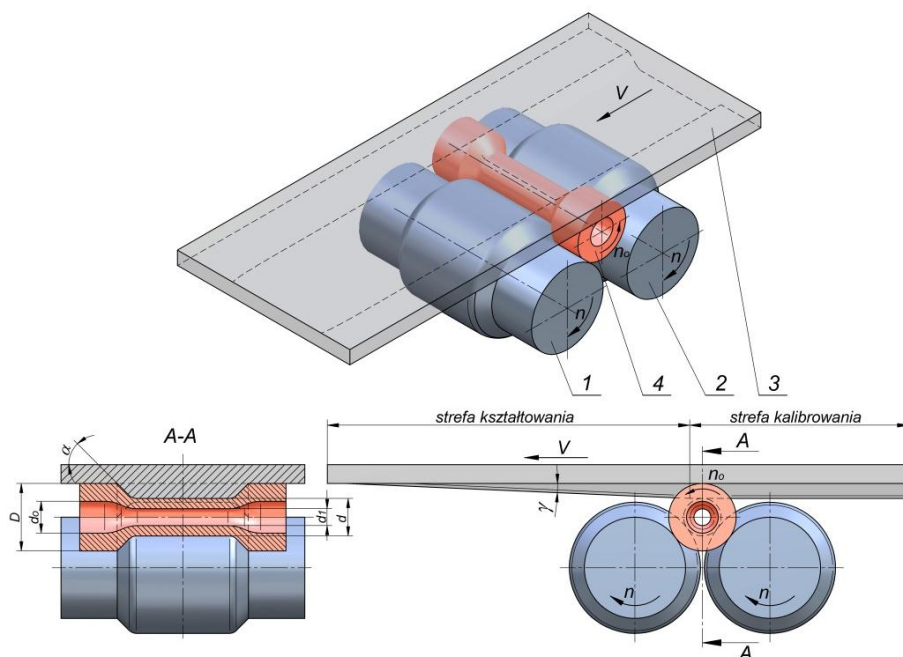
Rys. 2.53. Redukowanie średnicy końca półfabrykatu rurowego metodą WPM: a) schemat procesu: 1 – wklęsła szczeka kształtująca, 2 – półfabrykat, 3 – uchwyt procesu; b) ukształtowane elementy (na podstawie opracowania T. Miłki i inn. [74])

Pełny cykl kształtowania podzielony jest na dwa etapy. W pierwszym, podczas przybliżania się narzędzi do półfabrykatu, wklęsłe powierzchnie narzędzi wprowadzają materiał w ruch obrotowy i stopniowo redukują przekrój poprzeczny. W drugim etapie podczas oddalania się narzędzi od półfabrykatu następuje osiowe przemieszczanie wsadu. Metoda może być stosowana do redukowania przekroju poprzecznego rur cienkościennych w zakresie średnic od $\varnothing 25 \div \varnothing 508$ mm i względnych grubości ścianek w zakresie $g_0/D = 0,021 \div 0,092$ (gdzie: g_0 – grubość początkowa ścianki rury, D – zewnętrzna średnica początkowa rury). Obciskane stopnie rur charakteryzują się dobrą jakością powierzchni zewnętrznej oraz wzrostem grubości ścianki. Przykładowe elementy ukształtowane tą metodą pokazano na rys. 2.53b.

Obciskanie obrotowe w układzie dwóch rolek i narzędzia płaskiego

W ostatnim czasie w Politechnice Lubelskiej prowadzone były prace badawcze związane z rotacyjnym kształtowaniem odkuwek drążonych z wykorzystaniem półfabrykatów rurowych. Została opracowana między innymi technologia przepychania obrotowego, którą szczegółowo opisano w licznych publikacjach. Jednak z uwagi na ograniczenia związane z bazą laboratoryjną, badania w tym zakresie przeprowadzono jedynie dla niewielkiej grupy wyrobów o prostym kształcie [6, 7, 13, 14, 16–20].

Opracowano także technologię obciskania obrotowego elementów drążonych z wykorzystaniem płaskich i obrotowych narzędzi [63, 64], która stanowiła podstawę do późniejszych badań kształtowania odkuwek drążonych trzema walcami (szczegółowo opisana w dalszej części opracowania). Schemat procesu obciskania obrotowego półfabrykatów rurowych, podpartych na dwóch rolkach przy pomocy płaskiego narzędzia pokazano na rys. 2.54. Przebieg procesu obciskania obrotowego można porównać do kształtowania metodą walcowania klinowo-rolkowego (WKR) na rolkach profilowych. Jednak w odróżnieniu od procesu WKR, narzędzie klinowe zostało zastąpione górną szczęką płaską, która ma dwie strefy: kształtowania, pochyloną na całej szerokości pod kątem γ , oraz płaską kalibrowania. W pierwszej strefie wyrób obciskany jest na całej długości kształtowanego stopnia odkuwki (od początku procesu ma miejsce stopniowa redukcja średnicy zewnętrznej w całej strefie obciskanego stopnia). W drugiej usuwane są nieregularności kształtu powstałe we wcześniejszym etapie procesu. Zarys rolek profilowych jest taki sam, jak kształt walcowanego elementu. W rezultacie, w odróżnieniu od procesów WKR rolki spełniają dwojaką rolę. Podtrzymują materiał, na który oddziałuje przemieszczająca się szczeka płaska i jednocześnie wcinają się w materiał, redukując średnicę wsadu.



Rys. 2.54. Schemat procesu obciskania obrotowego półfabrykatów rurowych w układzie dwóch rolek podpierających oraz płaskiego narzędzia klinowego: 1, 2 – rolki podpierające, 3 – narzędzie płaskie, 4 – obciskana odkuwka

Badania potwierdziły możliwość kształtowania tą metodą przewężeń na półfabrykatów rurowych (zarówno na zimno, jak i na gorąco) (rys. 2.55) [63, 64]. Uzyskane wyroby charakteryzuje wzrost grubości ścianki w strefie kształtowanych stopni, co związane jest z głównie promieniowym kierunkiem płynięcia materiału.



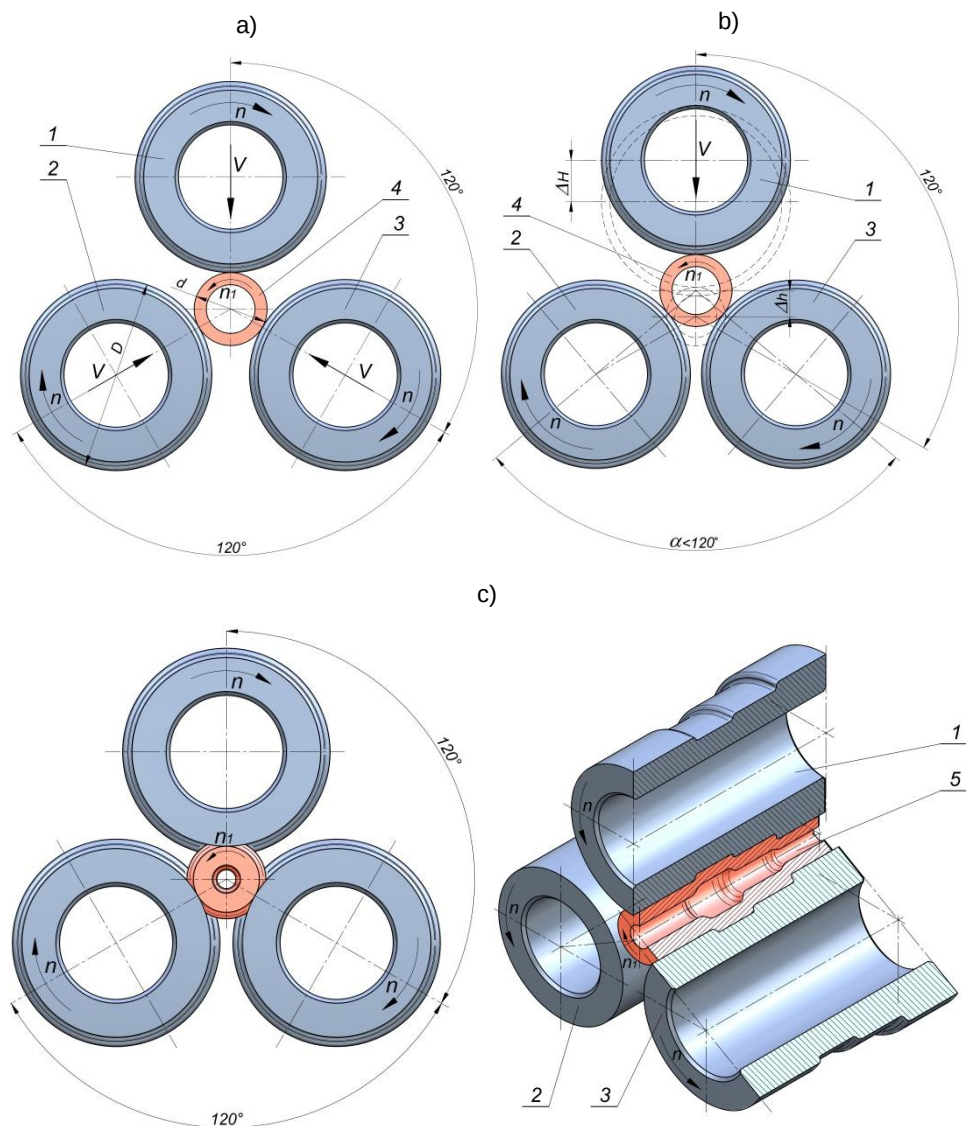
Rys. 2.55. Ukształtowane w procesie obciskania obrotowego odkuwki w układzie dwóch rolek podpierających oraz płaskiego narzędzia klinowego: a) bezpośrednio po procesie, b) drążone odkuwki ukształtowane odpowiednio ze stopu tytanu, stali i stopu aluminium [65]

Z uwagi na geometrię narzędzi oraz kinematykę ich ruchu, możliwy do otrzymania kształt odkuwek jest prosty i sprowadza się do stosunkowo krótkich i pojedynczych przewężeń w części centralnej lub skrajnej wyrobu. Ograniczeniem metody jest również niewielka wartość stopnia gniotu, który można uzyskać w trakcie walcowania. Jego wartość wynika z kąta pochylenia powierzchni kształtującej oraz długości narzędzia. Zastosowanie większych wartości kątów pochylenia powierzchni kształtującej umożliwia oczywiście uzyskanie większej redukcji średnicy, jednak może być przyczyną powstawania poślizgów i deformacji walcowanych stopni. Natomiast stosowanie niewielkich kątów pochylenia powierzchni kształtującej przy konieczności uzyskania większych redukcji średnicy, powoduje nadmierne wydłużenie płaskiego narzędzia (szczęki kształtującej).

Powyższe ograniczenia nie występują w procesie obciskania obrotowego trzema rolkami, którego schemat pokazanego na rys. 2.56. Proces obciskania tą metodą elementów drążonych można zrealizować według dwóch schematów kinematycznych narzędzi [138, 139]. W pierwszym z nich (rys. 2.56a), narzędzia rozmieszczone są co 120° względem osi obrotu materiału. Podczas procesu wykonują ruch obrotowy w tym samym kierunku i jednocześnie przemieszczają się w kierunku osi materiału. W wyniku oddziaływania powierzchni roboczych walców materiał wprawiany jest w ruch obrotowy, podczas którego następuje stopniowe redukowanie przekroju poprzecznego. W końcowym etapie procesu wyłączany jest ruch postępowy narzędzi, a pozostawiany ruch obrotowy, który koryguje ostatecznie niedokładności kształtu obciskanego wyrobu. Obciskanie odkuwek według drugiego schematu (rys. 2.56b) odbywa się również w wyniku oddziaływania trzech obrotowych narzędzi, przy czym tylko jedno wykonuje dodatkowy ruch postępowy w kierunku osi półfabrykatu. Zastosowanie trzech narzędzi, jednakowo przemieszczających się w kierunku kształtowanego materiału nie zmienia warunków kinematycznych w trakcie procesu. Przy zastosowaniu jednego narzędzia ruchomego, półfabrykat podparty jest przez dwie rolki pod kątem mniejszym od 120° i dopiero w fazie kalibrowania uzyskuje się symetryczne położenie narzędzi wokół odkuwki. Powoduje to zmianę warunków kinematycznych podczas kształtowania, co zwiększa niebezpieczeństwo wystąpienia poślizgów i deformacji przekrojów redukowanych stopni. Zmiana położenia osi półfabrykatu ogranicza również zakres stosowania metody do kształtowania odkuwek o kołowych przekrojach poprzecznych stopni. Niemniej jednak metoda ta, ze względu na łatwy sposób realizacji i prostą konstrukcję urządzenia, może być zastosowana do kształtowania nieskomplikowanych odkuwek oraz lokalnego przewężania tulei i rur [97]. Zaproponowano również koncepcję rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia do realizacji procesu według takiego schematu kształtowania [145, 149].

Realizacja procesu obciskania trzema przemieszczającymi się narzędziami, oprócz większej stabilności procesu pozwala na kształtowanie drążonych

odkówek o złożonych kształtach przekrojów poprzecznych (uzębienia kół, uzwojenia ślimaków, wielowypusty) [99, 102, 133].



Rys. 2.56. Schemat procesu obciskania obrotowego wyrobów drążonych: a) początek procesu (dla układu trzech narzędzi postępowych), b) początek procesu (dla układu jednego narzędzia postępowego), c) koniec procesu: 1, 2, 3 – walce, 4 – wsad, 5 – ukształtowana odkuwka

Proponowana technologia obciskania obrotowego wyrobów drążonych jest nowatorskim procesem i stanowi ciekawą alternatywę dla tradycyjnych metod wytwarzania drążonych osi i wałów. Głównymi zaletami technologii jest duża

wydajność, prosta konstrukcja narzędzi, możliwość kształtowania wyrobów z wsadu rurowego, poprawa własności wytrzymałościowych obciskanych wyrobów oraz łatwa automatyzacja. Prosta konstrukcja maszyny i narzędzi pozwala na efektywne kształtowanie wyrobów zarówno w małych seriach, jak i w warunkach produkcji masowej. Natomiast dzięki zaimplementowaniu w procesie obciskania obrotowego wsadu rurowego, uzyskuje się znacznie mniejsze zużycie materiału w odniesieniu do innych technik wytwarzania, takich jak: obróbka skrawaniem, czy konwencjonalne metody obróbki plastycznej. Ponadto, w przypadku obciskania obrotowego realizowanego na gorąco, nie ma problemów z usuwaniem zgorzeliny, która spada grawitacyjnie między rolkami dolnymi. Wszystko to czyni technologię obciskania obrotowego bardzo atrakcyjną dla przemysłu i pozwala przypuszczać, że proces będzie dalej rozwijany.

2.10. Podsumowanie przeglądu literatury

Zastosowanie wyrobów drążonych w budowie maszyn jest jednym ze sposobów obniżenia kosztów wytwarzania i eksploatacji maszyn. Jednak pełne wykorzystanie zalet elementów drążonych możliwe jest wówczas, gdy ich półwyroby będą w całości kształtowane jako drążone z wykorzystaniem metod obróbki plastycznej (z pozostawieniem niewielkich naddatków na wykańczającą obróbkę mechaniczną). Oprócz aspektów ekonomicznych za takim podejściem przemawiają również względy użytkowe. Zastosowanie metod plastycznego kształtowania elementów drążonych pozwala na polepszenie ich własności wytrzymałościowych (dzięki zachowaniu ciągłości włókien materiału oraz umocnieniu materiału w przypadku obróbki plastycznej na zimno). Takie rozwiązanie wymaga jednak opracowania zaawansowanych technologii plastycznego kształtowania, które umożliwią wytwarzanie elementów drążonych zarówno z wsadu pełnego, jak i drążonego (w postaci handlowych rur).

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej stwierdzono, że obecnie wykorzystuje się dużą grupę technologii plastycznego kształtowania elementów drążonych, które umożliwiają wytwarzanie zarówno półwyrobów, jak i wyrobów gotowych w szerokim zakresie wymiarów i kształtu. Jednakże w większości przypadków są to procesy przebiegające w kilku operacjach, charakteryzujące się dużym stopniem skomplikowania, które wymagają zastosowania drogich maszyn i urządzeń. W rezultacie efektywne stosowanie takich procesów kształtowania plastycznego możliwe jest dopiero w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej. Niestety specyfika krajowego przemysłu kuźniczego przejawia się dużym asortymentem wytwarzanych w niewielkich seriach produkcyjnych elementów, co niejednokrotnie ogranicza możliwość zastosowania obróbki plastycznej w procesach wytwarzania wyrobów drążonych.

W związku z powyższym celowym jest poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych, których wykorzystanie byłoby opłacalne już przy niewielkich seriach produkcyjnych. Opracowanie wydajnej i taniej technologii plastycznego kształtowania elementów drążonych pozwoli na podniesienie konkurencyjności przedsiębiorstw oraz poprawę efektywności procesów wytwarzania. Jedną z innowacyjnych metod wytwarzania drążonych części maszyn jest obciskanie obrotowe, które dobrze wpisuje się w systemy elastycznego wytwarzania drążonych części maszyn.

3. Cel, teza i uzasadnienie podjęcia tematu

Celem pracy jest przeprowadzenie kompleksowej analizy nowego procesu kształtowania elementów drążonych (typu stopniowane osie i wały) metodą obciskania obrotowego w zakresie:

- określenia jakościowych oraz ilościowych zależności między głównymi parametrami procesu, jakością kształtowanych elementów oraz takimi wielkościami jak: siły nacisku narzędzi, momenty obrotowe, warunki stabilnego przebiegu procesu;
- opracowania wytycznych na temat doboru parametrów procesu, gwarantujących uzyskanie wyrobów drążonych wolnych od wad;
- określenia zakresu stosowania proponowanej metody kształtowania wraz ze wskazaniem kierunków dalszego rozwoju technologii.

Realizację celu pracy oparto na wielowariantowych badaniach, składających się z analiz numerycznych, realizowanych w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia metodą elementów skończonych oraz prób doświadczalnych, wykonanych z zastosowaniem materiałów rzeczywistych w specjalnym agregacie kuźniczym.

Uwzględniając cel pracy oraz rezultaty dotychczasowych badań [129, 135, 143, 148] sformułowano następujące tezy pracy:

- **Zastosowanie technologii obciskania obrotowego pozwala na efektywne kształtowanie odkuwek drążonych z wykorzystaniem wsadów rurowych o zróżnicowanej grubości ścianek.**
- **Kompleksowa analiza teoretyczna, oparta o modelowanie numeryczne, bazujące na metodzie elementów skończonych umożliwia określenie takiego zakresu parametrów technologicznych procesu obciskania obrotowego, który gwarantuje kształtowanie odkuwek o zakładanej dokładności i jakości.**

W stosunku do obecnie stosowanych metod wytwarzania wyrobów drążonych obciskanie obrotowe ma szereg zalet, z których najważniejsze to: mniejsze siły kształtowania, zwiększenie własności wytrzymałościowych wyrobów, podniesienie wydajności produkcji oraz mniejsze koszty wdrożeniowe. Jednakże praktyczne zastosowanie technologii obciskania obrotowego wymaga przeprowadzenia szeregu prac teoretyczno – doświadczalnych, w trakcie których opracowana zostanie metodyka doboru głównych parametrów procesu, gwarantujących uzyskanie odkuwek o założonej jakości.

Obecnie w przemyśle obserwuje się brak technologii pozwalających na kształtowanie szerokiej grupy wyrobów drążonych typu stopniowane wałki i osie z zastosowaniem tanich maszyn i urządzeń. W rezultacie każda zmiana asortymentu wytwarzanych elementów wiąże się z koniecznością ponoszenia dużych nakładów inwestycyjnych. Wielokrotnie powoduje to, że w przypadku niewielkich serii produkcyjnych, wykorzystanie technik opartych o procesy obróbki plastycznej jest ekonomicznie nieuzasadnione. Proponowana metoda obciskania obrotowego wyrobów drążonych odznacza się niskimi kosztami wdrożeniowymi (prosta konstrukcja obrabiarki oraz tanie narzędzia – rolki). Z tego względu technologia obciskania obrotowego ma także szanse na zastosowanie zarówno w produkcji małoseryjnej, np. w przemyśle lotniczym (kształtowanie stopniowanych osi i wałków ze stopów metali nieżelaznych), jak i w produkcji wielkoseryjnej i masowej (przemysł maszynowy, motoryzacyjny).

4. Modelowanie numeryczne procesu obciskania obrotowego

Zastosowanie technik numerycznych w analizie procesów kształtowania plastycznego metali i ich stopów stało się obecnie powszechnym standardem. Szczególnie w przypadku opracowywania nowych technologii oraz optymalizacji dotychczas stosowanych procesów, modelowanie numeryczne prowadzone w wirtualnej przestrzeni komputera jest niezastąpionym narzędziem, umożliwiającym skrócenie czasu prac wdrożeniowych (technologiczno – konstrukcyjnych), obniżającym koszty prac badawczych i ułatwiającym pracę technologów i konstruktorów. Do głównych zalet modelowania można zaliczyć między innymi: możliwość dokładnego oszacowania parametrów siłowych procesu, określenie wielkości trudnych do wyznaczenia innymi metodami (rozkładów intensywności odkształcenia, naprężenia, temperatury i in.), możliwość prognozowania zakłóceń w procesach kształtowania, a także możliwość analizy obciążenia narzędzi. Podstawową wadą modelowania numerycznego jest wysoki koszt oprogramowania komercyjnego oraz stosunkowo długi czas obliczeń w przypadku analizy złożonych procesów.

W oparciu o metody numeryczne dokonano oceny możliwości technologicznych kształtowania drążonych odkuwek stopniowanych wałków w procesach obciskania obrotowego trzema narzędziami w kształcie walców. Określono również związki pomiędzy poszczególnymi parametrami procesu oraz ich wpływ na przebieg obciskania i jakość uzyskanych odkuwek. Do obliczeń wykorzystano dostępne na rynku oprogramowanie bazujące na metodzie elementów skończonych (MES) Simufact Forming. Zastosowane oprogramowanie odznacza się dużą stabilnością obliczeń oraz umożliwia zamodelowanie złożonych ruchów narzędzi kształtujących. Wielokrotnie uzyskane podczas obliczeń numerycznych rozwiązania były z powodzeniem weryfikowane doświadczalnie, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w warunkach przemysłowych [29, 92, 94, 104–106, 125, 131, 132, 142].

Prowadzone analizy obejmowały wielowariantowe symulacje numeryczne kształtowania drążonych odkuwek stopniowanych wałków elementarnych z przewężeniami skrajnymi i środkowymi, a także kształtowania odkuwek drążonych wałków wielostopniowych. Z uwagi na skomplikowany charakter płynięcia metalu, obliczenia prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia 3D z uwzględnieniem zjawisk termicznych występujących podczas procesu. Głównym celem badań teoretycznych było:

- wyznaczenie kształtu odkuwek oraz określenie kinematyki płynięcia materiału podczas obciskania obrotowego;
- wyznaczenie rozkładów: intensywności odkształcenia, temperatury, naprężeń oraz kryterium zniszczenia w odkuwkach kształtowych metodą obciskania obrotowego;
- określenie przebiegów i wartości sił oraz momentów działających na narzędzia (rolki) w czasie procesu obciskania obrotowego;
- określenie warunków stabilnego przebiegu procesu kształtowania ze względu na możliwość wystąpienia zakłóceń w postaci niekontrolowanego poślizgu (utrata zdolności do wykonywania ruchu obrotowego przez wyrób kształtowany) oraz zgniecenia odkuwki;
- określenie możliwości technologicznych proponowanej metody kształtowania.

Cechą charakterystyczną procesu obciskania obrotowego jest stopniowa redukcja średnicy półfabrykatu (rys. 4.1) przez obracające się narzędzia, którą można zdefiniować stopniem gniotu:

$$\delta = D/d, \quad (4.1)$$

gdzie: D – średnica zewnętrzna półfabrykatu przed procesem, d – średnica zewnętrzna czopa po procesie obciskania.

Redukcja średnicy wsadu powoduje promieniowy kierunek płynięcia materiału, w wyniku czego następuje zwiększenie grubości ścianki o Δg w stosunku do wartości początkowej zastosowanej rury (wsadu):

$$\Delta g = g - g_o, \quad (4.2)$$

gdzie: g – grubość ścianki ukształtowanej odkuwki, g_o – grubość ścianki wsadu.

W trakcie kształtowania metal przemieszcza się również wzdłuż osi odkuwki, co powoduje zwiększenie jej długości o ΔL w stosunku do długości początkowej wsadu:

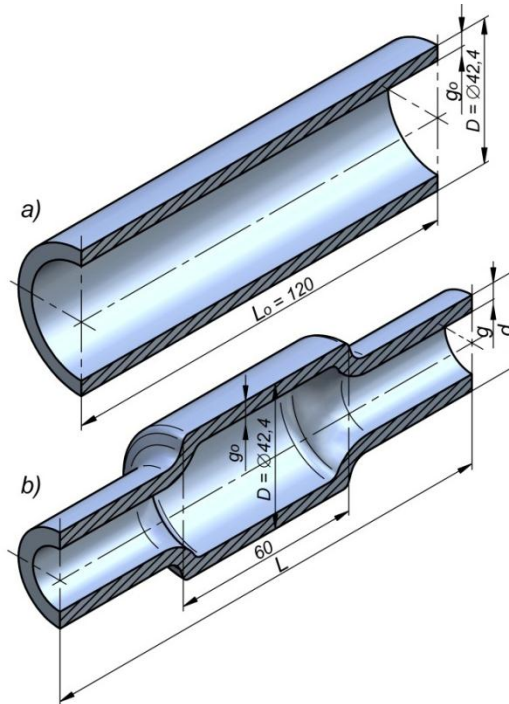
$$\Delta L = L - L_o, \quad (4.3)$$

gdzie: L – długość odkuwki, L_o – długość wsadu.

Oczywistym jest, że wzrost grubości ścianki oraz długości odkuwki jest zależny od przyjętych parametrów obciskania. Szczególnie istotne znaczenie w tym zakresie ma wartość przyjętego stopnia gniotu δ , stosunek początkowej grubości ścianki g_o do średnicy początkowej wsadu D (g_o/D – względna grubość ścianki) oraz stosunek prędkości postępowej v narzędzi w kierunku osi wsadu do ich prędkości obrotowej n (v/n).

4.1. Analiza MES procesu obciskania skrajnych stopni na elementarnych wałkach drążonych

Większość stopniowanych osi i wałów charakteryzuje się znacznie mniejszą średnicą skrajnych czopów w stosunku do stopni położonych w strefach centralnych. Jest to podyktowane względami konstrukcyjno – wytrzymałościowymi, które wynikają między innymi z konieczności utrzymania zbliżonej wytrzymałości elementu na całej jego długości oraz umożliwienia osadzenia na poszczególnych czopach dodatkowych elementów (koła zębate, łożyska, tuleje itp.). W związku z tym analizę numeryczną procesu rozpoczęto od procesu obciskania obrotowego elementarnych wałków drążonych ze skrajnymi przewężeniami (rys. 4.1). Schemat modelowanego procesu pokazano na rys. 4.2.

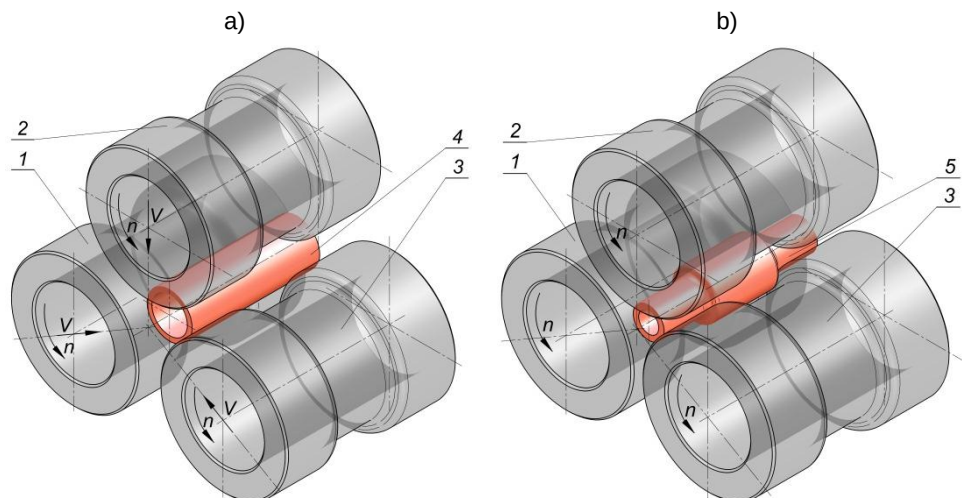


Rys. 4.1. Kształt i wymiary: a) półfabrykatu rurowego, b) obciskanej odkuwki elementarnego wałka drążonego

Założono przy tym, że odkuwki kształtowane będą metodą obciskania obrotowego na gorąco z półfabrykatów w postaci odcinków handlowych rur o różnych grubościach początkowych ścianki g_0 .

Na potrzeby prowadzonej analizy został opracowany zestaw modeli geometrycznych procesu obciskania, różniących się parametrami geometrycznymi i kinematycznymi procesu. Z uwagi na symetrię kształtowanej odkuwki (drążony wałek z dwustronnymi czopami) obliczenia prowadzono tylko dla jednej połowy

odkuwki, wprowadzając w połowie długości wsadu i narzędzi płaszczyznę symetrii.



Rys. 4.2. Schemat procesu obciskania obrotowego drążonej odkuwki elementarnego wałka: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1, 2, 3 – kształtowe rolki robocze, 4 – wsad w postaci odcinka rury, 5 – wyrób

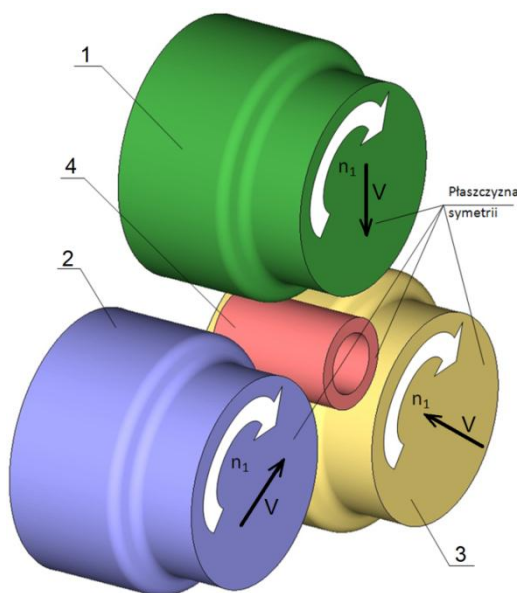
Jeden z opracowanych na potrzeby prowadzonej analizy modeli pokazano na rys. 4.3. W skład modelu wchodzi trzy identyczne narzędzia – 1, 2, 3, oraz wsad – 4. Narzędzia w kształcie stopniowanych walców zamodelowano jako obiekty sztywne. Natomiast wsady (odcinki rur w gatunku C45 o średnicy zewnętrznej $D = 42,4$ mm, grubościach ścianek g_o oraz długości $L_o = 120$ mm) zamodelowano jako obiekty sztywno - plastyczne za pomocą ośmiowęzłowych elementów pierwszego rzędu. Wybór tego gatunku stali nie był przypadkowy. Jest ona powszechnie stosowana na różnego rodzaju części maszyn, takie jak: koła zębate, wały, osie, wałki uzębione, korbowody i inne średnio obciążone elementy. Model materiałowy stali C45, który wykorzystano w obliczeniach zaczerpnięto z biblioteki zastosowanego programu [122] i opisany jest zależnością:

$$\sigma_p = 2859,85 \cdot e^{(-0,00312548 \cdot T)} \cdot \varepsilon^{(0,000044662 \cdot T - 0,101268)} \cdot e^{\left(\frac{-0,000027256 \cdot T + 0,000818308}{\varepsilon}\right)} \cdot \varepsilon^{(0,000151151 \cdot T - 0,00274856)}, \quad (4.4)$$

gdzie: T – temperatura (w zakresie od 700 °C do 1250 °C), ε – odkształcenie, $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia.

Ponadto w obliczeniach przyjęto, że: materiał wsadu w początkowym etapie procesu dla wszystkich analizowanych przypadków został nagrany w całej objętości do temperatury 1150 °C, zaś narzędzia podczas kształtowania miały

stałą temperaturę, która wynosiła 100 °C. Walce w czasie procesu obracały się w tę samą stronę z jednakową prędkością $n = 36$ obr/min i jednocześnie przemieszczały się w kierunku osi wsadu ze stałą prędkością v (zależną od wariantu obliczeń). Powierzchnię kontaktu kształtowanego materiału z narzędziami opisano modelem tarcia stałego. Z uwagi na fakt, że proces obciskania odkuwek realizowany był na gorąco, do obliczeń przyjęto wartość graniczną czynnika tarcia $m = 1$. Ponadto założono, że współczynnik wymiany ciepła między materiałem, a narzędziami wynosił 25 kW/m²K, a między materiałem i otoczeniem 0,35 kW/m²K.



Rys. 4.3. Model geometryczny procesu obciskania obrotowego skrajnych stopni drążonej odkuwki wałka (opis w tekście)

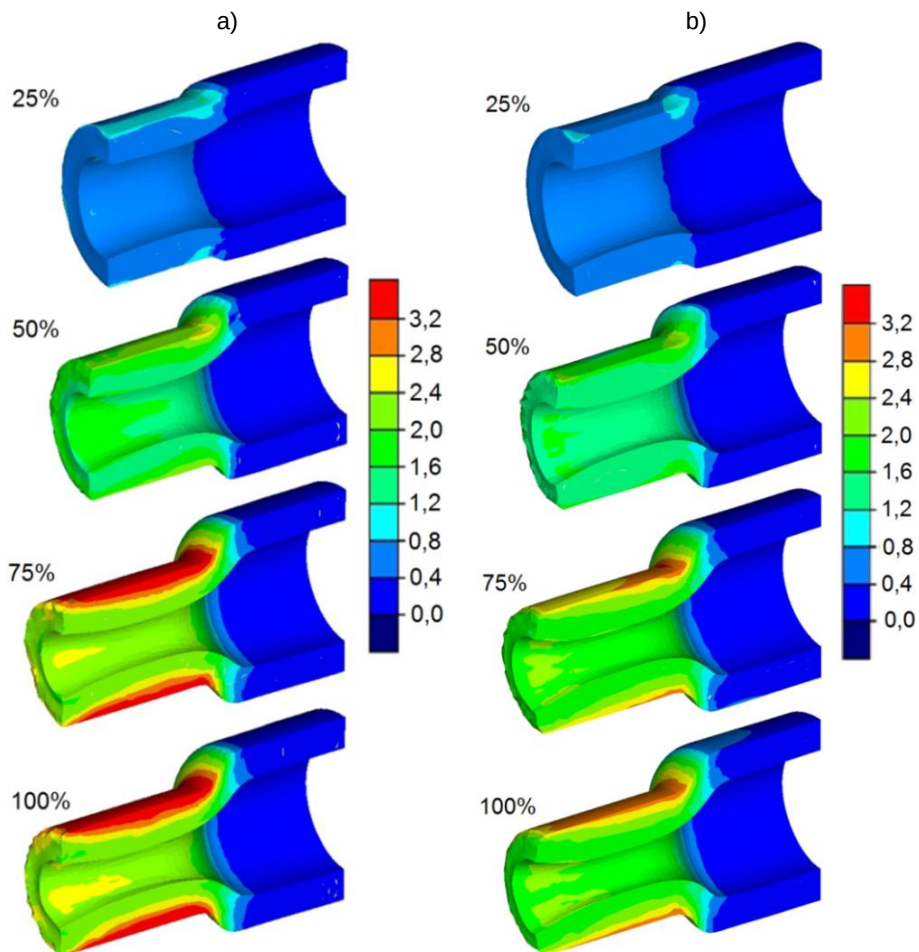
Jak już wcześniej wspomniano, obliczenia zostały przeprowadzone dla różnych parametrów geometrycznych i kinematycznych procesu. Grubości początkowe ścianek półfabrykatów g_0 przyjęto według ich dostępności w handlu i wynosiły one odpowiednio: 3,0; 5,0; 7,0; 9,0 oraz 11,0 mm. W trakcie symulacji numerycznych założono, że we wszystkich wariantach narzędzia będą obracały się ze stałą prędkością, natomiast parametrem, który będzie zmieniany w trakcie procesu jest prędkość przemieszczania się trzech rolek w kierunku osi wsadu, która wynosiła od 0,3 do 9 mm/s. Zmieniano również wartość stopnia gniotu δ w zakresie od 1,2 do 2,1. Szczegółowe parametry procesów, dla których prowadzono obliczenia zestawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Parametry technologiczne stosowane w trakcie symulacji MES procesu obciskania obrotowego stopnia skrajnego

Prędkość obrotowa narzędzi	n [obr/min]	36						
Prędkość liniowa narzędzi [mm/s]	v [mm/s]	0,3	0,6	1,2	2,4	4,8	6,0	9,0
Stosunek prędkości postępowej do obrotowej	v/n [mm/obr]	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	10,0	15,0
Średnica zewnętrzna półfabrykatu	D [mm]	42,4						
Grubość ścianki	g_o [mm]	3,0	5,0	7,0	9,0		11,0	
Stosunek grubości ścianki do średnicy wsadu	g_o/D	0,07	0,12	0,16	0,21		0,26	
Stopień gniotu	δ	1,2	1,5		1,8		2,1	

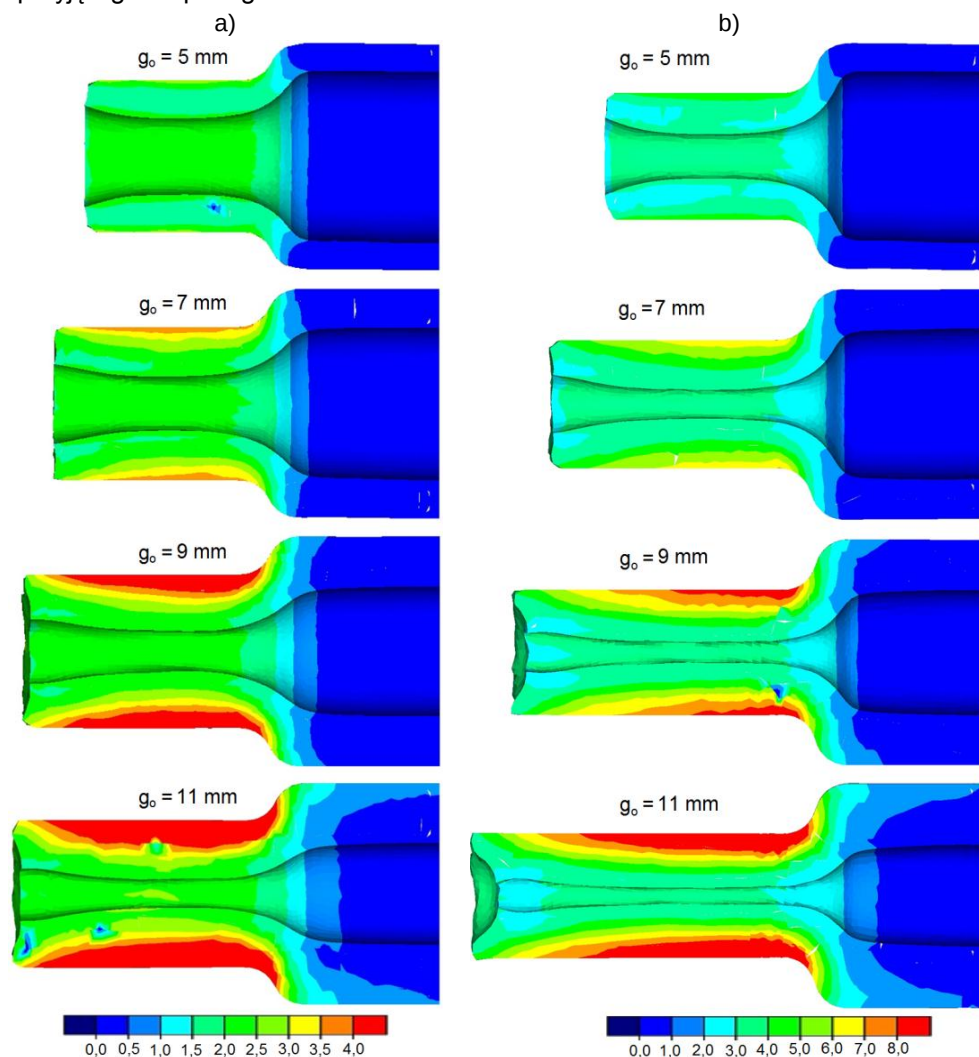
W efekcie wykonanych obliczeń uzyskano możliwość przeanalizowania kinematyki płynięcia materiału w procesie obciskania obrotowego odkuwek drążonych. Na rys. 4.4 przedstawiono progresję kształtu wyrobu w zależności od stopnia zaawansowania procesu dla dwóch rozważanych przypadków obciskania, realizowanych z różnymi prędkościami postępowymi narzędzi. W wyniku redukcji średnicy zewnętrznej wsadu następuje przemieszczanie materiału w kierunku osi odkuwki, co powoduje wzrost grubości ścianki. Można zaobserwować również przemieszczenia materiału wzdłuż osi odkuwki, szczególnie w obszarach przypowierzchniowych. Przyczynia się to do zwiększenia jej długości w stosunku do długości początkowej wsadu oraz zniekształcenia powierzchni czołowych (wywołanego nierównomiernym płynięciem materiału). W ostatnim etapie obciskania, po pokonaniu przez narzędzia wymaganej drogi, odpowiadającej przyjętemu stopniowi gniotu, wyłączany jest ruch postępowy walców, a pozostawiany ruch obrotowy, w efekcie czego następuje kalibrowanie kształtu odkuwki, w trakcie którego usuwane są nierówności powstałe w poprzednich fazach procesu. Na rys. 4.4 przedstawiono również rozkłady intensywności odkształcenia w przekrojach osiowych kształtowanych półfabrykatów. Widoczne jest, że w obszarze oddziaływania narzędzi materiał jest odkształcany na wskroś, w wyniku czego płynie on w kierunku osi wsadu. Jednak zaobserwowane odkształcenia nie są jednorodne w przekroju obciskanych stopni. W obszarach przypowierzchniowych materiał podlega większemu przerobowi plastycznemu w stosunku do stref centralnych (zlokalizowanych w pobliżu ścianki wewnętrznej). Jest to charakterystyczne dla rotacyjnych procesów obróbki plastycznej. Zjawisko to wiąże się z kinematyką procesu, w którym dochodzi do poślizgów pomiędzy kształtowanym materiałem, a narzędziami i generowania znacznych odkształceń

w kierunku obwodowym (przez siły tarcia). Odształcenia w kierunku obwodowym nie powodują zmiany geometrii wyrobu, jednak wpływają na znaczny wzrost intensywności odkształcenia (szczególnie w warstwach przypowierzchniowych). Spostrzeżenie to potwierdzają rozkłady intensywności odkształcenia wyznaczone dla większych prędkości postępowych narzędzi (rys. 4.4b). Pomimo identycznej grubości ścianki wsadu oraz takiego samego stopnia gniotu δ , uzyskano mniejsze wartości odkształceń w odkuwkach obciskanych z większymi prędkościami (szczególnie w warstwach przypowierzchniowych). Jest to efektem skrócenia drogi kształtowania wraz ze wzrostem prędkości narzędzi (dla $v/n = 4$ mm/obr odkuwka musi obrócić się 12 razy, zaś dla $v/n = 10$ mm/s wystarczy zaledwie 3 obroty do jej ukształtowania) i w rezultacie mniejszego udziału odkształceń zbędnych w kierunku obwodowym w procesie obciskania.



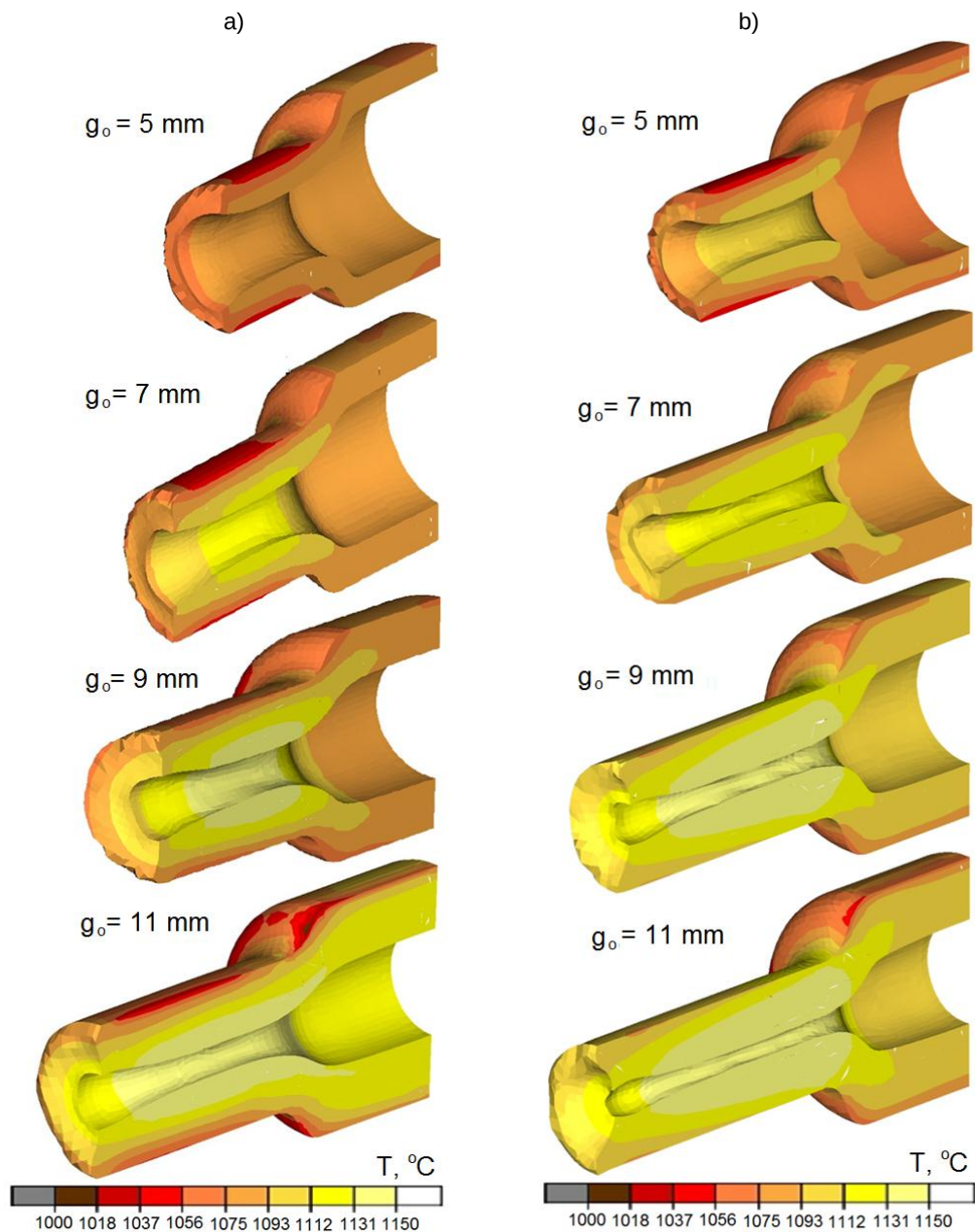
Rys. 4.4. Wyznaczona numerycznie progresja kształtu odkuwki wałka drążonego z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia w zależności od stopnia zaawansowania procesu ($g_0 = 7$ mm, $\delta = 1,5$): a) dla $v/n = 4$ mm/obr, b) dla $v/n = 10$ mm/obr

Na rys. 4.5 przedstawiono drążone odkuwki ze skrajnymi czopami, które uzyskano w trakcie symulacji procesów obciskania wsadów rurowych o różnych grubościach początkowych ścianek. Zaznaczono na nim również rozkłady intensywności odkształcenia. Widoczne jest, że wzrost grubości ścianki powoduje zwiększenie intensywności odkształcenia. Wynika to z konieczności przemieszczenia większej objętości materiału, zarówno w kierunku promieniomym, jak i w kierunku osiowym. Zaobserwowane zmiany odkształceń są duże. W przypadku zwiększenia grubości ścianki z 5 mm do 11 mm dochodzi do ponad dwukrotnego wzrostu intensywności odkształcenia. Podobny wpływ ma wartość przyjętego stopnia gniotu.

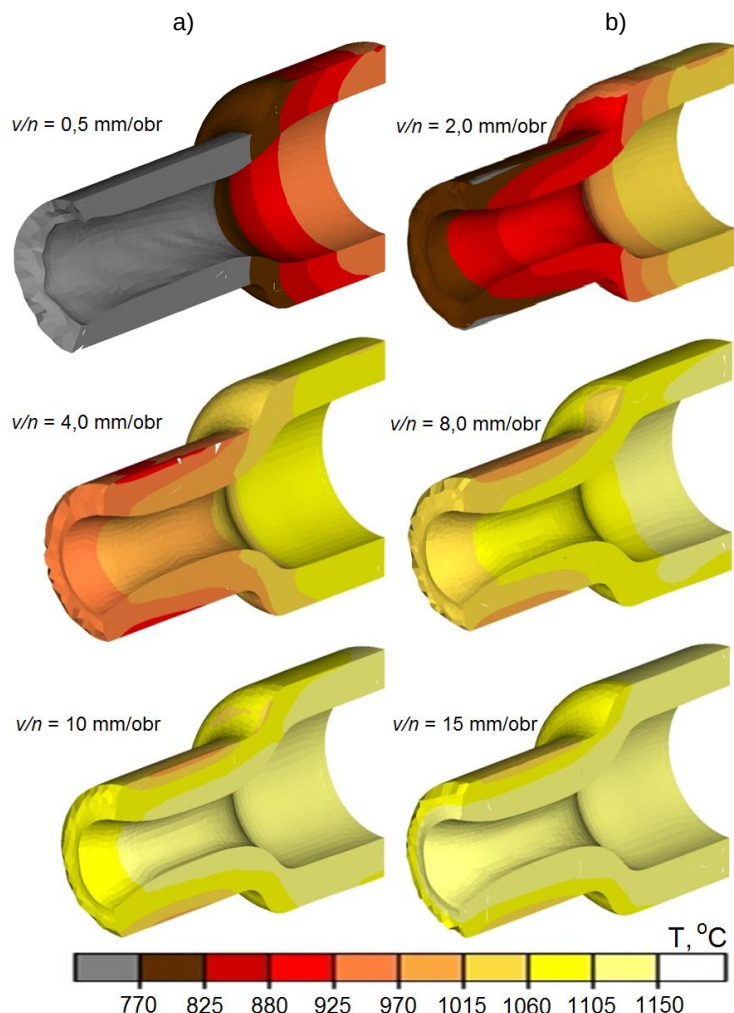


Rys. 4.5. Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia podczas procesu obciskania obrotowego odkuwek z półfabrykatów rurowych o różnych grubościach ścianek dla parametrów: a) $\delta=1,5$, $v/n=8,0$ mm/obr, b) $\delta=1,8$, $v/n=8,0$ mm/obr

Zwiększenie stopnia gniotu z $\delta = 1,5$ do $\delta = 1,8$ (co odpowiada średnicom kształtowanych stopni odpowiednio $d = 28,2$ mm oraz $d = 23,5$ mm) powoduje aż dwukrotny wzrost intensywności odkształcenia. Jednocześnie we wszystkich analizowanych wariantach maksymalne wartości odkształceń zlokalizowane są w warstwach przypowierzchniowych redukowanych czopów. Grubość początkowa ścianki półfabrykatu ma również wpływ na wymiary ukształtowanego stopnia. Wraz ze wzrostem grubości ścianki rury obserwuje się intensywne wydłużanie kształtowanego stopnia. Zjawisko to można tłumaczyć większymi oporami płynięcia materiału w kierunku promieniowym dla grubszych ścianek i w rezultacie osiowym płynięciem materiału w obszarze obciskanych stopni. Również parametry termiczne ukształtowanych odkuwek w dużym stopniu są uzależnione od grubości początkowej ścianki. Wyznaczony MES rozkład temperatury w końcowym etapie obciskania półfabrykatów o różnych grubościach ścianek pokazano na rys. 4.6. Pomimo takiego samego czasu obciskania wraz ze wzrostem grubości początkowej ścianki, zwiększa się wartość temperatury ukształtowanej odkuwki. Jest to związane z większą pojemnością cieplną półfabrykatów o grubszych ściankach, co pozwala na efektywne rekompensowanie powierzchniowych strat ciepła, wywołanych kontaktem materiału z chłodniejszymi narzędziami. W rezultacie kształtowanie odkuwek o grubszych ściankach może być realizowane z mniejszymi prędkościami, co poprawia stabilność procesu i dokładność uzyskanych elementów. Wyższe wartości temperatur zaobserwowano także dla odkuwek kształtowanych z większym stopniem gniotu δ (rys. 4.6b). Pomimo dłuższego czasu procesu obserwuje się mniejsze wychłodzenie materiału. Zjawisko to można tłumaczyć większą pracą odkształcenia plastycznego materiału, która zamieniana jest na ciepło, rekompensując spadek temperatury. Jak już wcześniej wspomniano, w przypadku obciskania półfabrykatów rurowych o niewielkich grubościach ścianek występuje duże niebezpieczeństwo nadmiernego wychłodzenia materiału (mała pojemność cieplna wsadu). Jest to szczególnie widoczne w przypadku obciskania półfabrykatów cienkościennych ($g_0/D < 0,1$). Dodatkowym czynnikiem, który wpływa na wartość temperatury jest niewielka prędkość kształtowania takich elementów (z uwagi na niebezpieczeństwo zgniecenia ścianki), co wydłuża czas operacji. Wpływ względnej prędkości postępowej narzędzi v/n na temperaturę obciskanych odkuwek pokazano na rys. 4.7. Podczas kształtowania odkuwek z małymi prędkościami dochodzi do dużego wychłodzenia materiału. Obszar spadku temperatury obejmuje praktycznie cały przekrój redukowanego stopnia, co może mieć negatywny wpływ na przebieg procesu i jakość ukształtowanych odkuwek.



Rys. 4.6. Wyznaczone numerycznie rozkłady temperatury dla końcowego etapu procesu obciskania obrotowego odkuwek z półfabrykatów o różnych grubościach ścianek dla parametrów: a) $\delta = 1,5$, $v/n = 8,0 \text{ mm/obr}$, b) $\delta = 1,8$, $v/n = 8,0 \text{ mm/obr}$ ($\delta = 1,5$, $v/n = 8 \text{ mm/obr}$)



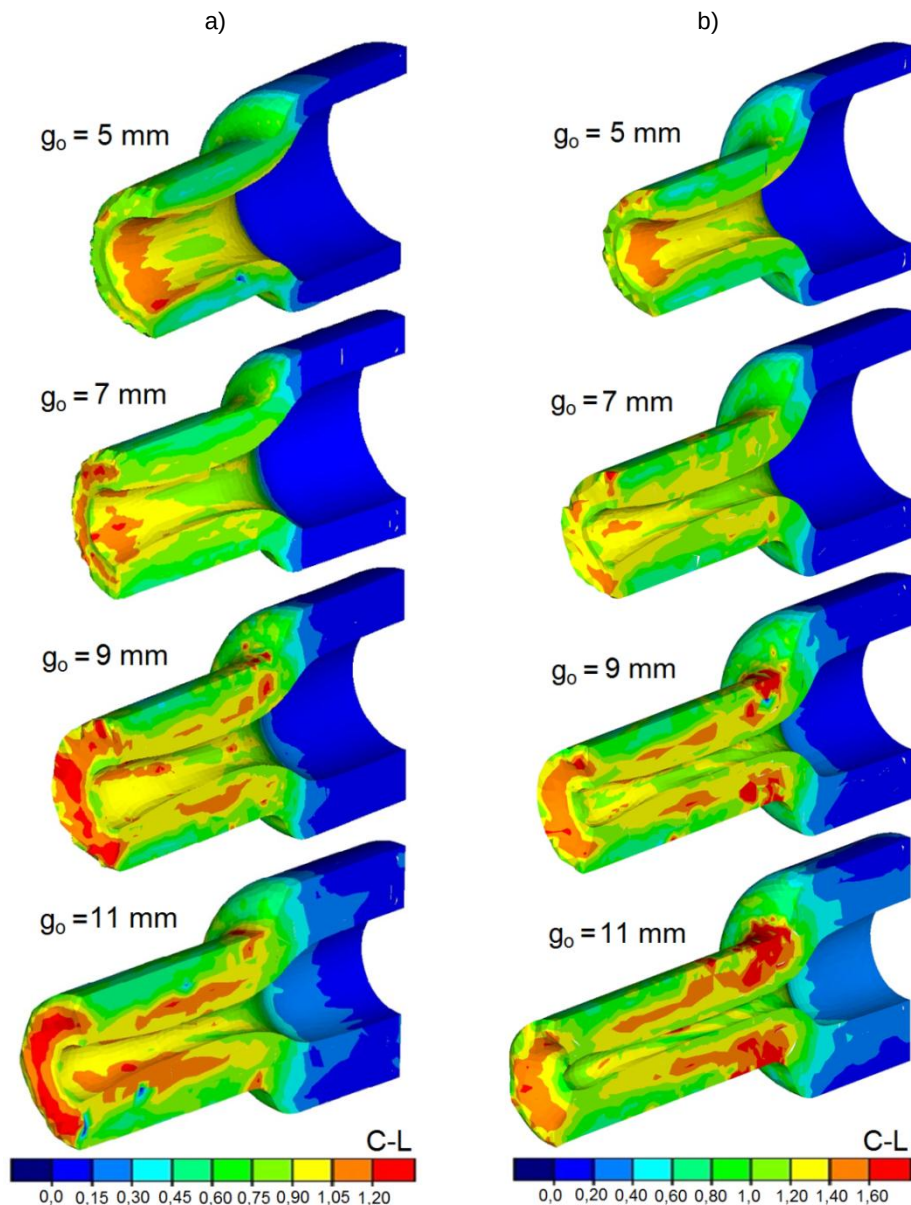
Rys. 4.7. Wyznaczone MES rozkłady temperatury dla końcowego etapu procesu obciskania obrotowego odkuwek z różnymi prędkościami względnymi narzędzi ($\delta = 1,5$, $g_o = 7,0$)

W trakcie prowadzonych obliczeń dokonano również oceny wpływu parametrów procesu obciskania na możliwość powstawania pęknięć w obciskanej odkuwce. W tym celu wykorzystano znormalizowane kryterium Cockrofta-Lathama, opisanie zależnością [90]:

$$C = \int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon, \quad (4.5)$$

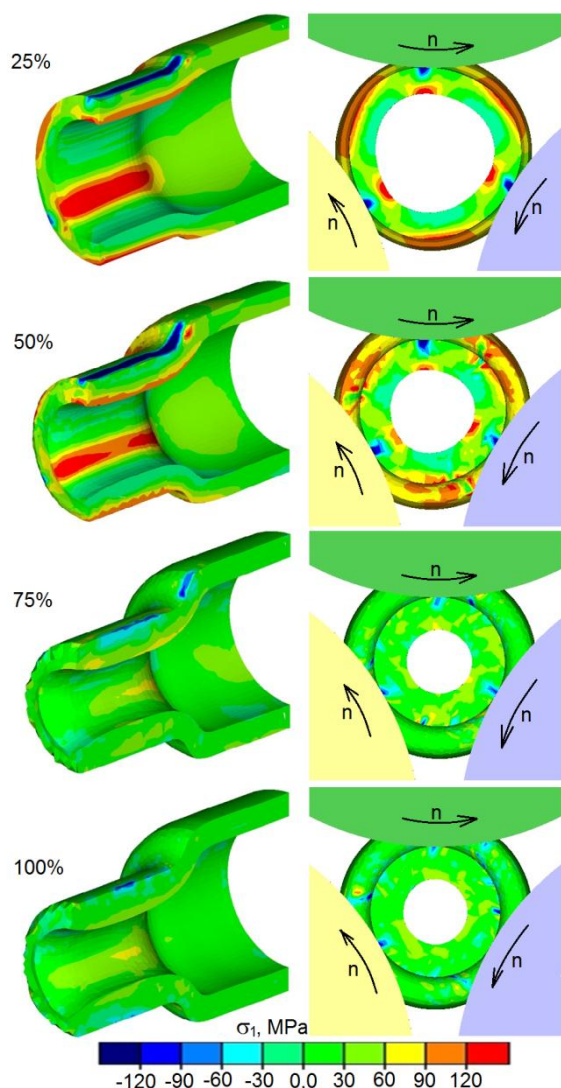
gdzie: σ_1 – największe naprężenie główne, σ_i – intensywność naprężeń, ε – odkształcenie, C – wartość całki Cockrofta-Lathama.

Otrzymane rezultaty obliczeń (rys. 4.8) wskazują, iż w przypadku obciskania drążonych odkuwek wałków elementarnych, najbardziej narażone na pękanie są strefy zlokalizowane w pobliżu otworu kształtowanego stopnia. W tych obszarach koncentrują się największe wartości całki Cockrofta-Lathama.



Rys. 4.8. Wyznaczone numerycznie rozkłady kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama dla końcowego etapu obciskania obrotowego odkuwek z półfabrykatów o różnych grubościach ścianek, dla parametrów: a) $\delta = 1,5$, $v/n = 8$ mm/obr, b) $\delta = 1,8$, $v/n = 8$ mm/obr

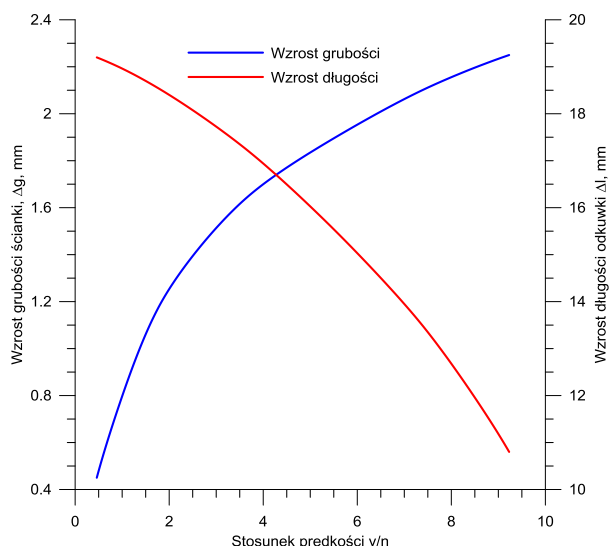
Zasięg występowania maksymalnych wartości kryterium jest niewielki i ograniczony do warstw przypowierzchniowych otworu kształtowanego stopnia oraz powierzchni czołowych odkuwki. Ponadto zauważono, że wraz ze wzrostem grubości ścianki zwiększają się wartości całki Cockrofta-Lathama, co jest związane z większymi oporami plastycznego płynięcia materiału oraz wzrostem cyklicznie zmiennych naprężeń głównych (powodujących naprzemienne ściskanie i rozciąganie materiału w warstwach powierzchniowych otworu odkuwki), (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Wyznaczone MES rozkłady maksymalnego naprężenia głównego w kolejnych etapach obciskania skrajnego stopnia odkuwki dla parametrów procesu: $g_o = 5 \text{ mm}$, $\delta = 1,5$, $v/n = 8 \text{ mm/obr}$

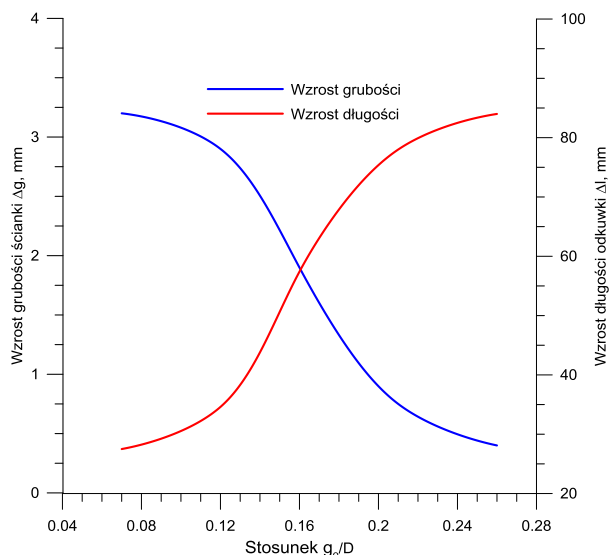
W efekcie tak niekorzystnego rozkładu naprężeń może dochodzić do niskocyklowego pękania zmęczeniowego materiału w warstwach powierzchniowych otworu odkuwki. Przy czym ewentualne pęknięcia powinny mieć charakter powierzchniowy, a ich głębokość nie powinna przekraczać nadkładu, pozostawionego na późniejszą obróbkę wykańczającą. Na wartość stałej Cockrofta-Lathama ma również wpływ wielkość stopnia gniotu, z którym kształtowane są odkuwki. Generalnie zwiększenie redukcji średnicy zewnętrznej odkuwki powoduje wzrost wartości kryterium zniszczenia. Jednak w przypadku obciskania półfabrykatów o większych grubościach ścianek uzyskane rozkłady mają nieco inny charakter. Strefa maksymalnych wartości kryterium przesuwa się do obszarów centralnych kształtowanych stopni oraz obszarów przejściowych pomiędzy odkształcanymi stopniami i powierzchniami swobodnymi. Taki charakter rozkładów jest spowodowany większymi oporami płynięcia materiału w kierunku promieniowym odkuwki, co powoduje intensywne płynięcie materiału (głównie w warstwach powierzchniowych), zarówno w kierunku obwodowym, jak i osiowym. Efektem jest silna owalizacja przekroju poprzecznego kształtowanych stopni, która nasila zjawisko skręcania obciskanych stopni odkuwki.

W trakcie symulacji numerycznych określono także wpływ podstawowych parametrów kształtowania (δ , g_0/D i v/n) na wzrost grubości ścianki Δg oraz długości odkuwki Δl . Największy wpływ na kształt obciskanych stopni ma względna prędkość narzędzi (v/n). Wzrost prędkości postępowej narzędzi v w stosunku do ich prędkości obrotowej n skraca drogę kształtowania i powoduje intensywniejszy przyrost grubości ścianki Δg oraz przyczynia się do zmniejszenia przyrostu długości odkuwki Δl (rys. 4.10).



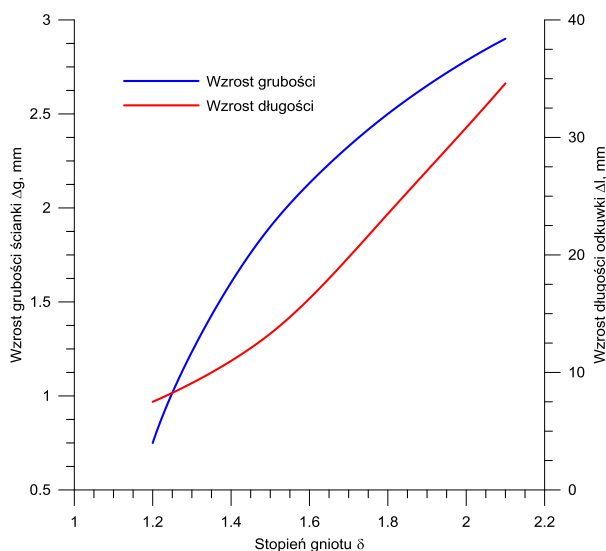
Rys. 4.10. Wpływ prędkości przemieszczania się promieniowego narzędzi w stosunku do ich prędkości obrotowej na zmianę grubości ścianki oraz długości odkuwki wyznaczony dla parametrów: $\delta = 1,5$, $g_0 = 7$ mm

Również duży wpływ na kinematykę płynięcia materiału ma grubość początkowa ścianki zastosowanego wsadu. Wraz ze wzrostem względnej grubości ścianki g_0/D zwiększają się opory odkształcenia plastycznego w kierunku promieniowym, co powoduje zmniejszenie przyrostu grubości ścianki odkuwki, przy jednoczesnym gwałtownym zwiększeniu jej długości (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Wpływ grubości początkowej ścianki w stosunku do średnicy wsadu na zmianę grubości ścianki oraz długości odkuwki, wyznaczony dla parametrów $\delta = 2,1$, $v/n = 8 \text{ mm/obr}$

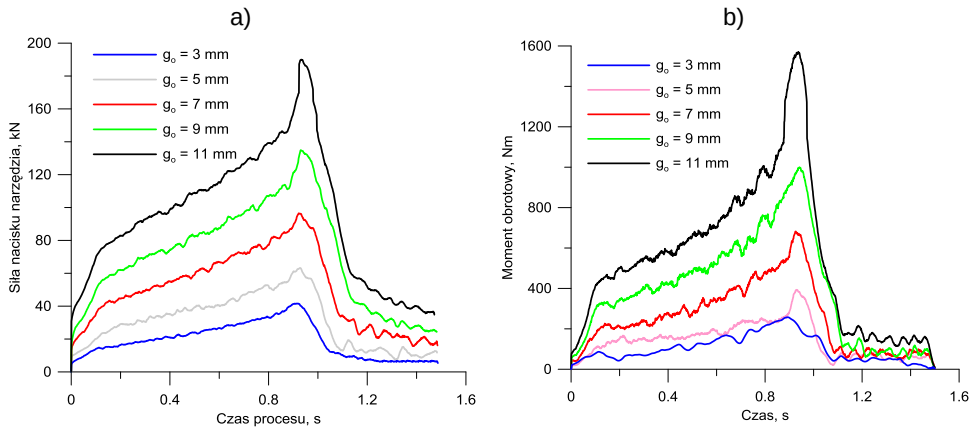
Także wraz ze wzrostem stopnia gniotu δ zwiększa się zarówno grubość ścianki jak i długość odkuwki (rys. 4.12). Związane jest to z koniecznością przemieszczenia większych objętości materiału, powodowaną zwiększającą się redukcją przekroju poprzecznego. Intensywność przyrostu grubości ścianki i długości odkuwki uzależniona jest od dwóch pozostałych parametrów, tj. względnej grubości ścianki i względnej prędkości narzędzi (g_0/D i v/n).



Rys. 4.12. Wpływ stopnia gniotu δ na wzrost grubości ścianki oraz długości obciskanej odkuwki, wyznaczony dla parametrów: $g_0 = 5 \text{ mm}$, $v/n = 8 \text{ mm/obr}$

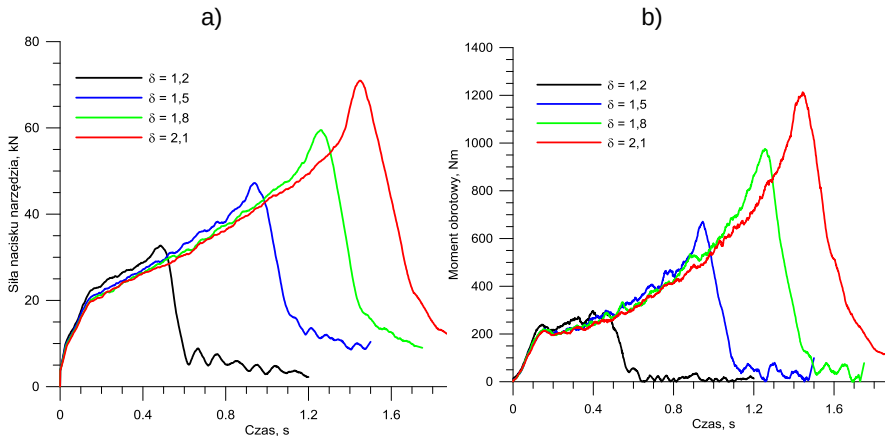
Równie ważnymi parametrami, które analizowano podczas prowadzonych symulacji numerycznych były przebiegi sił i momentów kształtowania. Trafne oszacowanie wartości maksymalnych tych parametrów ułatwia poprawne opracowanie technologii oraz konstrukcji narzędzi i agregatu kuźniczego. Ponadto, znajomość charakterystyk siłowych pozwala w łatwy sposób monitorować przebieg procesu pod kątem pojawienia się zjawisk zakłócających jego stabilny przebieg. Przykładowe rozkłady parametrów siłowych (siły nacisku narzędzia oraz momentu obrotowego) wyznaczone MES w trakcie prowadzonych symulacji obciskania obrotowego przedstawiono na rys. 4.13 – 4.15. Z uwagi na zastosowaną symetrię prezentowane przebiegi sił i momentów odnoszą się do procesu kształtowania pojedynczego przewężenia. Dla elementarnego wałka z dwustronnymi czopami wartości będą dwukrotnie większe. Cechą charakterystyczną uzyskanych rozkładów jest ich zbliżony kształt. Z informacji zawartych na wykresach wynika, że proces obciskania odkuwki elementarnego wałka drążonego można podzielić na trzy podstawowe etapy. W pierwszym, w wyniku nacisku narzędzi następuje lokalne uplastycznienie materiału, czemu odpowiada gwałtowny wzrost sił i momentów. W drugim etapie procesu, przemieszczające się promieniowo narzędzia redukują średnicę zewnętrzną wsadu, co powoduje stopniowy wzrost sił i momentów. Końcowe fazy drugiego etapu związane są z gwałtownym wzrostem sił i momentów, wywołanym kontaktem środkowego stopnia odkuwki (nieodkształcanego) z narzędziami. W ostatnim etapie, podczas kalibrowania (wyłączony jest ruch postępowy narzędzi) usuwane są nierówności powstałe podczas redukowania przekroju poprzecznego obciskanych stopni odkuwki.

W rezultacie obserwuje się szybki spadek parametrów siłowych procesu. Wpływ większości parametrów procesu obciskania na wartości sił i momentów wydaje się oczywisty.

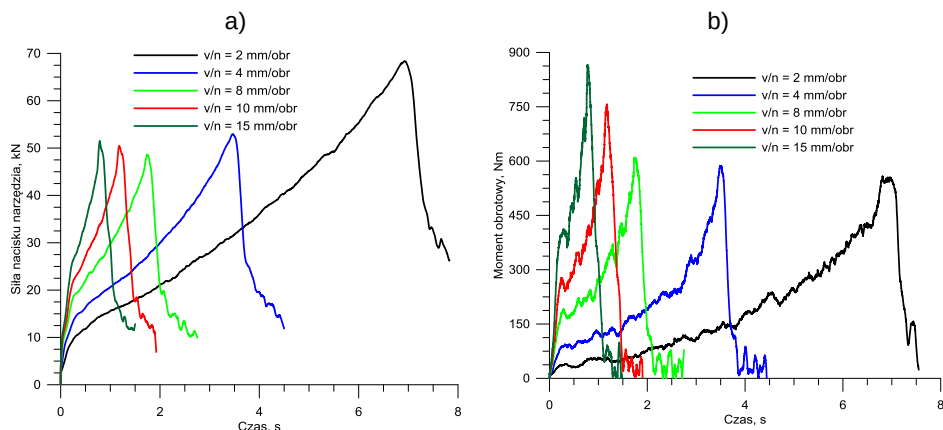


Rys. 4.13. Wyznaczony MES przebiegi parametrów siłowych w procesie obciskania obrotowego skrajnych stopni z parametrami: $\delta = 1,5$, $v/n = 6$ mm/obr: a) siła nacisku narzędzia, b) moment obrotowy

Wraz ze wzrostem grubości ścianki wsadu zwiększa się objętość materiału przemieszczana przez walce, co powoduje widoczny wzrost siły nacisku narzędzi i momentu obrotowego (rys. 4.14). Podobnie, zwiększenie stopnia gniotu δ powoduje wzrost sił nacisku narzędzi i momentów obrotowych (rys. 4.14). Natomiast wpływ prędkości względnej narzędzi ma nieco inny charakter, głównie na wartości ekstremalne siły nacisku narzędzi (rys. 4.15 oraz rys. 4.16).

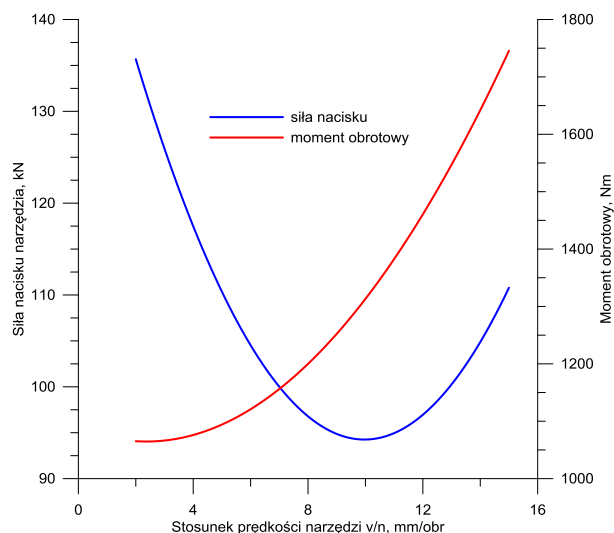


Rys. 4.14. Wyznaczony MES przebiegi parametrów siłowych w procesie obciskania obrotowego skrajnych stopni z parametrami: $g_o = 7$, $v/n = 10$ mm/obr: a) siły nacisku narzędzi, b) momenty obrotowe



Rys. 4.15. Wyznaczony MES przebiegi parametrów siłowych w procesie obciskania obrotowego skrajnych stopni z parametrami: $g_o = 7$, $\delta = 1,5$: a) siły nacisku narzędzi, b) momenty obrotowe

Minimalne wartości siły nacisku zarejestrowano dla pośrednich prędkości narzędzi. Dla niewielkich prędkości obserwuje się wzrost siły, podobnie jak w przypadku dużych prędkości. Wzrost siły podczas obciskania z małymi prędkościami narzędzi jest spowodowany spadkiem temperatury materiału (dłuższy czas realizacji procesu), co powoduje zwiększenie oporów odkształcenia plastycznego.

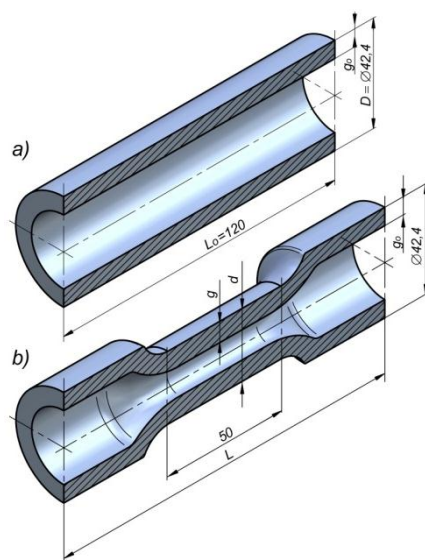


Rys. 4.16. Wyznaczony MES wpływ prędkości względnej narzędzi v/n na wartości maksymalne siły nacisku i momentu obrotowego podczas obciskania odkuwek elementarnych wałków drążonych z parametrami: $g_o = 9$ mm, $\delta = 1,8$

Kształtowanie z dużymi prędkościami narzędzi ogranicza niebezpieczeństwo wychłodzenia materiału, jednak powoduje silną owalizację przekroju poprzecznego odkuwki, która jest usuwana dopiero podczas kalibrowania. W rezultacie zwiększa się pole kontaktu materiału z narzędziami, co ma swoje odzwierciedlenie w szybkim wzroście siły nacisku. Nieco inny wpływ ma prędkość narzędzi na wartości momentu obrotowego. W zakresie niewielkich prędkości momenty obrotowe osiągają najmniejsze wartości. Następnie wraz ze wzrostem prędkości narzędzi obserwuje się szybki wzrost wartości maksymalnych momentów.

4.2. Analiza MES procesu obciskania centralnych stopni na elementarnych wałkach drążonych

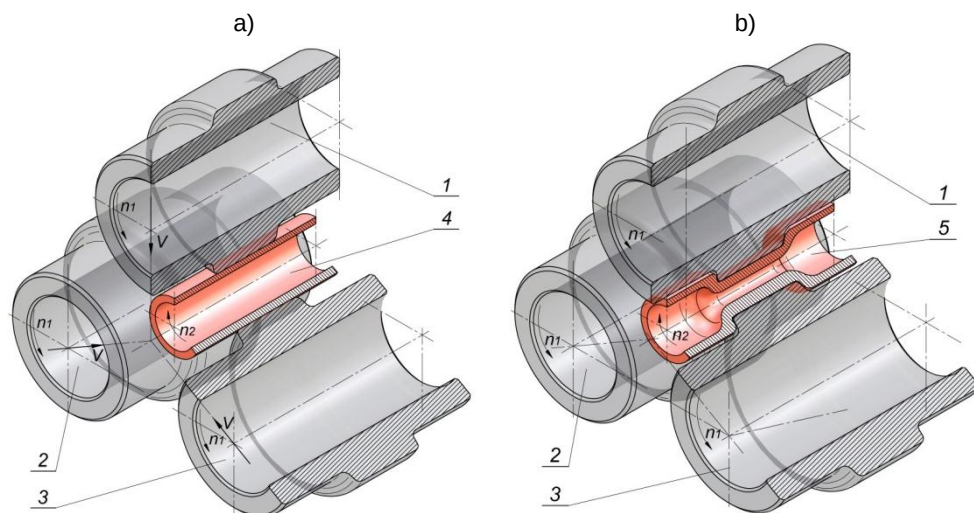
W budowie maszyn rzadko stosuje się osiowosymetryczne elementy drążone z przewężeniami położonymi w centralnej części, zaś powszechnie występują drążone elementy, w których nie jest zachowana symetria, np. mają jedno skrajne przewężenie lub są stopniowane jednostronnie. W takim przypadku możliwe jest kształtowanie odkuwek w układzie podwójnym (z centralnym przewężeniem), a następnie ich rozdzielenie na pojedyncze elementy. W większości przypadków podczas obciskania tego typu elementów będą występowały podobne zależności między poszczególnymi parametrami, jak dla procesu kształtowania stopni skrajnych. Stąd w bieżącym podrozdziale przedstawiono jedynie wybrane wyniki z modelowania numerycznego kształtowania centralnych przewężeń na półfabrykatach rurowych (rys. 4.17).



Rys. 4.17. Kształt półfabrykatu – a) oraz drążonej odkuwki elementarnego wałka z centralnym przewężeniem – b)

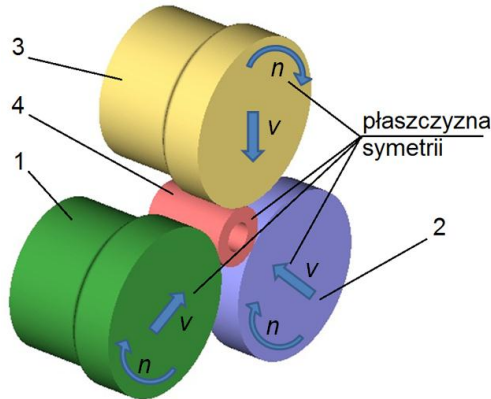
Podobnie jak poprzednio, obliczenia zostały oparte o metodę elementów skończonych, w trakcie których modelowano proces kształtowania odkuwek na gorąco z półfabrykatów w postaci odcinków handlowych rur o różnych grubościach początkowych ścianki g_0 .

Schemat procesu obciskania drążonych odkuwek ze stopniami centralnymi jest identyczny do tego, który opisano w poprzednim podrozdziale. Zasadnicza różnica związana jest z kształtem narzędzi, które w części środkowej wyposażone są w stopień o większej średnicy. W trakcie procesu redukują one przekrój poprzeczny w środkowej części półfabrykatu, kształtując centralne przewężenie (rys. 4.18). Skrajne odcinki odkuwki nie podlegają kształtowaniu i wchodzą w kontakt z narzędziami dopiero w fazie kalibrowania.



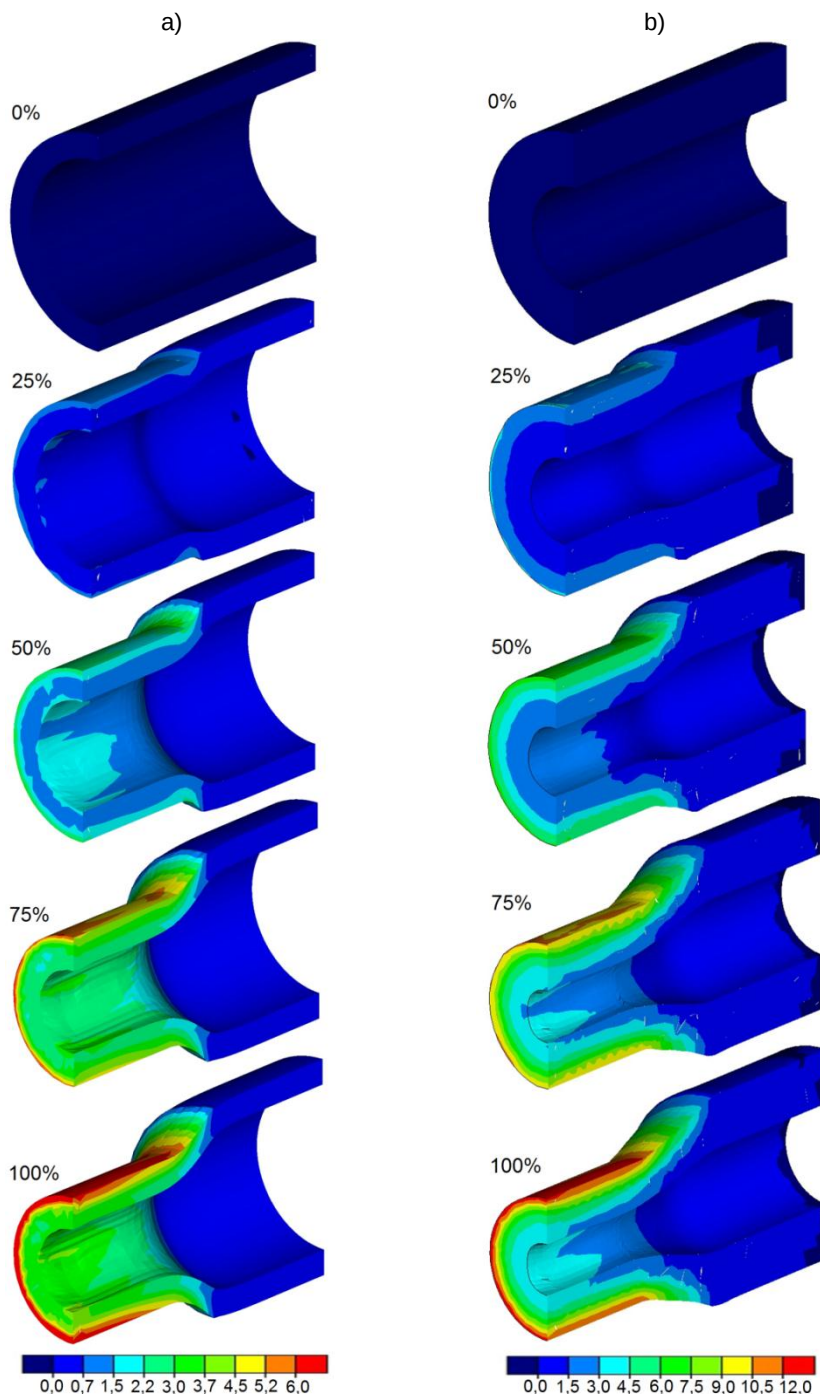
Rys. 4.18. Schemat procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek elementarnych wałków: a) początek procesu, b) koniec procesu [128]

Przykładowy model geometryczny procesu obciskania, który zastosowano w obliczeniach przedstawiono na rysunku 4.19. Podobnie jak poprzednio obliczenia wykonano tylko dla 1/2 odkuwki, wprowadzając płaszczyznę symetrii w połowie długości obciskanego stopnia. Również warunki brzegowe modeli (temperatura, czynnik tarcia, współczynnik wymiany ciepła, model materiałowy), a także parametry kinematyczne procesu i geometryczne wsadów, które przyjęto do symulacji były identyczne, jak dla kształtowania stopni zewnętrznych, (zgodnie z tabelą 4.1).



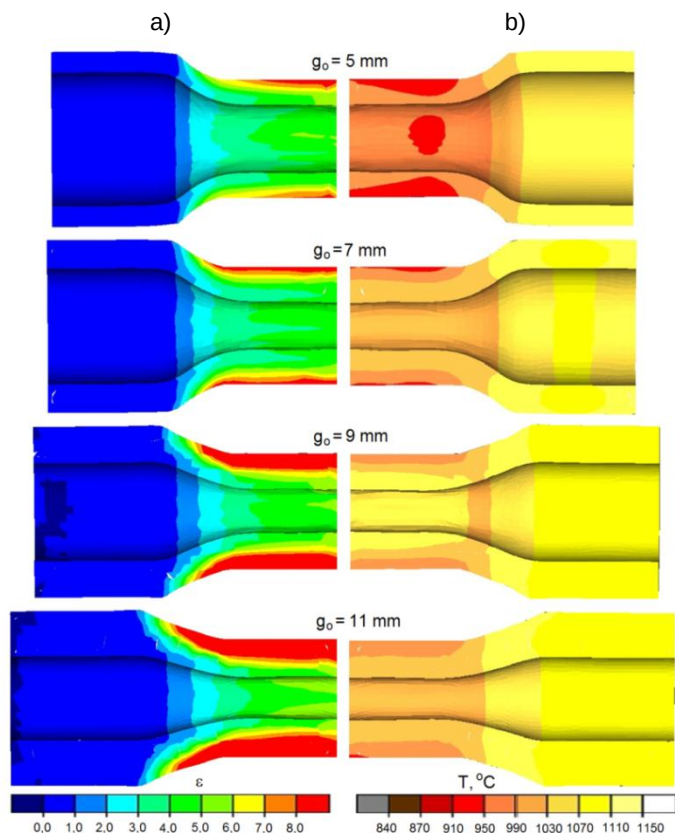
Rys. 4.19. Model geometryczny procesu obciskania obrotowego centralnych stopni drążonej odkuwki wałka: 1, 2, 3 – narzędzia, 4 – wsad (odcinek rury)

Progresję kształtu odkuwek elementarnego wałka drążonego z centralnym przewężeniem, którą wyznaczono MES dla parametrów procesu $v/n = 2$, $\delta = 1,5$ i dwóch grubości początkowych ścianki wsadu ($g_o = 5$ mm oraz $g_o = 11$ mm) pokazano na rys. 4.20. Można stwierdzić, że i w tym przypadku początkowa grubość ścianki półfabrykatu ma duże znaczenia na sposób płynięcia materiału. Kształtowanie centralnych stopni na półfabrykatkach o mniejszej grubości ścianki powoduje głównie promieniowe płynięcie materiału, czego efektem jest intensywny wzrost grubości ścianki i stosunkowo niewielkie wydłużenie odkuwki (rys. 4.20a). Zastosowanie wsadów o większych grubościach sprzyja intensywnemu wydłużaniu odkuwki, zaś przyrost grubości ścianki w strefie oddziaływania narzędzi jest niewielki (rys. 4.20b). Ponadto, wydłużenie odkuwki jest związane głównie z powierzchniowym płynięciem materiału w strefie oddziaływania narzędzi. W rezultacie podczas przemieszczania się promieniowego narzędzi część objętości materiału płynie w warstwach wierzchnich w kierunku skrajnych czopów (nieodkształczanych). Następnie po opuszczeniu przez materiał strefy oddziaływania walców nie podlega on dalszemu kształtowaniu. Efektem takiej kinematyki płynięcia materiału jest utworzenie stożkowej lub hiperboloidalnej (w zależności od prędkości względnej narzędzi v/n oraz wielkości stopnia gniotu δ) powierzchni przejściowej między redukowanym stopniem centralnym, a czopami skrajnymi, które nie podlegają kształtowaniu. W rezultacie obszar przejściowy staje się strefą wydłużenia odkuwki. Jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ prowadzi do niekontrolowanego wydłużenia półfabrykatu, a jednocześnie w tych obszarach następuje pocienienie ścianki. Na rys. 4.20 przedstawiono także rozkłady intensywności odkształcenia. Oczywiście jest, że zwiększenie grubości ścianki wsadu powoduje zwiększenie wartości odkształceń. Jest to spowodowane między innymi przemieszczaniem większych objętości materiału, zarówno w kierunku promieniowym, jak i osiowym.



Rys. 4.20. Wyznaczona MES progresja kształtu odkuwek drążonych wałków elementarnych ze środkowymi przewężeniami obciskanych z parametrami: a) $v/n = 2 \text{ mm/obr}$, $\delta = 1,5$, $g_0 = 5 \text{ mm}$, b) $v/n = 2 \text{ mm/obr}$, $\delta = 1,5$, $g_0 = 11 \text{ mm}$

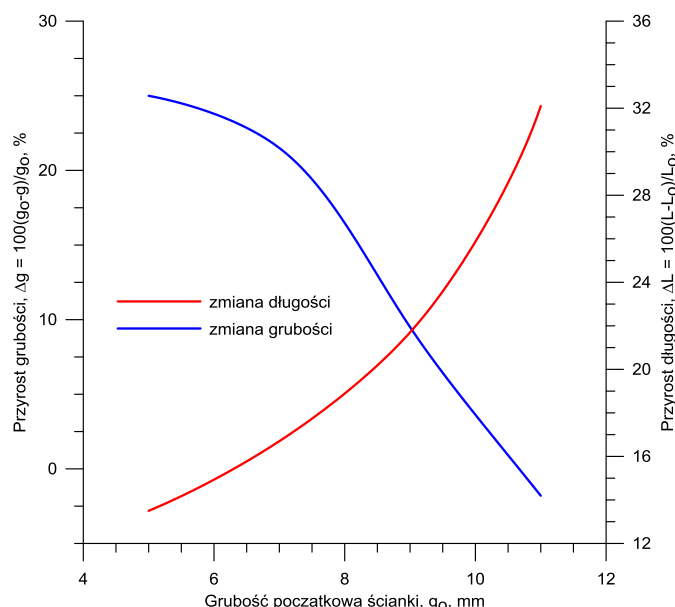
Należy zaznaczyć, że wyznaczone odkształcenia mają charakter niejednorodny. Maksymalne wartości odkształceń zlokalizowane są w warstwach powierzchniowych i w miarę zbliżania się w kierunku otworu obserwuje się stopniowy ich spadek. Ponadto, obciskanie półfabrykatów o mniejszych grubościach ścianek sprzyja obniżeniu niejednorodności odkształceń. Zwiększenie grubości ścianki powoduje wzrost gradientu odkształceń w kierunku promieniowym. Przyczynia się również do znacznego wzrostu wartości maksymalnych odkształceń w warstwach powierzchniowych (rys. 4.21a). Koncentracja odkształceń w warstwach przypowierzchniowych obciskanych stopni jest cechą charakterystyczną dla rotacyjnych procesów obróbki plastycznej. Wywołana jest między innymi występowaniem odkształceń zbędnych, generowanych przez siły tarcia w kierunku obwodowym. Oprócz wpływu parametrów geometrycznych wsadu na sposób płynięcia materiału, grubość ścianki półfabrykatów rurowych jest ściśle skorelowana z wartością i rozkładem temperatury w ukształtowanych odkuwkach (rys. 4.21b).



Rys. 4.21. Wyznaczone MES rozkłady dla końcowych etapów obciskania środkowych przewężeń na półfabrykatach rurowych o różnej grubości ścianki dla parametrów procesu: $\delta = 1,5$, $v/n = 4$ mm/obr: a) intensywności odkształcenia, b) temperatury

Zwiększenie grubości ścianki kształtowanych półfabrykatów powoduje wzrost wartości końcowej temperatury odkuwek. Jest to oczywiste i wynika ze znacznie większej pojemności cieplnej wsadów o grubszej ściance. Podczas obciskania grubościennych wsadów, powierzchniowy spadek temperatury, który jest efektem kontaktu materiału z narzędziami, jest szybko rekompensowany ciepłem przekazywanym ze stref centralnych półfabrykatu. W przypadku kształtowania odkuwek o niewielkich grubościach ścianek dochodzi do wychłodzenia materiału praktycznie na całej grubości ścianki redukowanego stopnia. W rezultacie kształtowanie odkuwek o niewielkich grubościach ścianek jest dużo trudniejsze, a często nawet niemożliwe do zrealizowania.

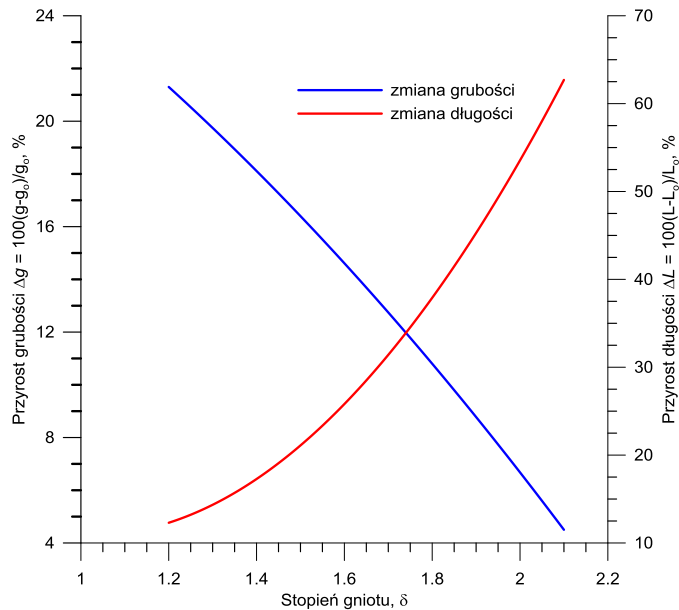
Wpływ początkowej grubości ścianki półfabrykatu na zmianę grubości ścianki oraz długości odkuwki przedstawiono na rys. 4.22. Największy przyrost grubości ścianki obciskanego stopnia występuje dla cienkościennych półfabrykatów. Następnie w miarę zwiększania się grubości początkowej przyrost jest mniej intensywny, a nawet dla grubości $g_0 = 11$ mm obserwuje się niewielkie pocienienie ścianki. Odwrotną tendencję można zauważyć dla zmian długości. Dla niewielkich grubości ścianki przyrost długości również jest stosunkowo niewielki i wraz ze zwiększaniem się grubości ścianki następuje intensywne wydłużanie odkuwki w strefie przejściowej.



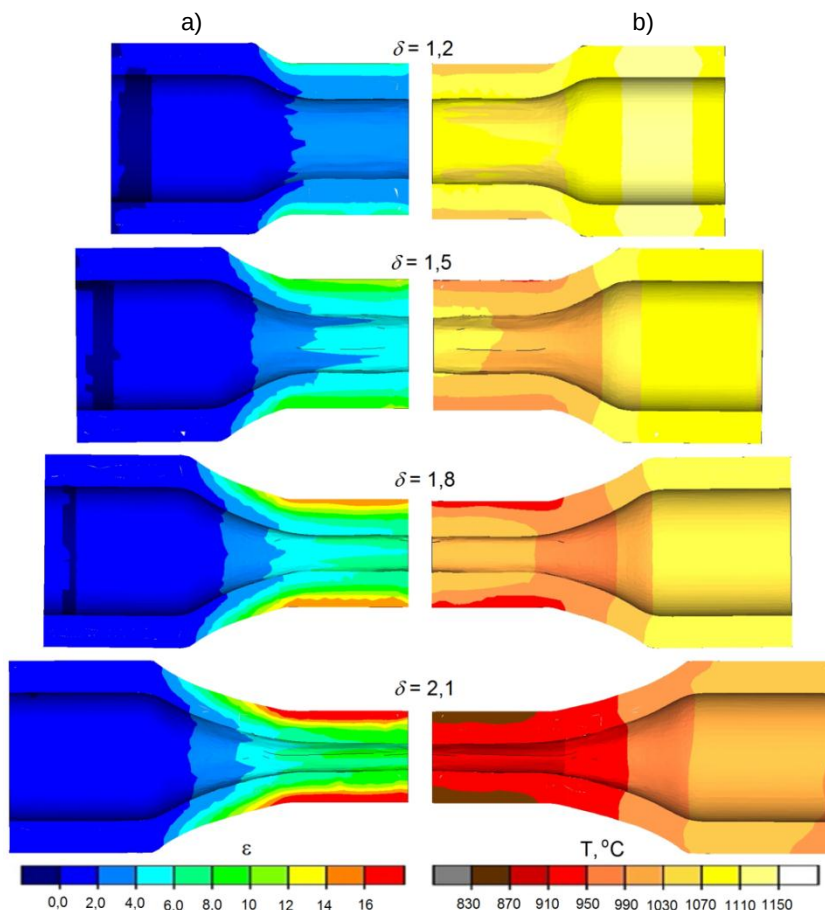
Rys. 4.22. Wyznaczone MES zmiany wymiarów odkuwki (grubości ścianki i długości odkuwki) dla procesu realizowanego z parametrami: $v/n = 5$ mm/obr, $\delta = 1,5$

Podobny wpływ na kinematykę płynięcia materiału ma stopień gniotu. Jego wartość związana jest z redukcją średnicy wsadu ($\delta = D/d$), a więc ilością

materiału przemieszczanego przez narzędzia. Wraz ze wzrostem stopnia gniotu zwiększa się względna grubość ścianki kształtowanego stopnia (g/d), co utrudnia płynięcie materiału w kierunku promieniowym. W rezultacie zmniejszeniu ulega przyrost grubości ścianki, a zwiększa się wydłużenie odkuwki (rys. 4.23). Wielkość stopnia gniotu ma również wpływ na wartości odkształceń i temperatury w odkuwce. Zgodnie z rys. 4.24 zwiększenie redukcji średnicy obciskanego stopnia powoduje wzrost wartości i niejednorodności rozkładów intensywności odkształceń. W przypadku temperatury obserwuje się odwrotne zjawisko. Pomimo większej pracy odkształcenia plastycznego, wraz ze wzrostem stopnia gniotu obserwuje się spadek temperatury (głównie w obszarze obciskanego stopnia). Wychłodzenie materiału jest oczywiście skutkiem dłuższego czasu realizacji procesu podczas kształtowania odkuwek z większym stopniem gniotu. W przypadku obciskania półfabrykatu ze stopniem gniotu $\delta = 1,2$ czas procesu wynosi 3 sekundy, jego wzrost do $\delta = 2,1$ powoduje wydłużenie czasu procesu do 8 sekund (przy niezmiennych pozostałych parametrach procesu).

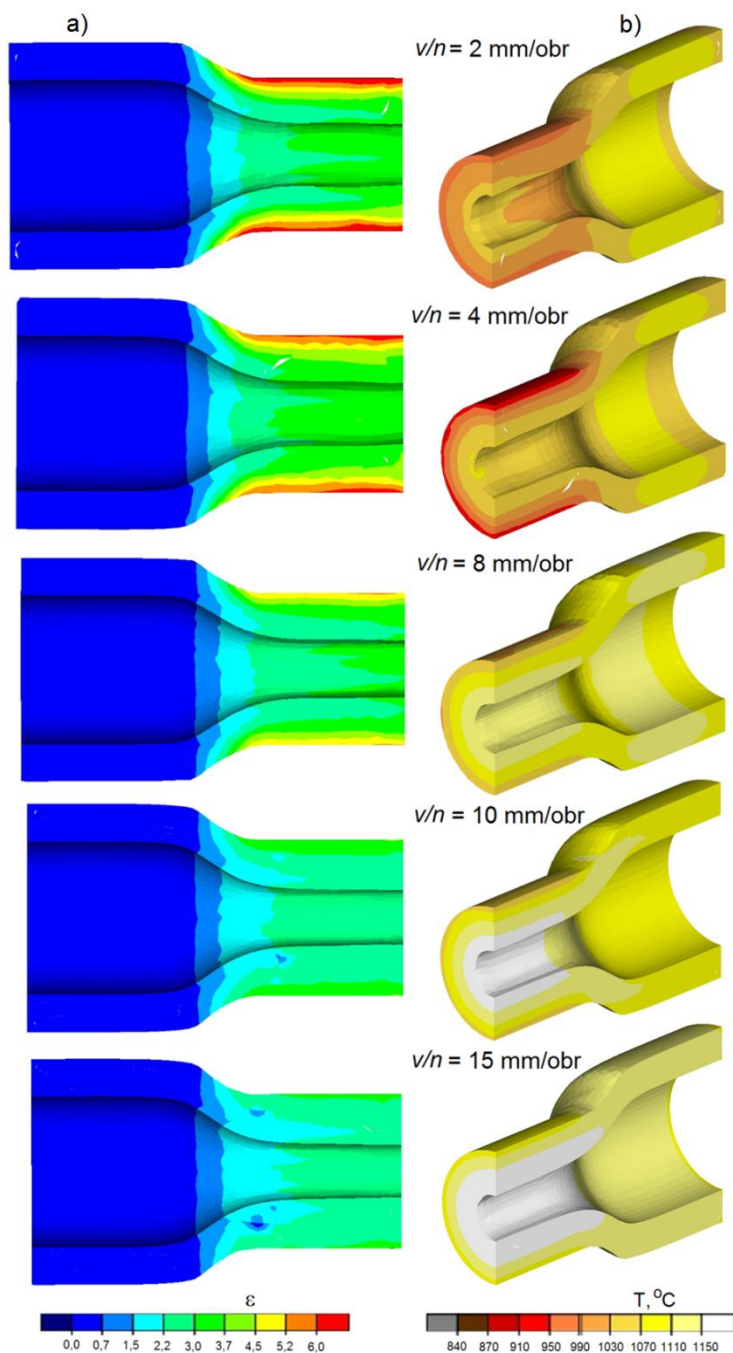


Rys. 4.23. Wyznaczone MES zmiany wymiarów odkuwki (grubości ścianki i długości odkuwki) w zależności od stopnia gniotu dla procesu realizowanego z parametrami:
 $g_0 = 7 \text{ mm}$, $v/n = 4 \text{ mm/obr}$



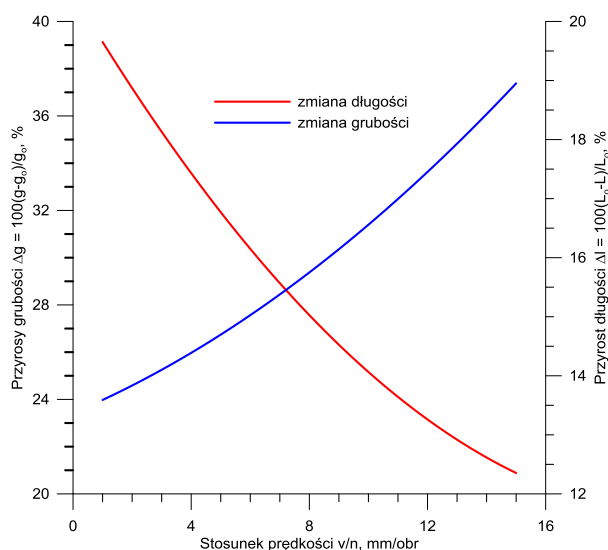
Rys. 4.24. Wyznaczony MES rozkład dla końcowych etapów obciskania środkowych przewężeń na półfabrykatach rurowych z różnymi stopniami gniotu dla parametrów procesu: $v/n = 4 \text{ mm/obr}$, $g_0 = 7 \text{ mm}$: a) intensywności odkształcenia, b) temperatury

Innym parametrem, wpływającym na przebieg procesu obciskania jest prędkość względna narzędzi (v/n). Na podstawie rys. 4.25 można stwierdzić, że kształtowanie odkuwek z małymi prędkościami generuje znacznie większe odkształcenia w warstwach wierzchnich zredukowanego stopnia (głównie w kierunku obwodowym). Wydłuża się wtedy również czas obciskania, co wpływa niekorzystnie na wydajność procesu oraz może powodować nadmierny spadek temperatury materiału. Zbyt duże zwiększenie prędkości narzędzi niesie jednak niebezpieczeństwo zgniecenia ścianki półfabrykatu rurowego. Dlatego zakres optymalnych prędkości narzędzi (w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań) zawiera się w przedziale $v/n = (4 \div 10) \text{ mm/obr}$.



Rys. 4.25. Wyznaczony MES rozkład dla końcowych etapów obciskania środkowych przewężeń na półfabrykatów rurowych z różnymi prędkościami dla parametrów procesu: $\delta = 1,5$, $g_o = 7$ mm: a) intensywności odkształcenia, b) temperatury

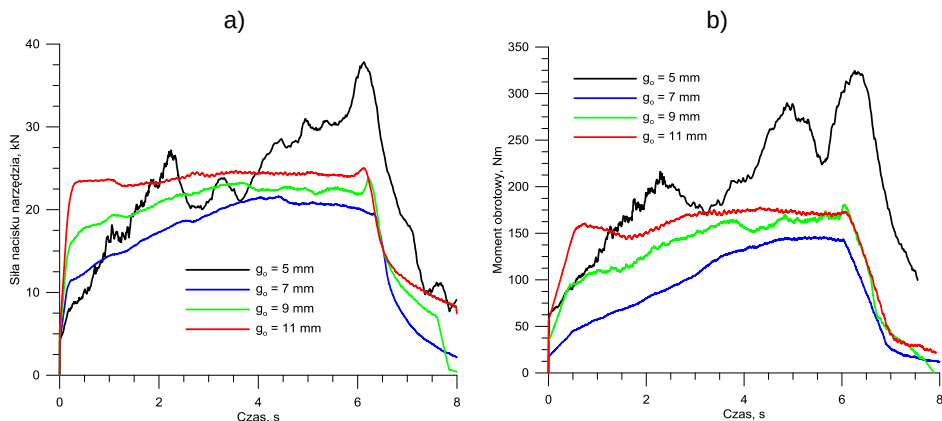
Większe prędkości należy stosować przy kształtowaniu półfabrykatów o mniejszych grubościach ścianek, co pozwala ograniczyć spadek temperatury. Mniejsze prędkości należy zaś stosować w przypadku większych grubości ścianek oraz większych stopni gniotu, co rekompensuje większe opory płynięcia materiału oraz zmniejsza owalizację podczas fazy kształtowania. Względna prędkość narzędzi ma także wpływ na parametry geometryczne odkuwek. Okazuje się, że wraz ze wzrostem względnej prędkości postępowej walców zwiększa się grubość ścianki obciskanego stopnia oraz zmniejsza wydłużenie odkuwki (rys. 4.26).



Rys. 4.26. Wyznaczone MES zmiany wymiarów odkuwki (grubości ścianki i długości odkuwki) dla procesu realizowanego z parametrami: $g_0 = 7$ mm, $\delta = 1,5$

Parametry geometryczne i kinematyczne procesu mają również wpływ na przebieg charakterystyk siłowych podczas obciskania środkowych przewężeń na półfabrykatów rurowych. W większości przypadków wzrost któregośkolwiek z parametrów prowadzi do zwiększenia wartości sił nacisku narzędzi i momentów obrotowych. Wyjątkiem są parametry procesu, przy których dochodzi do dużych spadków temperatury materiału (niewielka grubość ścianek, długi czas realizacji procesu). Przykładem mogą być rozkłady sił nacisku narzędzi i momentów obrotowych (rys. 4.27), wyznaczone dla różnych grubości początkowych ścianki, przy stałych pozostałych parametrach ($v/n = 2$ mm/obr, $\delta = 1,5$). Z uwagi na zastosowaną symetrię, wartości sił i momentów odnoszą się do procesu kształtowania połowy odkuwki, wprowadzona symetria nie ma natomiast wpływu na charakter uzyskanych rozkładów. Podczas kształtowania centralnego przewężenia na półfabrykatów o względnej grubości $g_0/D > 0,12$ charakterystyki

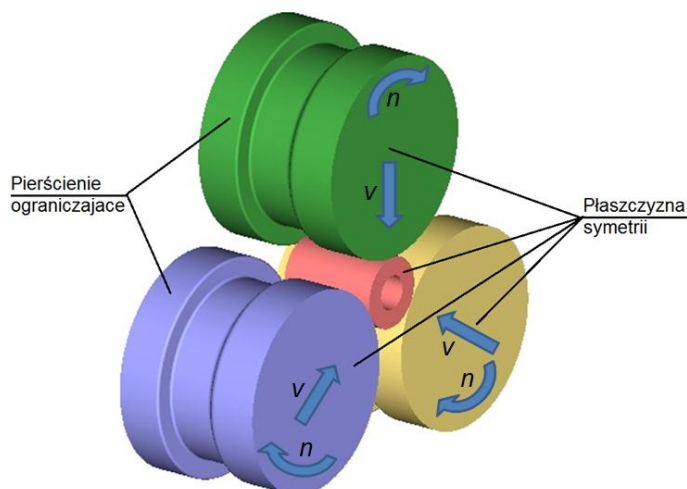
siłowe mają podobny kształt, a maksymalne wartości sił i momentów rosną wraz ze zwiększaniem się grubości początkowej ścianki g_0 . W stosunku do przebiegów wyznaczonych dla procesu obciskania skrajnych stopni (opisanych w poprzednim podrozdziale) przebiegi sił i momentów w ustalonej fazie (podczas kształtowania) przyjmują względnie stałe wartości, co można tłumaczyć brakiem oporów płynięcia materiału w kierunku osiowym poza strefą oddziaływania narzędzi. Można zauważyć także, że wraz ze wzrostem grubości ścianki charakterystyki stają się bardziej płaskie, zaś podczas obciskania centralnych stopni na półfabrykatów o mniejszych grubościach względnych ścianek ($g_0/D < 0,12$) przebiegi mają inny charakter. Obserwuje się tutaj ciągły wzrost sił i momentu z charakterystycznymi oscylacjami wartości. Dodatkowo wartości maksymalne sił i momentów (w końcowej fazie kształtowania) są znacznie większe w stosunku do występujących podczas obciskania półfabrykatów o ponad dwukrotnie większej grubości początkowej ścianki. Taki charakter sił i momentów jest ewidentnie związany z temperaturą, która w przypadku niewielkich grubości ścianek szybko spada, powodując wzrost oporów odkształcenia plastycznego materiału.



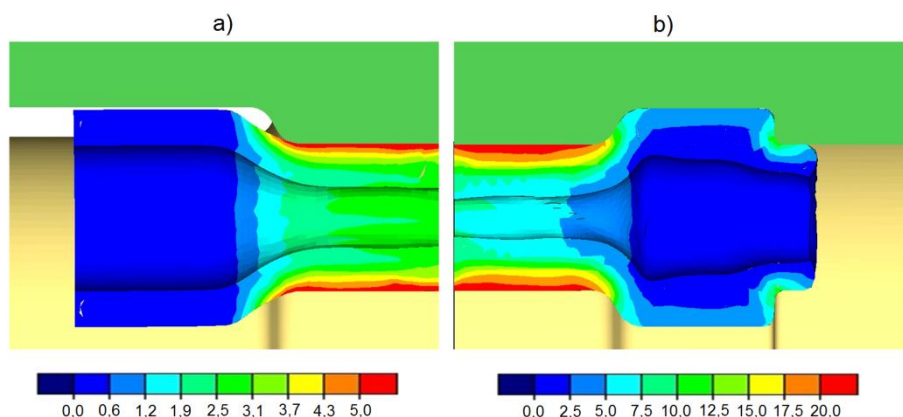
Rys. 4.27. Wyznaczone MES przebiegi parametrów siłowych w procesie obciskania obrotowego centralnego stopnia z parametrami: $\delta = 1,5$, $v/n = 2$ mm/obr: a) siły nacisku narzędzi, b) momenty obrotowe

Niekorzystne zjawisko nadmiernego wydłużenia oraz pocienienia ścianki w strefie przejściowej można wyeliminować lub znacznie zmniejszyć poprzez ograniczenie osiowego płynięcia materiału. W tym celu zaproponowano zastosowanie specjalnych kołnierzy (pierścieni) oporowych, wykonanych na narzędziach (rys. 4.28), których zadaniem jest powstrzymanie osiowego przemieszczania materiału. W rezultacie materiał podczas kształtowania płynie intensywnie w kierunku promieniowym, znacznie zwiększając grubość ścianki obciskanego stopnia. Takie rozwiązanie, co pokazano na rys. 4.29, daje dobre rezultaty odnośnie kształtu odkuwki w strefie przejściowej oraz przyrostu

grubości ścianki. Należy jednak zaznaczyć, że ograniczenie osiowego płynięcia materiału powoduje znaczny wzrost oporów odkształcenia plastycznego, co wpływa na zwiększenie intensywności odkształcenia (rys. 4.29b) w stosunku do procesu realizowanego bez pierścieni ograniczających (rys. 4.29a). Tym samym taki proces będzie wymagał znacznie większej pracy, niezbędnej do ukształtowania odkuwki.



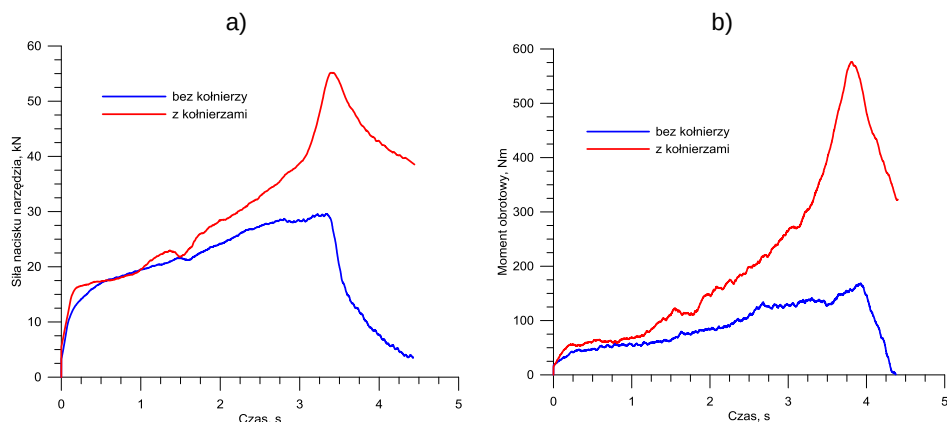
Rys. 4.28. Model procesu obciskania obrotowego narzędziami z dodatkowymi pierścieniami oporowymi, ograniczającymi osiowe płynięcie metalu



Rys. 4.29. Kształt odkuwek z centralnym przewężeniem wraz z rozkładem intensywności odkształcenia ($v/n = 4 \text{ mm/obr}$, $\delta = 1,5$, $g_0 = 7 \text{ mm}$) wyznaczony podczas obciskania:
a) bez kołnierzy ograniczających b) z kołnierzami ograniczającymi

Ze względu na ograniczoną średnicę kołnierzy, geometrycznie związaną z minimalną średnicą odkuwki, nie ma możliwości całkowitego wyeliminowania osiowego płynięcia materiału. Efektem tego jest powstanie dodatkowych czopów

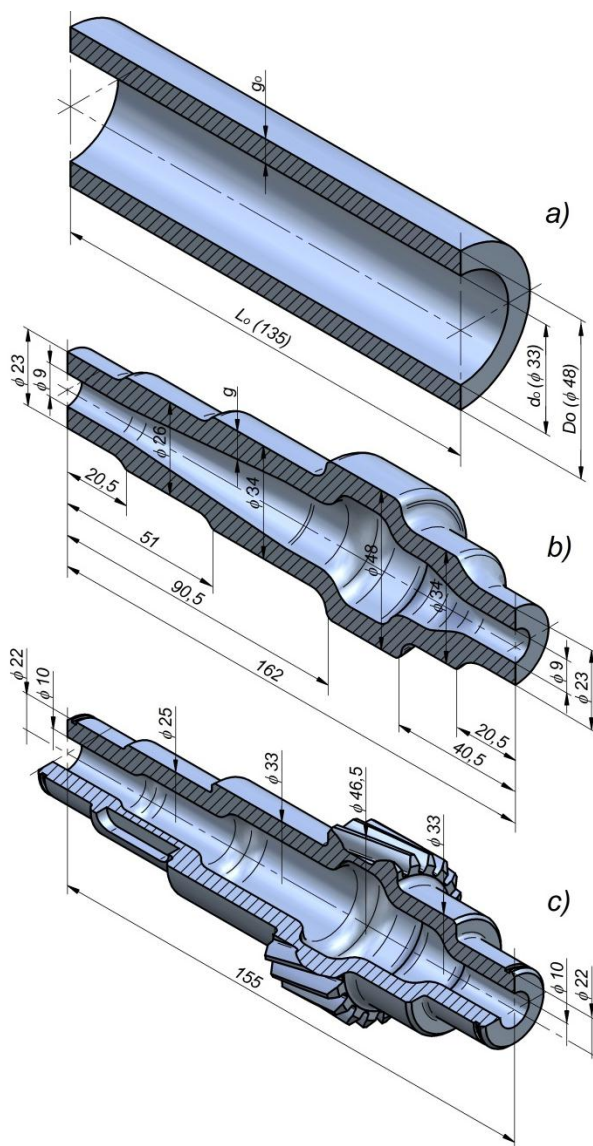
na powierzchniach czołowych odkuwki, które należy usunąć podczas dalszej obróbki. Ograniczenie osiowego płynięcia materiału znacząco wpływa również na wartości parametrów siłowych. Powoduje dość duży wzrost oporów płynięcia materiału, co przekłada się na gwałtowny wzrost sił i momentów (rys. 4.30). Zaobserwowany wzrost parametrów siłowych (w zależności od grubości ścianki oraz przyjętej redukcji średnicy zewnętrznej) może wynieść nawet kilka razy.



Rys. 4.30. Wyznaczone MES rozkłady parametrów siłowych podczas obciskania środkowego przewężenia ze swobodnym i ograniczonym płynięciem materiału ($v/n = 4 \text{ mm/obr}$, $\delta = 1,5$, $g_o = 7 \text{ mm}$): a) siły nacisku narzędzi, b) momenty obrotowe

4.3. Modelowanie numeryczne procesu obciskania obrotowego odkuwki drążonego wałka wielostopniowego

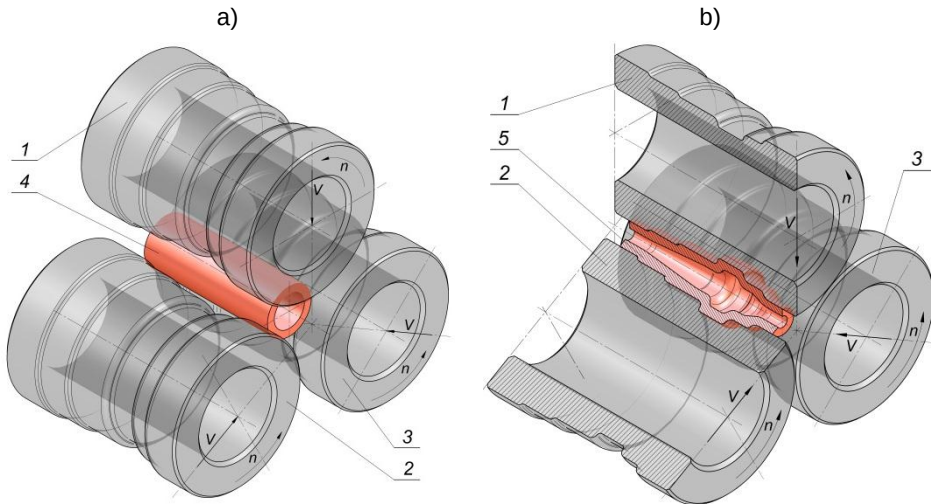
Przedstawione w poprzednich podrozdziałach wyniki dotyczyły analizy numerycznej kształtowania prostych elementów (drążonych wałków elementarnych ze skrajnym i centralnym przewężeniem). Tego typu wyroby są sporadycznie spotykane w budowie maszyn, niemniej jednak w oparciu o uzyskane wyniki określono związki pomiędzy poszczególnymi parametrami procesu. Wykorzystując uzyskane informacje opracowano bardziej złożony proces obciskania obrotowego odkuwki wielostopniowego wałka drążonego (rys. 4.31). Następnie proces zamodelowano numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Celem obliczeń było określenia możliwości kształtowania złożonych elementów proponowaną technologią, a ponadto ustalenie wpływu kinematycznych parametrów procesu (głównie prędkości narzędzi) na kształt i jakość obciskanych wyrobów. Kształt i wymiary wielostopniowego wałka drążonego, opracowaną na jego podstawie odkuwkę oraz zastosowany półfabrykat pokazano na rys. 4.31.



Rys. 4.31. Kolejne etapy wytwarzania drążonego wałka wielostopniowego: a) półfabrykat, b) odkuwka wałka kształtowana w procesie obciskania obrotowego, c) gotowy element po obróbce mechanicznej [141]

Schemat procesu kształtowania odkuwki wielostopniowego wałka drążonego pokazano na rys. 4.32. Kinematycznie proces jest zbliżony do kształtowania elementarnych wałków. W wyniku oddziaływania obracających się w tym samym kierunku i jednocześnie przemieszczających się koncentrycznie narzędzi wsad jest wprawiany w ruch obrotowy, podczas którego następuje redukowanie średnicy zewnętrznej kolejnych stopni odkuwki wałka. Po przebyciu przez

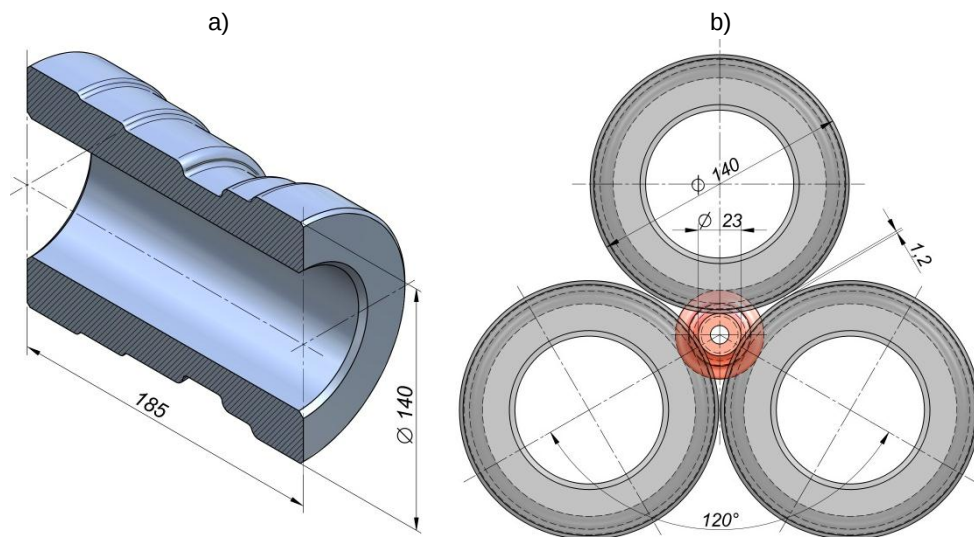
narzędzia drogi, wymaganej do uzyskania maksymalnego stopnia gniotu, ruch postępowy narzędzi jest wyłączany. W tym czasie dalszy ruch obrotowy walców powoduje usunięcie niedokładności kształtu odkuwki. Uwzględniając jednak bardziej złożony kształt elementu, wydłużono czas kalibrowania odkuwki (podczas którego walce wykonują jedynie ruch obrotowy) do około czterech obrotów obciskanego półwyrobu. Ponadto cechy konstrukcyjne odkuwki (wałek wielostopniowy) powodują, że proces obciskania realizowany jest z różnymi stopniami gniotu w kolejnych obszarach elementu.



Rys. 4.32. Schemat procesu obciskania obrotowego odkuwki wielostopniowego wałka drążonego: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1, 2, 3 – narzędzia, 4 – półfabrykat, 5 – ukształtowana odkuwka

Narzędzia do realizacji procesu mają kształt stopniowanych walców, których tworząca odpowiada zarysowi obciskanej odkuwki (rys. 4.33a). Ze względów kinematycznych maksymalna średnica walców nie może przekraczać sześciokrotnej średnicy najmniejszego stopnia odkuwki, co pozwala na zachowanie minimalnego luzu między powierzchniami roboczymi walców w końcowym etapie kształtowania (w tym przypadku około 1,2 mm), (rys. 4.33b).

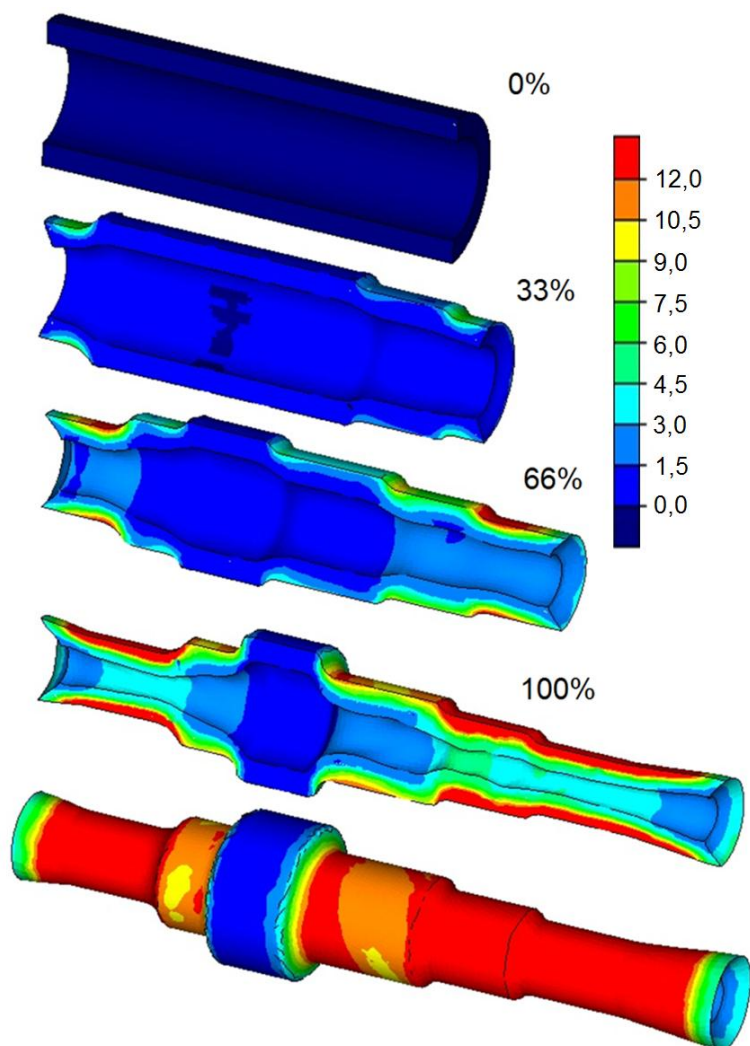
Zastosowane w obliczeniach modele geometryczne rolek wykonane były zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 4.32. Do obliczeń przyjęto, że trzy idealnie sztywne narzędzia w trakcie procesu obracają się ze stałą prędkością $n = 60$ obr/min w tym samym kierunku i jednocześnie przemieszczają się w kierunku osi wsadu ze stałymi prędkościami v , które dla poszczególnych wariantów symulacji wynosiły odpowiednio: 1 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s oraz 15 mm/s. Wsadem była rura ze stali w gatunku 40HM o średnicy zewnętrznej $\varnothing 48$ mm, grubości ścianki $g_o = 7,5$ mm oraz długości $L_o = 135$ mm.



Rys. 4.33. Kształt i wymiary gabarytowe narzędzi – a), schemat położenia narzędzi w końcowym etapie obciskania – b)

Półfabrykat modelowano za pomocą ośmiowęzłowych elementów sześciennych pierwszego rzędu. Sztywno-plastyczny model materiałowy stali 40HM zaczerpnięto z bazy danych oprogramowania Simufact Forming. Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach to: temperatura początkowa wsadu – 1150 °C, temperatura narzędzi 150 °C (stała w trakcie procesu), współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem – 25 kW/m²K oraz między materiałem a otoczeniem – 0,35 kW/m²K. Kontakt narzędzi z materiałem opisano modelem tarcia stałego o granicznej wartości czynnika tarcia $m = 1,0$.

W efekcie wykonanych obliczeń określono między innymi kinematykę płynięcia materiału w trakcie procesu obciskania wałków wielostopniowych. Progresję kształtu odkuwki w różnych stadiach zaawansowania procesu pokazano na rys. 4.34. W początkowej fazie procesu obracające się w tym samym kierunku narzędzia wprawiają wsad w ruch obrotowy. Jednocześnie przemieszczające się promieniowo walce powodują redukcję średnicy skrajnych czopów półfabrykatu. Materiał w tym etapie płynie promieniowo w kierunku osi odkuwki, w efekcie czego następuje zmniejszenie wewnętrznej średnicy rury oraz zwiększenie grubości ścianki. Obserwuje się również osiowe przemieszczanie materiału, które powoduje wydłużanie się skrajnych stopni odkuwki. W kolejnym etapie rozpoczyna się kształtowanie wewnętrznych stopni odkuwki, przy jednoczesnej dalszej redukcji średnicy skrajnych czopów. W tej fazie procesu materiał w środkowych strefach odkuwki ograniczony jest przez powierzchnie boczne narzędzi. Utrudnia to osiowe przemieszczanie materiału, dzięki czemu płynie on głównie promieniowo w kierunku osi wyrobu zwiększając grubość ścianki.

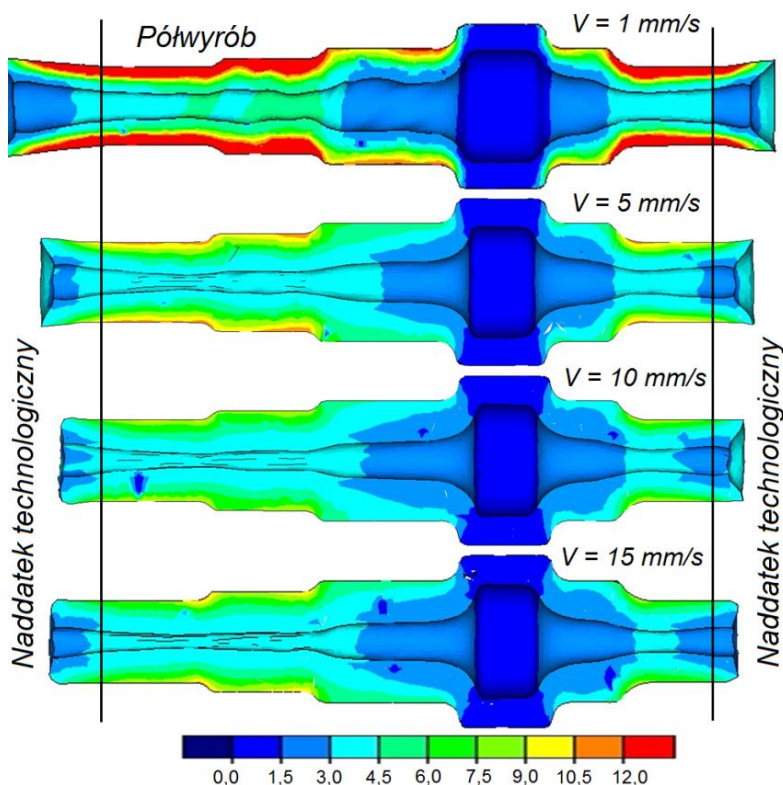


Rys. 4.34. Wyznaczona MES progresja kształtu odkuwki stopniowanego wałka drążonego wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia ($v = 1 \text{ mm/s}$)

Ograniczenie osiowego płynięcia materiału w kierunku skrajnych czopów powoduje przemieszczanie materiału do obszaru centralnego stopnia, który nie podlega kształtowaniu. W rezultacie dochodzi do niewielkiego wzrostu grubości ścianki w tym miejscu, co jest zjawiskiem korzystnym ze względu na możliwość zastosowania wsadów o mniejszych grubościach ścianki. W obszarze skrajnych stopni obserwuje się intensywne płynięcie materiału wzdłuż osi odkuwki, które powoduje dość duży przyrost długości czopów skrajnych. Ostatni etap obciskania rozpoczyna się z chwilą osiągnięcia przez narzędzia końcowego położenia, które określone jest przez maksymalną wartość gniołu bezwzględnego

($\Delta h/2 = (D-d_{min})/2 = 12,5$ mm). Wyłączony jest wtedy ruch postępowy walców i następuje kalibrowanie kształtu odkuwki. Cechą charakterystyczną obciskania odkuwek o różnych średnicach jest zmienna wartość stopnia gniołu δ , która wpływa między innymi na kinematykę płynięcia materiału, a także powoduje wzajemne skrócenie stopni odkuwki o różnych średnicach, wywołane różnymi prędkościami obwodowymi.

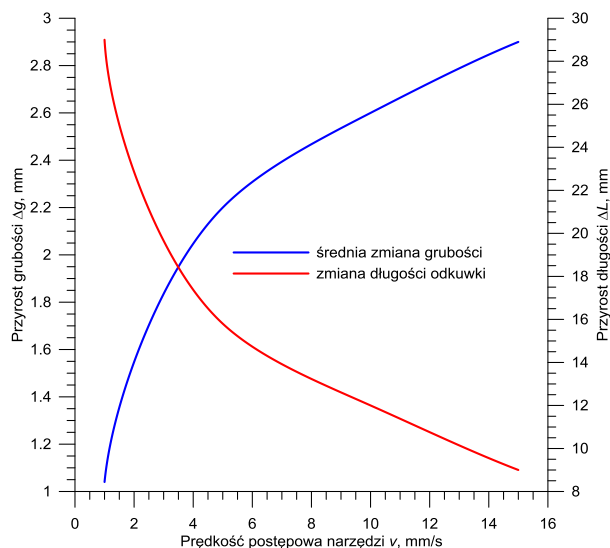
Na rys. 4.35 przedstawiono kształt odkuwek wielostopniowych wałków drążonych, ukształtowanych przy różnych prędkościach postępowych walców (1 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s, oraz 15 mm/s) z zaznaczonymi rozkładami intensywności odkształcenia.



Rys. 4.35. Wyznaczone numerycznie kształty odkuwek wielostopniowego wałka drążonego, obciskanych z różnymi prędkościami postępowymi narzędzi: ($v/n = 1$ mm/obr, $v/n = 5$ mm/obr, $v/n = 10$ mm/obr, $v/n = 15$ mm/obr)

We wszystkich analizowanych przypadkach redukcja średnicy zewnętrznej wsadu powoduje przemieszczanie materiału głównie w kierunku osi odkuwki i wzrost grubości jej ścianek. Dodatkowo w obszarze skrajnych czopów obserwuje się również osiowe przemieszczanie materiału, które powoduje wzrost długości odkuwki. Zjawisko to jest szczególnie intensywne w obszarach

przypowierzchniowych dla mniejszych prędkości postępowych narzędzi i przyczynia się do tworzenia wklęsłych powierzchni czołowych (tzw. lei czołowych). Dla wszystkich wariantów obliczeń otrzymane rozkłady intensywności odkształcenia nie są jednorodne w przekroju obciskanych stopni. W obszarach przypowierzchniowych materiał podlega większym odkształceniom w stosunku do stref centralnych (zlokalizowanych w pobliżu ścianki wewnętrznej). Jest to charakterystyczne dla tego typu procesów i wiąże się z kinematyką ruchu narzędzi oraz kształtowanej odkuwki. Występują duże różnice prędkości obwodowych obciskanych stopni (ze względu na zmieniający się promień narzędzi). W efekcie dochodzi do poślizgów pomiędzy kształtowanym materiałem, a narzędziami i generowania znacznych odkształceń w kierunku obwodowym (przez siły tarcia). Zaobserwowana niejednorodność odkształceń jest tym większa, im mniejszy jest stosunek prędkości postępowej do obrotowej narzędzi (v/n). Można to tłumaczyć większą liczbą cykli kontaktu narzędzi z półfabrykatem, która jest niezbędna do całkowitego ukształtowania wyrobu (dla $v = 1$ mm/s odkuwka musi obrócić się aż 80 razy, zaś dla $v = 15$ mm/s wystarczy zaledwie 9 obrotów). Wraz ze wzrostem prędkości postępowej v narzędzi w stosunku do ich prędkości obrotowej n , zwiększa się grubość ścianek g odkuwki oraz maleje wydłużenie (rys. 4.35 oraz rys. 4.36).

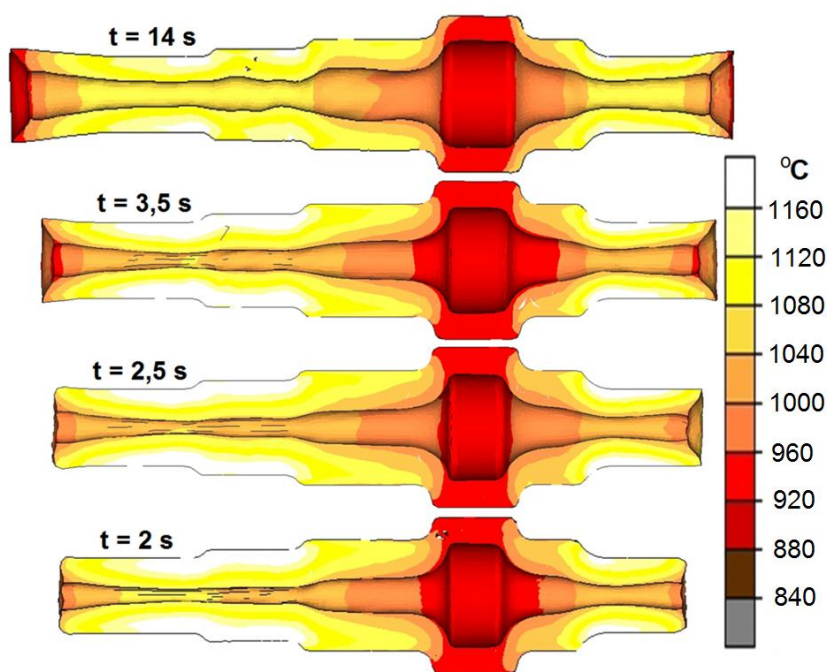


Rys. 4.36. Wyznaczony numerycznie wpływ prędkości postępowej narzędzi v na zmianę grubości ścianek oraz długości obciskanych odkuwek

Wzrost grubości ścianek stopni wewnętrznych (pomimo mniejszej redukcji średnicy) jest znacznie większy niż stopni skrajnych. Jest to efektem zamknięcia materiału między kołnierzami narzędzi, co utrudnia jego osiowe przemieszczanie, dzięki czemu materiał płynie głównie promieniowo w kierunku osi wyrobu,

zwiększając grubość ścianek odkuwki. Przedstawione na rys. 4.36 zmiany grubości ścianki odkuwki odnoszą się do wartości średnich wyznaczonych dla wszystkich stopni półfabrykatu.

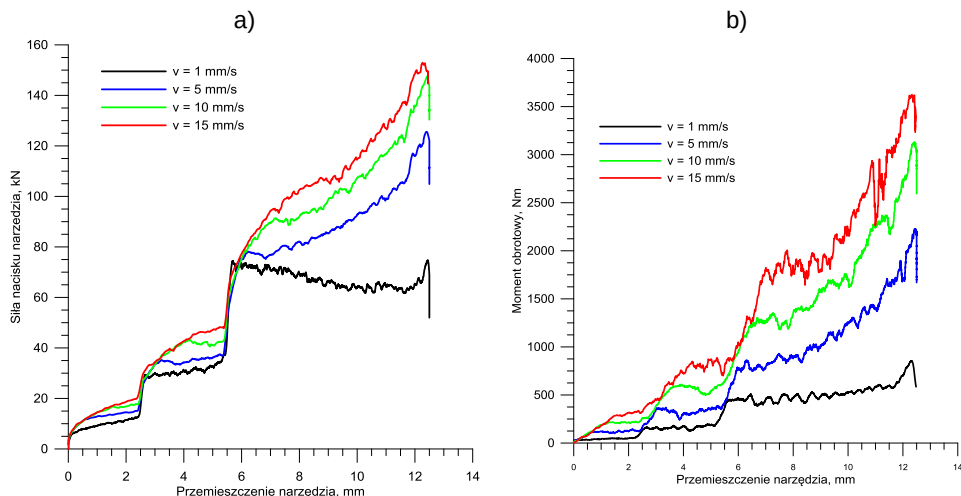
Interesujących informacji dostarczają rozkłady temperatury wyznaczone w końcowych etapach obciskania (rys. 4.37). Dla wszystkich analizowanych wariantów temperatura w obszarze redukowanych stopni utrzymuje się na wysokim poziomie, nawet dla małych prędkości narzędzi, dla których czas realizacji procesu wynosił około 14 s. Spadki temperatury są niewielkie, a nawet można zauważyć obszary, w których temperatura wzrasta. Jest to efektem generowaniem znacznych ilości ciepła podczas odkształcania plastycznego materiału.



Rys. 4.37. Wyznaczone numerycznie rozkłady temperatury w odkuwkach obciskanych z różnymi prędkościami narzędzi

W trakcie symulacji numerycznych analizowano również parametry siłowe procesu, których przebiegi (sił i momentów obrotowych) przedstawiono na rys. 4.38. Widoczne jest, że zwiększenie prędkości postępowej narzędzi v w stosunku do prędkości obrotowej n , powoduje wzrost wartości zarówno siły promieniowej jak i momentu obrotowego. Cechą charakterystyczną wyznaczonych rozkładów jest ich zbliżony przebieg, który dla wszystkich analizowanych wariantów można podzielić na cztery etapy. Poszczególne etapy procesu związane są obciskaniem kolejnych stopni odkuwki. Początkowe fazy każdego etapu obciskania przebiegają przy gwałtownym wzroście sił

promieniowych (rys. 4.38a) oraz momentów obrotowych (rys. 4.38b), spowodowanym rozpoczęciem redukcji przekroju kolejnych stopni półfabrykatu. Następnie obserwuje się stabilizację parametrów siłowych, które utrzymują się na stałym poziomie do chwili rozpoczęcia kolejnego etapu procesu (dla dwóch pierwszych etapów procesu).



Rys. 4.38. Wyznaczone numerycznie przebiegi parametrów siłowych podczas obciskania wielostopniowego wałka drążonego: a) siły nacisku narzędzi, b) momenty obrotowe

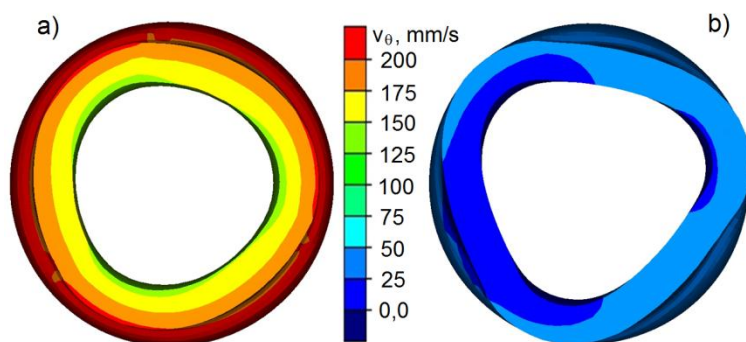
Przy większych prędkościach obciskania ($v = 5$ mm/s, $v = 10$ mm/s oraz $v = 15$ mm/s) w trzecim etapie procesu (podczas jednoczesnego obciskania wszystkich stopni odkuwki) dochodzi do silnej deformacji przekroju (owalizacja i trójkątowanie), co powoduje ciągły i dość szybki wzrost sił i momentów. Przy mniejszych prędkościach obciskania ($v = 1$ mm/s) trzeci etap procesu przebiega przy malejących parametrach siłowych. Ostatni etap obciskania, w którym obserwuje się spadek wartości sił i momentów związany jest z kalibrowaniem odkuwki, podczas którego nie zwiększa się już redukcja kolejnych stopni, a jedynie usuwane są nierówności powstałe w poprzednich etapach obciskania.

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość kształtowania złożonych geometrycznie odkuwek drążonych wałków wielostopniowych. Cechą charakterystyczną tak kształtowanych elementów jest wzrost grubości ścianki w stosunku do początkowej wartości, co umożliwia zastosowanie jako wsadów półfabrykatów cienkościennych.

4.4. Zjawiska ograniczające realizację procesu obciskania obrotowego

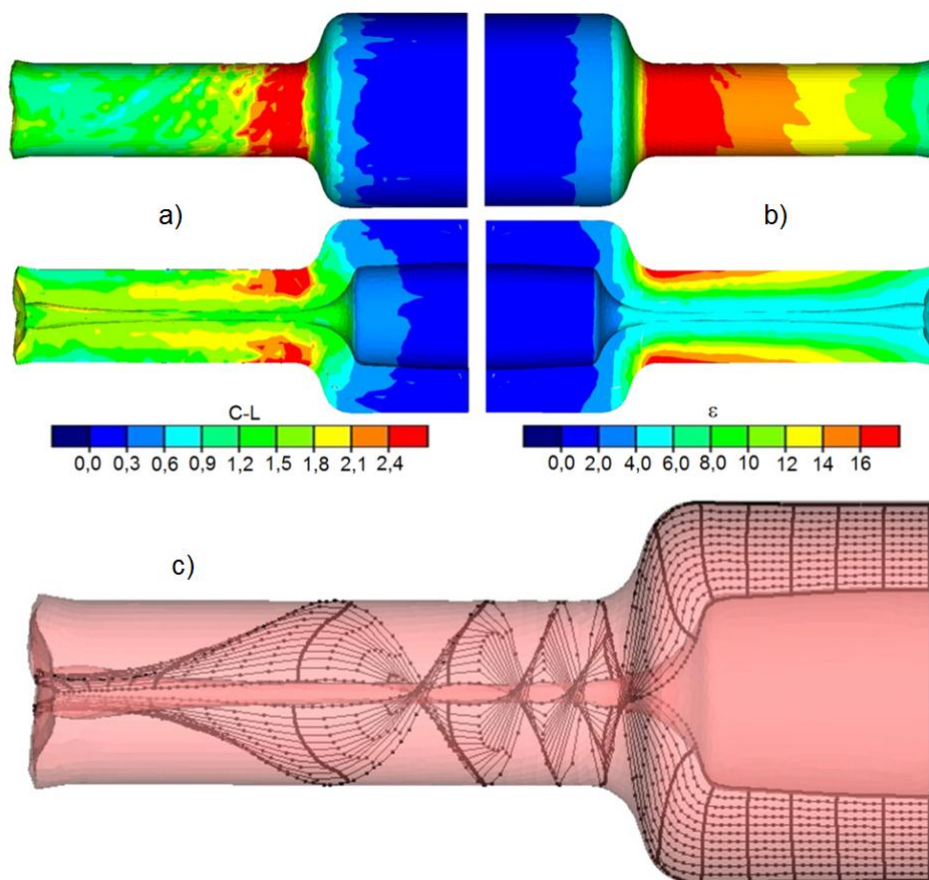
Jednym z celów prowadzonych obliczeń było określenie zjawisk zakłócających proces obciskania obrotowego. W większości przypadków zaobserwowane ograniczenia związane są bezpośrednio z przyjętymi parametrami procesu. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- **Wystąpienie niekontrolowanego poślizgu**, konsekwencją którego jest deformacja i zgniecenie kształtowanego stopnia odkuwki (rys. 4.39). Do niekontrolowanego poślizgu dochodzi w chwili gdy opory toczenia zaczynają przewyższać styczne siły tarcia na powierzchni kontaktu metal – narzędzia (powodujące obrót odkuwki). W rezultacie, narzędzia przestają obracać kształtowaną odkuwkę (rys. 4.39b), zdzierając jedynie wierzchnie warstwy materiału. Zjawisko niekontrolowanego poślizgu jest uzależnione od wielu czynników. Do najważniejszych należy zaliczyć względną grubość ścianki (g_0/D). Niekontrolowane poślizgi najczęściej występują przy niewielkich grubościach ścianek, gdzie sztywność ścianki na kształtowanym stopniu jest niewielka. Kolejnym czynnikiem jest wartość względnej prędkości ruchu postępowego do ruchu obrotowego narzędzi (v/n). Niebezpieczeństwo powstania niekontrolowanych poślizgów jest znacznie większe dla dużych prędkości postępowych narzędzi z uwagi na dużą wartość gniotu, przypadającą na jeden obrót. Powoduje to wzrost oporów toczenia i utrudnia obrót odkuwki. Również przyjęta wartość czynnika tarcia (związana ze stanem powierzchni narzędzi) ma duże znaczenie na przebiegu procesu obciskania. Zastosowanie dodatkowego smarowania również sprzyja powstawaniu poślizgów w wyniku obniżenia sił tarcia. Podobna sytuacja występuje podczas kształtowania odkuwek na zimno, gdzie wartości czynnika tarcia są znacznie mniejsze w stosunku do procesu realizowanego na gorąco.



Rys. 4.39. Rozkład prędkości obwodowej kształtowanej odkuwki: a) w stabilnej fazie procesu, b) podczas wystąpienia niekontrolowanego poślizgu

- **Ukręcenie kształtowanego stopnia**, które jest konsekwencją skręcania odkuwki, wywołanego różnicą prędkości obwodowych między kolejnymi stopniami odkuwki. Skręcanie kształtowanego stopnia prowadzi do koncentracji odkształceń w obszarze przejściowym między kolejnymi stopniami odkuwki (rys. 4.40), co może być przyczyną utraty spójności materiału w tym miejscu.

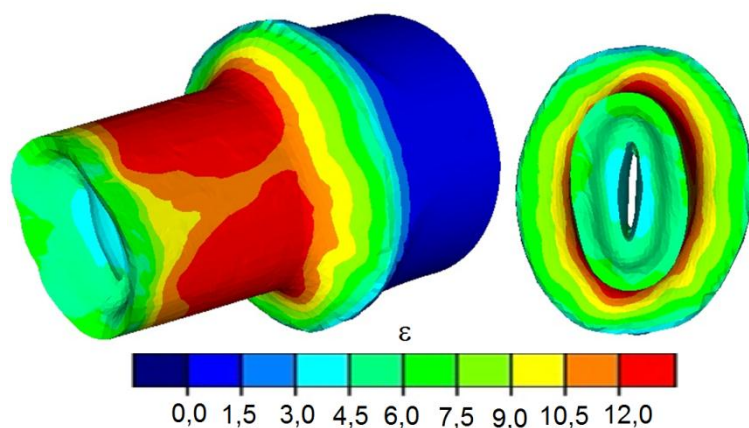


Rys. 4.40. Wyznaczony MES kształt skrajnego stopnia odkuwki, obciskanego z parametrami: $g_o = 9$ mm, $\delta = 2,1$, $v/n = 4$ mm/obr: a) rozkład kryterium zniszczenia według Cockrofta-Lathama, b) rozkład intensywności odkształcenia, c) skręcenie przekroju poprzecznego odkuwki

Ograniczenie tego typu pojawia się najczęściej podczas kształtowania kolejnych stopni odkuwki z dużymi różnicami gniotu (duża różnica średnic między obciskаныmi stopniami). Należy jednak zaznaczyć, że w większości przypadków proces kształtowania odbywa się ze stosunkowo niewielkimi wartościami gniotów, które nie zagrażają utracie spójności materiału.

Przyczyną ukręcenia kształtowanych stopni odkuwki może być również nadmierne wychłodzenie materiału kształtowanej odkuwki, co powoduje spadek plastyczności materiału.

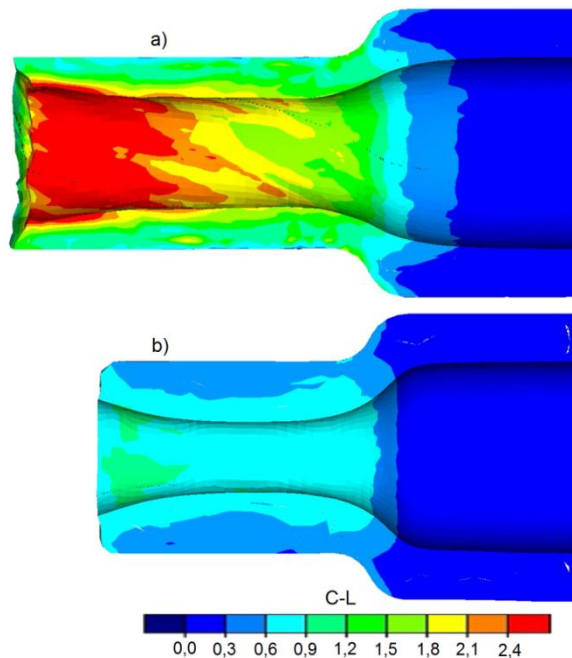
- **Rozwalcowanie ścianki półfabrykatu w obszarze kształtowanych stopni**, które prowadzi w pierwszej fazie procesu do owalizacji przekroju poprzecznego obciskanych czopów, a następnie zgniecenia kształtowanych stopni odkuwki (rys. 4.41). Przyczyną występowania tego zjawiska jest zbyt mała względna prędkość przemieszczania się promieniowego narzędzi w stosunku do prędkości obrotowej walców. W rezultacie materiał nie płynie promieniowo w kierunku osi odkuwki, a jest rozwalcowywany i płynie w kierunku obwodowym, czemu towarzyszy zwiększanie się długości obwodu ścianki. Taki proces jest zbliżony do rozwalcowywania poprzecznego tulei. W celu wyeliminowania niebezpieczeństwa owalizacji przekroju poprzecznego w wyniku rozwalcowania ścianki (zwłaszcza dla procesu realizowanego na gorąco) należy przyjmować większe prędkości względne narzędzi ($v/n > 1 \text{ mm/obr}$).



Rys. 4.41. Zniekształcenie obciskanego stopnia odkuwki w wyniku rozwalcowania i zgniecenia ścianki (parametry procesu $v/n = 0,5 \text{ mm/obr}$, $g_o = 7 \text{ mm}$, $\delta = 1,5$)

- **Wzdłużne pękanie ścianki wewnętrznej kształtowanego stopnia.** Często w rotacyjnych procesach kształtowania plastycznego osiowosymetrycznych elementów pełnych dochodzi do powstawania pęknięć wewnętrznych, których przyczyną jest najczęściej niskocyklowe zmęczenie materiału. W przypadku rotacyjnego kształtowania wyrobów drążonych również mogą pojawić się pęknięcia związane z cyklicznym charakterem naprężeń. Jednak w tym przypadku lokalizują się one najczęściej w warstwach powierzchniowych wewnętrznej ścianki kształtowanych stopni. Okazuje się, że niebezpieczeństwo tworzenia się pęknięć uzależnione jest od wielkości gniotu, grubości początkowej ścianki oraz względnej prędkości przemieszczania się narzędzi.

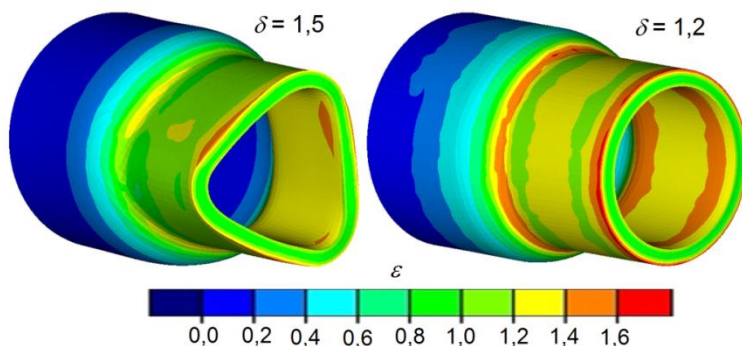
Stwierdzono, że w miarę zwiększania redukcji średnicy wzrasta niebezpieczeństwo powstawania pęknięć. Podobna sytuacja dotyczy grubości ścianki, gdzie wraz ze wzrostem grubości początkowej ścianki rurowego półfabrykatu zwiększa się prawdopodobieństwo pęknięcia wewnętrznej ścianki kształtowanej odkuwki. Odmienny wpływ ma względna prędkość przemieszczania się narzędzi. Wraz ze wzrostem prędkości przemieszczania się narzędzi w stosunku do prędkości obrotowej zmniejsza się niebezpieczeństwo pęknięcia materiału, co można tłumaczyć zmniejszeniem liczby obrotów, wykonywanych przez odkuwkę podczas jej kształtowania. Wyznaczone w trakcie obliczeń rozkłady kryterium zniszczenia według Cockrofta-Lathama dla różnych prędkości narzędzi (przy stałych innych parametrach) pokazano na rys. 4.42.



Rys. 4.42. Wyznaczone MES rozkłady kryterium zniszczenia według Cockrofta-Lathama:

a) dla $\delta = 1,5$, $g_o = 7$ mm, $v/n = 1$ mm/obr; b) $\delta = 1,5$, $g_o = 7$ mm, $v/n = 8$ mm/obr

- **Deformacja i zgniecenie kształtowanego stopnia.** W przypadku obciskania stopnia na półfabrykatkach o mniejszych grubościach względnych ścianek ($g_o/D < 0,1$) może dochodzić do zniekształcenia przekroju poprzecznego kształtowanego stopnia, a następnie jego zgniecenia (rys. 4.43). Dlatego też odkuwki z takich półfabrykatów mogą być kształtowane jedynie z niewielkimi stopniami gniotu ($\delta < 1,2$) i stosunkowo małymi prędkościami, nieprzekraczającymi $v/n < 2$ mm/obr.



Rys. 4.43. Kształt odkuwek obciskanych z półfabrykatów cienkościennych o względnej grubości ścianki $g_o/D = 0,095$ z prędkością względną $v/n = 2 \text{ mm/obr}$

Główną przyczyną deformacji przekroju jest mała sztywność ścianki półfabrykatu, która pod wpływem nacisku narzędzi traci stateczność, czego efektem w pierwszej fazie jest zniekształcenie przekroju poprzecznego (trójkątowanie), a następnie całkowite zgniecenie ścianki. W stosunku do poślizgu, materiał przy utracie stateczności jest cały czas obracany przez walce.

5. Próby doświadczalne procesu obciskania obrotowego drążonych wałków stopniowanych

Zadowalające wyniki symulacji numerycznych spowodowały, że podjęto prace zmierzające do realizacji procesu obciskania obrotowego odkuwek drążonych w warunkach laboratoryjnych, z zastosowaniem materiałów rzeczywistych. Próby takie są dopełnieniem badań teoretycznych, opartych o metody numeryczne (MES) i pozwalają na szczegółową weryfikację doświadczalną rozwiązań, otrzymanych w przeprowadzonych uprzednio rozważaniach teoretycznych.

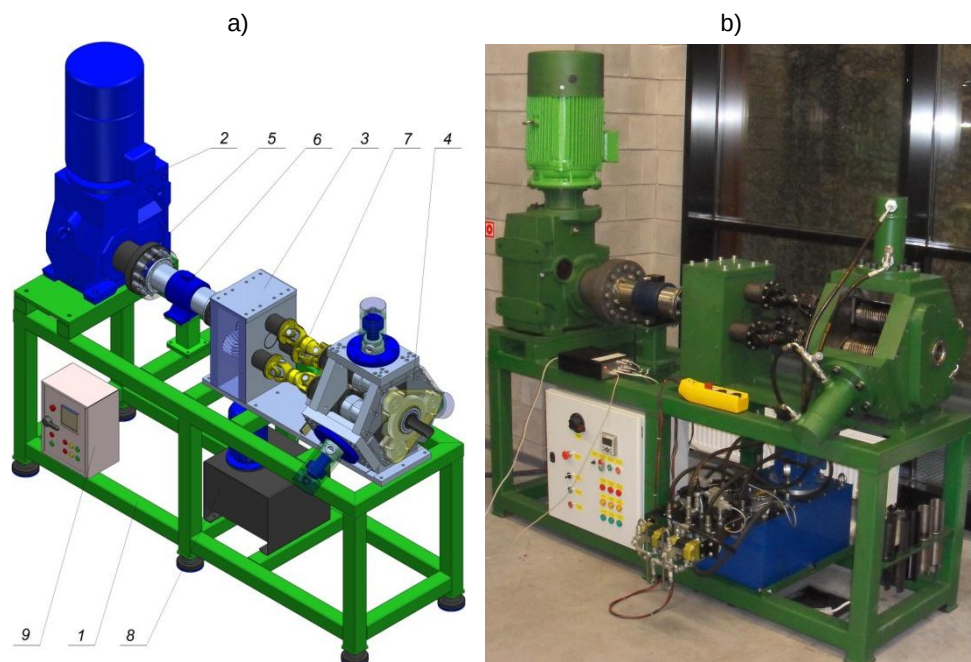
Badania doświadczalne zrealizowano w specjalnym agregacie kuźniczym i obejmowały one kształtowanie odkuwek drążonych z półfabrykatów rurowych, a w szczególności:

- próby obciskania obrotowego na gorąco stalowych odkuwek drążonych ze skrajnymi stopniami przy różnych parametrach technologicznych z rejestracją podstawowych parametrów siłowych procesu;
- próby obciskania obrotowego na gorąco stalowych odkuwek drążonych z centralnym przewężeniem przy różnych parametrach technologicznych z rejestracją podstawowych parametrów siłowych procesu;
- próby obciskania obrotowego na zimno odkuwek drążonych stalowych i ze stopów metali nieżelaznych ze skrajnymi stopniami przy różnych parametrach technologicznych z rejestracją podstawowych parametrów siłowych procesu;
- próby obciskania obrotowego na gorąco odkuwek drążonych wałków stopniowanych ze stali i stopów metali nieżelaznych przy różnych parametrach technologicznych z rejestracją podstawowych parametrów siłowych procesu.

5.1. Stanowisko badawcze

Na potrzeby badań opracowano konstrukcję kuźniczego agregatu do obciskania obrotowego [89]. Zaprojektowana, a następnie wykonana maszyna ma strukturę segmentową i składa się z dziesięciu podstawowych zespołów (rys. 5.1): ramy nośnej – 1, układu napędowego – 2, klatki walców zębatych – 3, klatki walców kształtujących – 4, zespołu przeniesienia napędu – 5, zespołu pomiaru momentu – 6, układu przeniesienia napędu na walce kształtujące – 7, hydraulicznego układu napędowego walców kształtujących – 8, układu zasilania

elektrycznego i sterowania – 9 oraz układu pomiarowego (niezaznaczonego na rysunku).

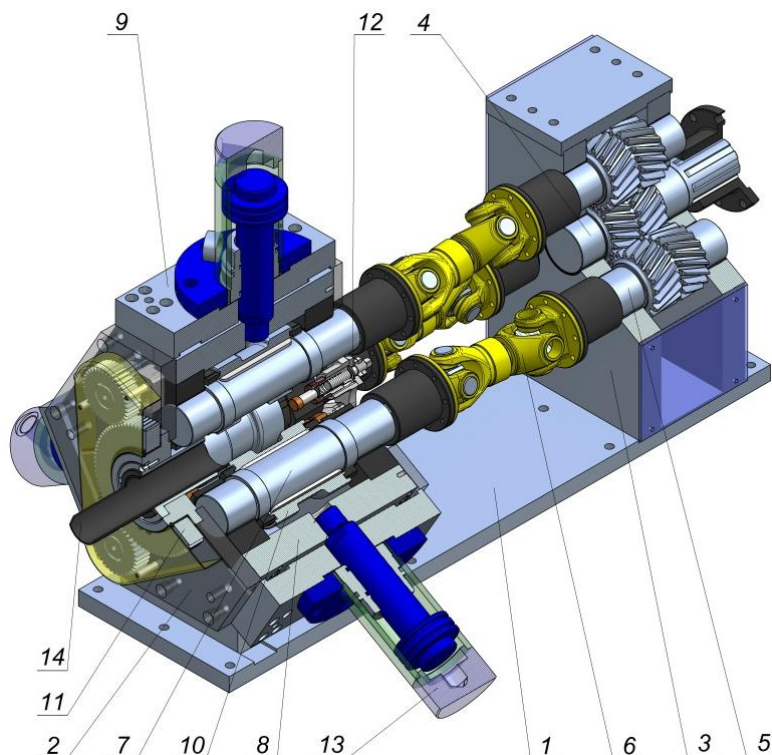


Rys. 5.1. Agregat do obciskania obrotowego: model 3D, b) fotografia wykonanej maszyny; 1 – rama nośna, 2 – zespół napędowy, 3 – klatka walców zębatych, 4 – klatka walców kształtujących, 5 – sprzęgło podatne, 6 – zespół pomiaru momentu obrotowego, 7 – wały przegubowe, 8 – zasilacz hydrauliczny, 9 – skrzynka elektryczna [127]

Rama nośna wykonana jest jako ażurowa konstrukcja spawana z cienkościennych kształtowników hutniczych o przekroju kwadratowym. Do ramy przymocowany jest zespół napędowy, który składa się z motoreduktora, zbudowanego z trójfazowego silnika elektrycznego i dwustopniowej przekładni stożkowo – walcowej. Moment obrotowy przekazywany jest z motoreduktora za pośrednictwem sprzęgła podatnego palcowego i przetwornika momentu obrotowego do klatki walców zębatych, gdzie następnie rozdzielany jest na trzy wały robocze, osadzone w klatce walców kształtujących.

W celu zwiększenia sztywności układu roboczego agregatu, klatkę walców zębatych – 3 oraz klatkę walców kształtujących – 2 umieszczono na wspólnej płycie podstawowej – 1 (rys. 5.2), przymocowanej do ramy nośnej. Klatka walców zębatych pełni funkcję przekładni rozdzielającej (o przełożeniu $i = 1$) i składa się z czterech wałków uzębionych – 4 oraz 5, wzajemnie ze sobą zazębionych, które łożyskowane są w dwóch płytach pionowych, osadzonych w płycie podstawowej – 1 i dodatkowo spiętych ze sobą płytą górną. Właściwy proces obciskania obrotowego realizowany jest w klatce walców kształtujących, w której poruszają się promieniowo trzy suwaki – 8 wraz z łożyskowanymi w nich

wałami roboczymi – 7. Korpus klatki roboczej składa się z dwóch segmentowych stojaków, połączonych ze sobą trzema płytami – 9, do których przymocowane są siłowniki hydrauliczne – 13. Wały robocze z osadzonymi na nich narzędziami – wałcami kształtowymi – 10 w czasie pracy urządzenia mogą obracać się w tym samym kierunku z jednakową prędkością.

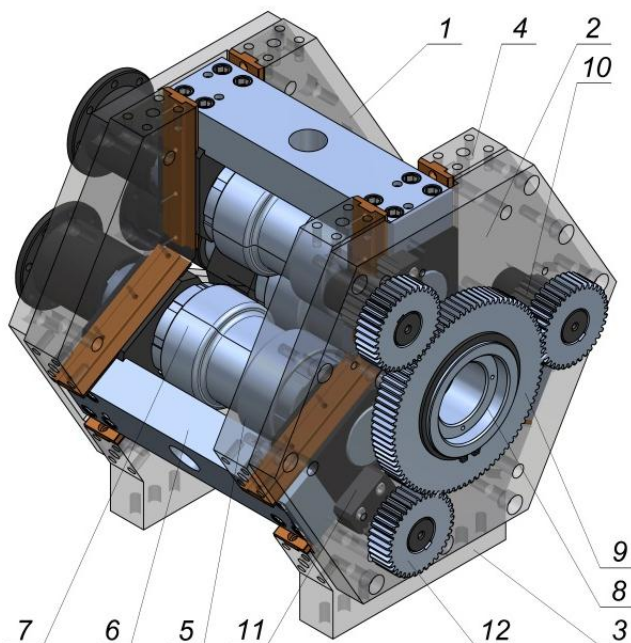


Rys. 5.2. Model 3D klatki wałców zębatach i roboczych agregatu do obciskania obrotowego: 1 – płyta podstawowa, 2 – klatka wałców kształtujących, 3 – klatka wałców zębatach, 4 – wał uzębiony czynny, 5 – wały uzębione bierne, 6 – wały przegubowe, 7 – wały główne, 8 – suwaki, 9 – płyty spinające, 10 – narzędzia, 11 – układ synchronizacji, 12 – zderzak, 13 – siłownik hydrauliczny, 14 – prowadnica wsadów

W celu łatwiejszej wymiany oprzyrządowania, narzędzia dla każdego suwaka wykonano jako dwa segmenty dzielone, które mocowane są do wałów roboczych przy pomocy nakrętek czołowych. Przemieszczenie promieniowe trzech suwaków wraz z narzędziami realizowane jest za pośrednictwem hydraulicznego układu napędowego, składającego się z trzech cylindrów hydraulicznych, zasila-cza hydraulicznego oraz zespołu zaworów i rozdzielaczy. Suwaki prowadzone są w ślizgowych prowadnicach liniowych, które osadzone są w stojakach klatki i rozmieszczone promieniowo, co 120° względem osi kształtowanego wyrobu. Przemieszczenie trzech suwaków jest wzajemnie zsynchronizowane w sposób hydrauliczny (przy pomocy trójdrożnego, zębatego podzielnika strumienia) oraz

mechaniczny (przy pomocy mechanizmu zębatego – 11). Ze względu na zmianę odległości osi między wałami roboczymi podczas procesu obtaczania, moment obrotowy przenoszony jest z klatki walców zębatych do klatki walców kształtujących przy pomocy wałów przegubowych – 6. Wsad do przestrzeni roboczej urządzenia podawany jest w specjalnej prowadnicy – 14, która dodatkowo pozycjonuje położenie półfabrykatu w początkowym etapie procesu. Natomiast osiowe położenie wsadu w przestrzeni roboczej agregatu ustalane jest za pomocą regulowanego zderzaka – 12.

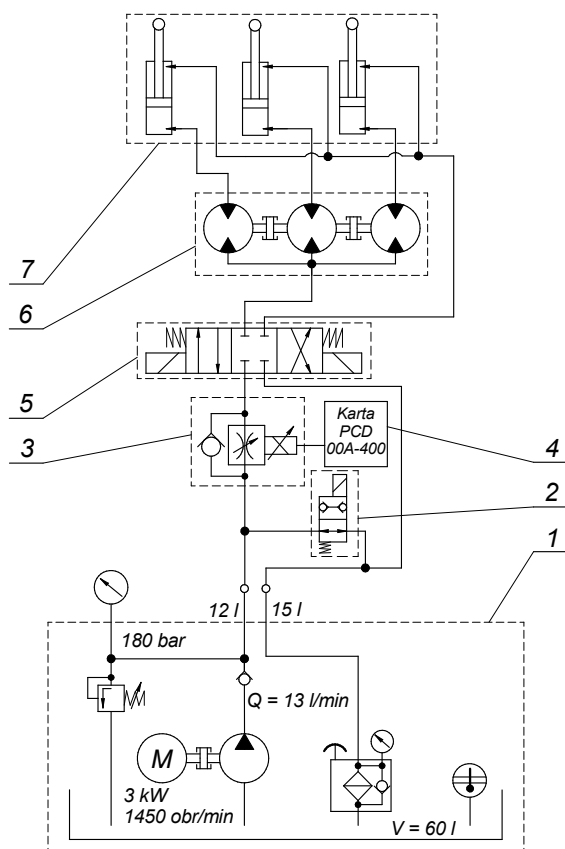
Podczas projektowania agregatu szczególną uwagę zwrócono na możliwość wzajemnego zsynchronizowania prędkości postępowych trzech suwaków, co ma istotne znaczenie na utrzymanie poprawnych parametrów kinematycznych procesu (szczególnie w przypadku kształtowania odkuwek geometrycznie złożonych, takich jak ślimaki, koła zębate). W tym celu wykorzystano podwójny układ synchronizacji, oparty o hydrauliczny podzielnik strumienia oraz mechaniczny układ zębaty, który został umieszczony w jednym ze stojaków klatki walców kształtujących (rys. 5.3). Składa się on z trzech listew zębatych – 11 przymocowanych do suwaków narzędziowych – 6, które zazębione są z wieńcami uzębionymi naciętymi na wałkach synchronizatorów – 10, umieszczonych między płytami nośnymi stojaka – 3, 4, 5, a płytą spinającą – 2.



Rys. 5.3. Układ synchronizacji przemieszczenia suwaków w klatce walców kształtujących:
 1 – stojak kompletny, 2 – płyta spinająca, 3, 4, 5 – płyty nośne, 6 – suwak, 7 – narzędzia,
 8 – tuleja, 9 – pierścień zębaty, 10 – wałek synchronizatora, 11 – listwa zębata, 12 – koło zębate

Na wysięgowych czopach trzech wałków synchronizatorów osadzono jednakowe koła zębate – 12, które współpracują z pierścieniem zębatym – 9, łożyskowanym na tulei – 6, która osadzona jest centralnie w stojaku lewym klatki. Takie rozwiązanie łączy kinematycznie wzajemne przemieszczenie trzech suwaków, utrzymując ich jednakową prędkość podczas pracy.

Zasilanie cylindrów hydraulicznych agregatu oraz sterowanie przepływem cieczy w układzie realizowane jest przy pomocy zintegrowanego z maszyną układu zasilania hydraulicznego, którego schemat pokazano na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Schemat układu zasilania cylindrów hydraulicznych agregatu do obciążania obrotowego:
 1 – zasilacz hydrauliczny ZHS3,
 2 – elektrozwór, 3 – zawór proporcjonalny, 4 – karta sterowania zaworem proporcjonalnym, 5 – rozdzielacz, 6 – trójdrożny podzielnik strumienia, 7 – cylindry hydrauliczne

Zastosowany układ składa się z handlowego zasilacza hydraulicznego ZHS3 – 1, oraz zespołu zaworów i rozdzielaczy. Głównym elementem zasilacza jest pompa zębata o wydajności $Q = 13 \text{ dcm}^3/\text{min}$ i maksymalnym ciśnieniu pracy $p = 25 \text{ MPa}$. Pompa hydrauliczna umieszczona jest w zbiorniku oleju o objętości $V = 60 \text{ dcm}^3$. Napęd pompy realizowany jest przy pomocy silnika elektrycznego o mocy $P = 3 \text{ kW}$ i prędkości obrotowej $n = 1450 \text{ obr/min}$. Dodatkowo zasilacz został wyposażony w zawór przelewowy z regulacją ciśnienia oraz filtr ssawny i filtr zalewowy. Sterowanie przepływem cieczy do wszystkich cylindrów realizowane jest przy pomocy zaworu proporcjonalnego – 3 oraz rozdzielacza

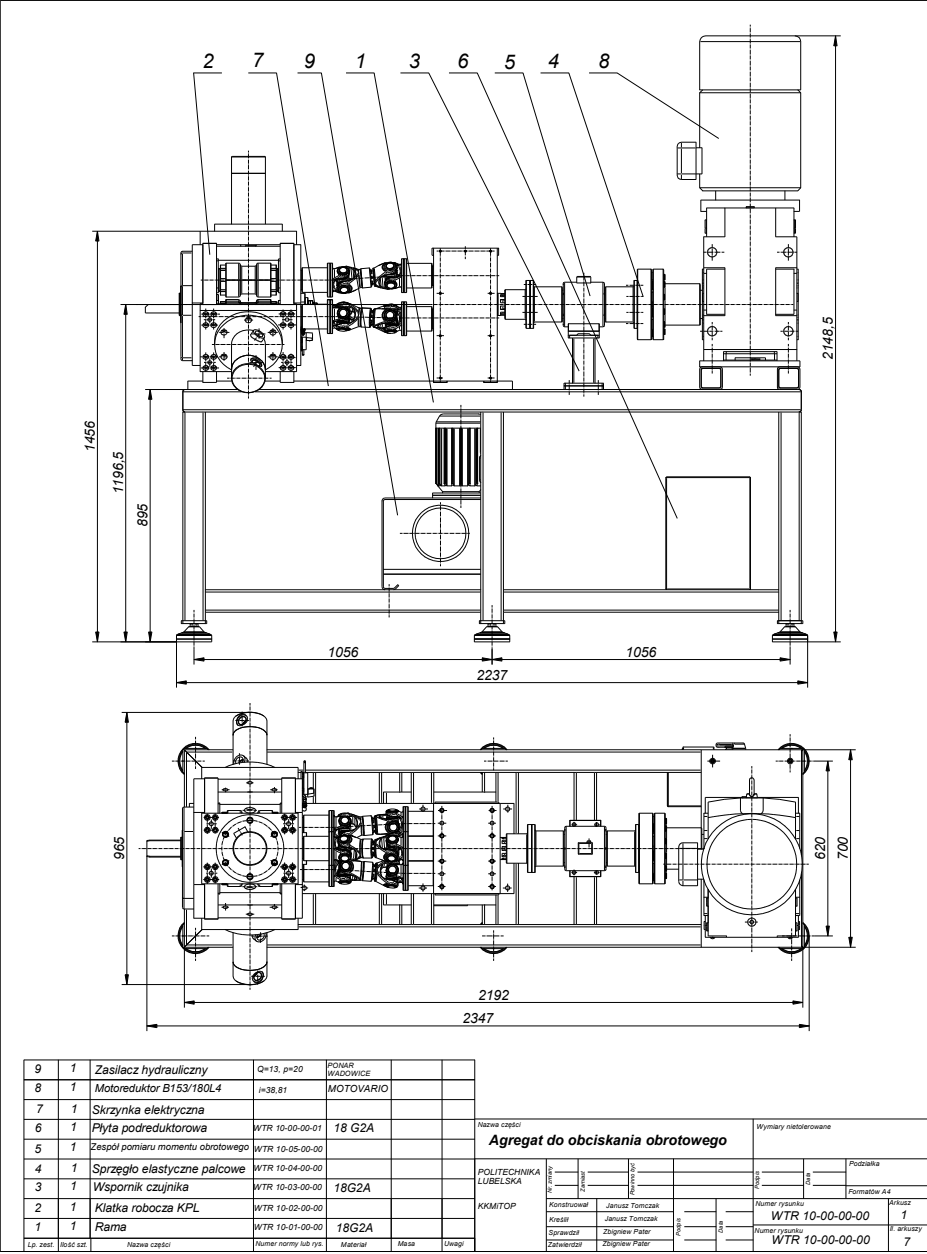
dwudrożnego – 5. Zastosowanie zaworu proporcjonalnego, który jest sterowany numerycznie za pośrednictwem sterownika przemysłowego umożliwia płynną regulację przepływem cieczy do cylindrów hydraulicznych, a tym samym możliwość zmiany prędkości suwaków w zakresie $v = 0 \div 15$ mm/s. Dodatkowo w celu wyrównania prędkości przemieszczania się tłoków w trzech cylindrach hydraulicznych (a także obciążenia mechanicznego układu synchronizacji prędkości suwaków), zastosowano na wyjściu zaworu proporcjonalnego trójdrożny, zębaty podzielnik strumienia, który kieruje do wszystkich cylindrów takie same objętości cieczy.

Do rejestracji parametrów siłowych i kinematycznych procesu obciskania obrotowego zbudowano układ pomiarowy, składający się z przetwornika przemieszczenia wraz z wyłącznikiem krańcowym, rejestrującego aktualną prędkość i położenie narzędzi, przetwornika momentu obrotowego, umożliwiającego cyfrową rejestrację momentu podczas kształtowania oraz przetworników ciśnienia, przy pomocy których dokonywany jest pomiar ciśnienia i na jego podstawie określana jest siła nacisku narzędzi na kształtowany półfabrykat. Wartości mierzone przez czujniki rejestrowane są na komputerze za pośrednictwem specjalnie zbudowanego w tym celu układu rejestrującego, którego głównym elementem jest karta pomiarowa National Instruments USB-6008. Do obsługi układu rejestrującego oraz zapisu danych opracowano specjalną aplikację w środowisku LabVIEW.

Ważniejsze dane techniczne wykonanego agregatu zestawiono w tabeli 5.1, zaś widok agregatu wraz z zaznaczonymi wymiarami gabarytowymi pokazano na rys. 5.5.

Tab. 5.1. Dane techniczne agregatu do obciskania obrotowego

Agregat do obciskania obrotowego WTR 10		
Moc silnika napędowego	kW	22
Moment obrotowy dla każdego wału roboczego	Nm	2200
Prędkość obrotowa wałów roboczych [obr/min]	obr/min	36
Minimalna prędkość ruchu postępowego narzędzi $v_{\min}$	mm/s	0,1
Maksymalna prędkość ruchu postępowego narzędzi $v_{\max}$	mm/s	15
Maksymalna siła nacisku narzędzi	kN	150
Maksymalna długość kształtowanej odkuwki	mm	160
Maksymalna średnica wsadu [mm]	mm	60
Minimalna średnica kształtowanej odkuwki	mm	19
Minimalna średnica narzędzi $d_{\min}$	mm	100
Maksymalna średnica narzędzi $d_{\max}$	mm	130
Wymiary gabarytowe L x B x H	m	2,3x1x2,15
Masa	kg	2700



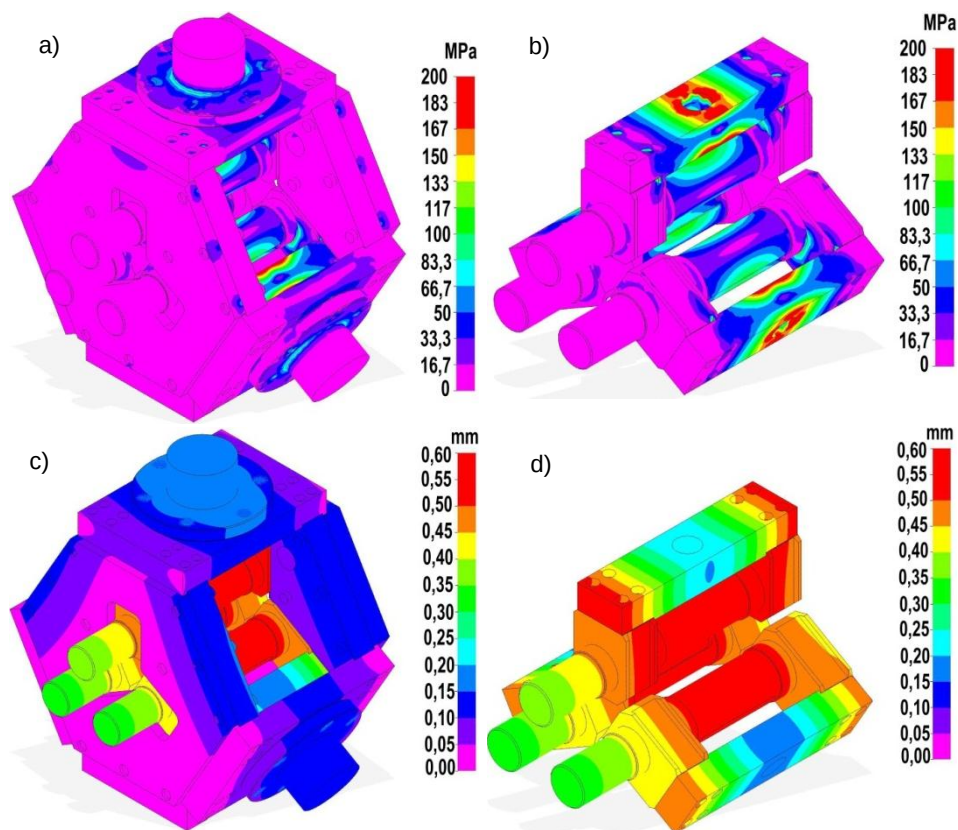
Rys. 5.5. Agregat kuźniczy do obciskania obrotowego odkuwek drążonych

5. 2. Analiza wytrzymałościowa agregatu

W trakcie projektowania agregatu przeprowadzono kompleksową analizę wytrzymałościową głównych zespołów urządzenia. W tym celu w początkowym

etapie prac konstrukcyjnych wykorzystano metody inżynierskie, oparte na podstawowych prawach wytrzymałości materiałów do określenia minimalnych przekrojów najważniejszych elementów urządzenia. Następnie w oparciu o metody numeryczne sprawdzono opracowaną konstrukcję pod względem warunków wytrzymałościowych oraz jej sztywności. Obliczenia numeryczne wykonano w środowisku NX Nastran dla zakresu liniowej charakterystyki wytrzymałości materiału, stosując w tym celu metodę elementów skończonych. Ze wstępnej analizy wynika, że najbardziej obciążonym zespołem urządzenia jest klatka walców kształtujących, której sztywność i wytrzymałość mają kluczowe znaczenie na niezawodną pracę agregatu oraz jakość kształtowanych odkuwek. Dlatego też w bieżącym opracowaniu skupiono się na przedstawieniu wyników analizy wytrzymałościowej tego właśnie zespołu. W trakcie prowadzonych obliczeń przyjęto, że wszystkie części klatki roboczej posiadają następujące parametry materiałowe: współczynnik Poisson'a $\nu = 0,3$ oraz moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa. Warunki brzegowe pomiędzy segmentami stojaków, płytami spinającymi, siłownikami hydraulicznymi i elementami składowymi suwaków opisano przy użyciu domyślnej funkcji połączeń śrubowych, co odpowiada połączeniom rzeczywistym tych elementów. Pozostałe połączenia opisano jako kontakt liniowy z zerowym przenikaniem i odstępem. Dyskretyzacja modelu klatki roboczej walcarki, którą przeprowadzono na potrzeby obliczeń MES, wykonana została przy użyciu elementów czterowęzłowych o wymiarach 8 mm. Wielkość wykorzystanych elementów, opisujących konstrukcję uzależniono gabarytami dyskretyzowanych części. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla maksymalnych wartości obciążenia, przykładając siły skupione o wartości 120 kN do trzech wałów roboczych klatki, zgodnie z kierunkiem przemieszczania się suwaków. Siły zostały przyłożone w połowie długości wałów (między łożyskami), a ich zwrot odpowiadał oporowi, który stawia metal podczas realizacji procesu. Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych MES wyznaczono rozkłady naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera - Misesa oraz rozkład przemieszczeń elementów klatki roboczej pod wpływem przyłożonego obciążenia zewnętrznego. Wyniki zestawiono w postaci map, obrazujących rozkłady naprężeń oraz przemieszczeń, które przedstawiono na rys. 5.6. Na podstawie uzyskanych rozkładów wartości naprężeń zredukowanych dokonano oceny stopnia wyężenia materiału dla kluczowych elementów konstrukcji, a przede wszystkim określono ryzyko przekroczenia granicy plastyczności najbardziej obciążonych elementów klatki roboczej. Natomiast w oparciu o uzyskane rozkłady przemieszczeń elementów klatki roboczej przeprowadzono ocenę jej sztywności, która będzie miała swoje odzwierciedlenie w dokładności kształtowanych wyrobów. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że najbardziej obciążonymi elementami konstrukcji są belki suwaków, w których w obszarze mocowania tłoczysk siłowników, naprężenia zredukowane sięgają

200 MPa. Przy czym są to wartości akceptowalne (dla materiału 42CrMo4, z którego wykonane są belki granica plastyczności wynosi około $R_e = 900$ MPa), które nie spowodują jeszcze trwałych odkształceń w tych elementach. Pozostałe elementy składowe konstrukcji, w tym wały główne obciążone są w znacznie mniejszym stopniu. Dość duże wartości odkształceń sprężystych odnotowano podczas analizy przemieszczeń. Widoczne jest, że wały główne urządzenia przemieszczają się o około 0,6 mm, przy czym są to sumaryczne wartości przemieszczeń, związane z odkształceniami sprężystymi stojaków, suwaków, płyt spinających i wałów głównych. Należy zaznaczyć, że w przypadku kształtowania odkuwek na gorąco, wyznaczona MES strzałka ugięcia mieści się w obszarze tolerancji wykonania półfabrykatów i nie będzie miała większego wpływu na dokładność uzyskanych wyrobów (mogą zwiększyć się jedynie naddatki na obróbkę wykańczającą). Wpływ odkształceń sprężystych klatki na dokładność kształtowanych odkuwek również nie będzie zbyt duży z uwagi na występowanie w procesie obciskania obrotowego fazy kalibrowania półfabrykatu.

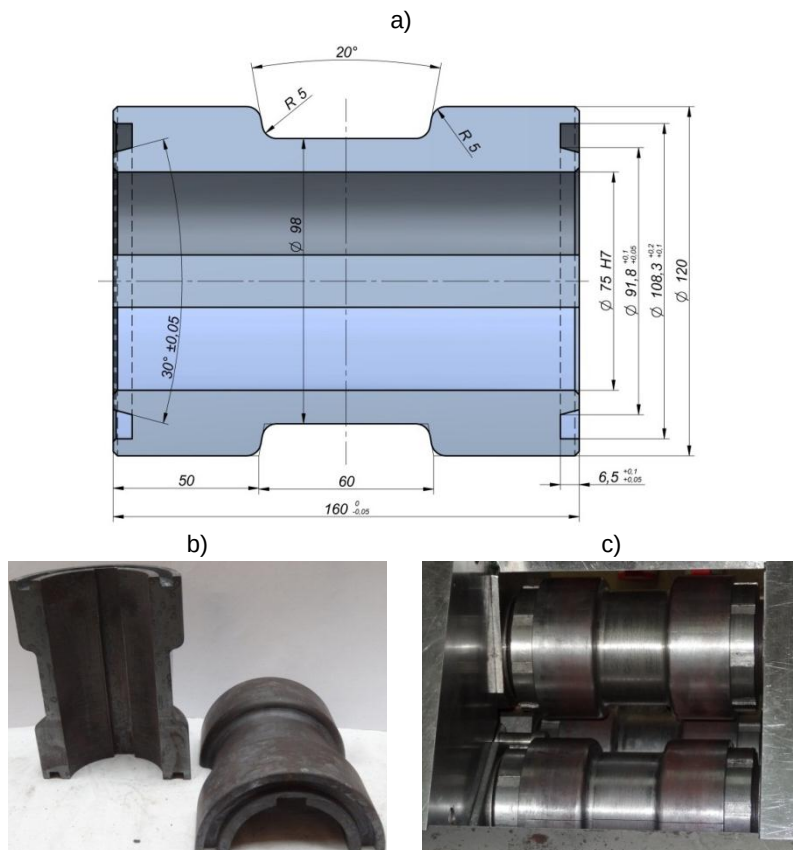


Rys. 5.6. Wyznaczone MES rozkłady: a) naprężeń zastępczych dla klatki roboczej, b) naprężeń zastępczych dla suwaków, c) przemieszczeń dla klatki roboczej, d) przemieszczeń dla suwaków [127]

W tym etapie narzędzia nie przemieszczają się w kierunku osi odkuwki, a jedynie wykonują ruch obrotowy, usuwając niedokładności kształtu spowodowane między innymi odkształceniami sprężystymi elementów urządzenia. W związku z tym kalibrowanie odkuwek przebiega przy kilkukrotnie mniejszych wartościach sił nacisku narzędzi, co znacznie obniża odkształcenia sprężyste konstrukcji w ostatnim etapie obciskania.

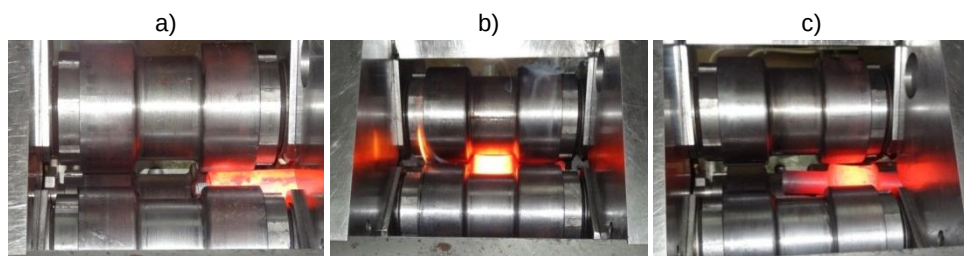
5.3. Próby obciskania obrotowego na gorąco stopni skrajnych stalowych odkuwek drążonych

Do realizacji procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek elementarnych wałków z dwoma skrajnymi przewężeniami (zgodnie ze schematem przyjętym w obliczeniach numerycznych) opracowano i wykonano zestaw segmentów narzędziowych. Kształt i ważniejsze wymiary narzędzi pokazano na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Segmenty narzędziowe wykorzystane do obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałków elementarnych ze skrajnymi przewężeniami: a) konstrukcja narzędzi, b) zestaw wykonanych segmentów, c) narzędzia zamontowane na wałach agregatu

Walce o dzielonej konstrukcji, która ułatwia szybkie przebrojenie maszyny, charakteryzują się możliwością obciskania odkuwek w szerokim zakresie gniotów $\delta = 1 \div 2,1$ oraz średnic zewnętrznych półfabrykatów w przedziale $D = 24 \div 60$ mm. Dzielone narzędzia zamontowano na trzech wałach roboczych urządzenia, za pomocą nakrętek czołowych (rys. 5.7c). Wsad wykorzystany w trakcie obciskania obrotowego stanowiły tuleje stalowe w gatunku C45 o średnicy zewnętrznej $\varnothing 42,4$ mm, grubościach ścianek $g_o = (3; 4; 5; 7; 9; 11)$ mm i długości $L_o = 120$ mm. Półfabrykaty nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około 1150°C , a następnie wprowadzano je za pomocą kleszczy do podajnika pozycjonującego położenie wsadu w przestrzeni roboczej agregatu (utworzonej przez trzy obracające się walce) (rys. 5.8a).



Rys. 5.8. Proces obciskania obrotowego drążonej odkuwki elementarnego wałka:

a) wprowadzenie wsadu do przestrzeni roboczej, b) kształtowanie odkuwki, c) usunięcie odkuwki z przestrzeni roboczej walców

W kolejnym etapie jednocześnie przemieszczające się promieniowo oraz obracające się narzędzia, wprawiały wsad w ruch obrotowy i redukowały średnice skrajnych czopów odkuwki (rys. 5.8b). Po przebyciu przez suwaki drogi odpowiadającej wymaganej redukcji średnicy, następowało wyłączenie ruchu postępowego i kalibrowanie kształtu odkuwki podczas dalszego obrotu walców. W ostatniej fazie narzędzia rozsuwały się promieniowo, a ukształtowana odkuwka usuwana była z przestrzeni roboczej urządzenia w podajniku, umieszczonym w stojaku klatki roboczej (rys. 5.8c).

Ukształtowane podczas prób doświadczalnych drążone odkuwki wałków ze skrajnymi czopami, (obciskane z półfabrykatów o różnych grubościach ścianek) pokazano na rys. 5.9. W trakcie kształtowania zachowano dla wszystkich grubości ścianek taką samą wartość gniotu $\delta = D/d = 1,5$ oraz identyczną prędkość ruchu postępowego narzędzi, która wynosiła $v = 3$ mm/s ($v/n = 5$ mm/obr). Widoczne jest (rys. 5.9), że w zakresie względnych grubości ścianki $g_o/D = 0,094 \div 0,26$ (g_o zmienia się od 4 mm do 11 mm) uzyskano poprawne wyroby, wolne od wad i deformacji. Kształtowanie odkuwek o najmniejszych grubościach ścianek ($g_o = 3$ mm – $g_o/D = 0,071$) było niemożliwe do zrealizowania, gdyż proces obciskania prowadził do utraty stateczności ścianki, czego efektem jest jej zgniecenie (rys. 5.10).



Rys. 5.9. Odkuwki elementarnych wałków ukształtowane z półfabrykatów o różnych grubościach w agregacie do obciskania obrotowego ($v = 3 \text{ mm/s}$, $\delta = 1,5$)

W pierwszym etapie obciskania cienkościennych półfabrykatów dochodzi do silnej owalizacji przekroju poprzecznego, a następnie do zgniecenia ścianki półfabrykatu (rys. 5.10). Na tej podstawie stwierdzono, że minimalna grubość ścianki wsadu, przy której możliwe jest uzyskanie odkuwek wolnych od wad wynosi $g_o = 4 \text{ mm}$ ($g_o/D = 0,094$). Owalizacja i następnie zgniecenie obciskanych stopni niewątpliwie związane są z prędkością względną narzędzi (v/n) odniesioną do sztywności ścianki zredukowanego półfabrykatu. W związku z tym przeprowadzono próby obciskania na gorąco odkuwek z półfabrykatów cienkościennych z mniejszymi prędkościami $v/n = 1,6 \text{ mm/obr}$ ($g_o = 3 \text{ mm}$ oraz $v = 1 \text{ mm/s}$). Zmniejszenie prędkości kształtowania pozwoliło na wyeliminowanie całkowitego zgniecenia obciskanych stopni (brak poślizgu), jednak zaobserwowano przy tych parametrach technologicznych deformację przekroju poprzecznego, która przejawiała się silną graniastością ukształtowanych stopni.



Rys. 5.10. Deformacja obciskanej odkuwki, wynikająca ze zbyt cienkiej ścianki wsadu ($v = 3 \text{ mm/s}$, $\delta = 1,5$)

W tym przypadku uzyskany zarys przekroju poprzecznego zbliżony był do pięciokąta (rys. 5.11). Przyczyną takiej deformacji było nadmierne wychłodzenie materiału, związane z długim czasem realizacji procesu. Obniżenie temperatury w obszarze kształtowanych stopni powodowało spadek plastyczności materiału. W rezultacie utrudnione było plastyczne płynięcie materiału w kierunku

promieniowym, co skutkowało rozwalcowywaniem ścianki i w rezultacie prowadziło do utraty stateczności.



Rys. 5.11. Deformacja przekroju poprzecznego obciskanych stopni odkuwki, wynikająca z nadmiernego wychłodzenia materiału ($v = 1,0 \text{ mm/s}$, $\delta = 1,5$)

Innym zaobserwowanym podczas eksperymentu ograniczeniem jest całkowite zamknięcie prześwitu otworu w kształtowanych stopniach. Zjawisko to zaobserwowano podczas obciskania półfabrykatów rurowych o większych grubościach ścianek ($g_o > 7 \text{ mm}$) z większymi gniotami ($\delta > 1,5$) oraz z większymi prędkościami względnymi ($v/n > 6 \text{ mm/obr}$). Zgodnie z wynikami analiz numerycznych, wraz ze wzrostem gniotu i prędkości postępowej narzędzi, zwiększa się ilość materiału przemieszczanego w kierunku promieniowym, przy jednoczesnym zmniejszeniu wydłużenia kształtowanych stopni. Dlatego też przy większych gniotach ($\delta \geq 1,5$) i większych prędkościach kształtowania ($v/n \geq 6 \text{ mm/obr}$) może dochodzić do całkowitego zamknięcia prześwitu otworu. Zjawisko to wiąże się z gwałtownym wzrostem oporów plastycznego płynięcia materiału, który powoduje silną owalizację przekroju i utratę zdolności odkuwki do obrotu, czego efektem jest poślizg narzędzi. Konsekwencją tego zjawiska jest deformacja i zgniecenie kształtowanych stopni odkuwki (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Deformacja obciskanych stopni odkuwki, wywołana zamknięciem otworu i poślizgiem narzędzi ($v/n = 8 \text{ mm/obr}$, $\delta = 1,8$, $g_o/D = 0,16$)

Niebezpieczeństwo poślizgu w wyniku zamknięcia otworu wewnętrznego można wyeliminować poprzez zmniejszenie prędkości kształtowania, co jednak może wiązać się z nadmiernym wychłodzeniem materiału. Dlatego też w takich przypadkach wskazane jest prowadzenie procesu obciskania dwuetapowo, gdzie w pierwszym etapie odkuwka jest obciskana ze znacznie mniejszym stopniem

gniotu od wymaganego, po czym następuje wyłączenie ruchu postępowego i skalibrowanie kształtu, podczas którego materiał jest równomiernie rozprowadzany, zarówno na obwodzie, jak i na długości kształtowanych stopni. W drugim etapie ponownie narzędzia kształtują uprzednio skalibrowany półfabrykat, aż do uzyskania wymaganego gniotu. Należy jednak zaznaczyć, że realizacja procesu według tego schematu może prowadzić również do nadmiernego wychłodzenia materiału (wydłużenie czasu kształtowania), co wymaga dodatkowego dogrzewania materiału przed drugim etapem kształtowania. Odkuwki ukształtowane dwuetapowo w procesie obciskania obrotowego z dogrzewaniem międzyoperacyjnym pokazano na rysunku 5.13. Wałki obciskano z półfabrykatów o średnicy zewnętrznej $\varnothing 42,4$ mm, grubościach początkowych ścianki g_0 wynoszących odpowiednio 7 mm i 9 mm z całkowitym stopniem gniotu $\delta = 1,9$ oraz względną prędkością kształtowania $v/n = 8$ mm/obr.



Rys. 5.13. Odkuwki obciskane dwuetapowo z międzyoperacyjnym dogrzewaniem materiału ($D = 42,4$ mm, $g_0 = 7$ mm oraz 9 mm, $\delta = 1,9$, $v = 5$ mm/s)

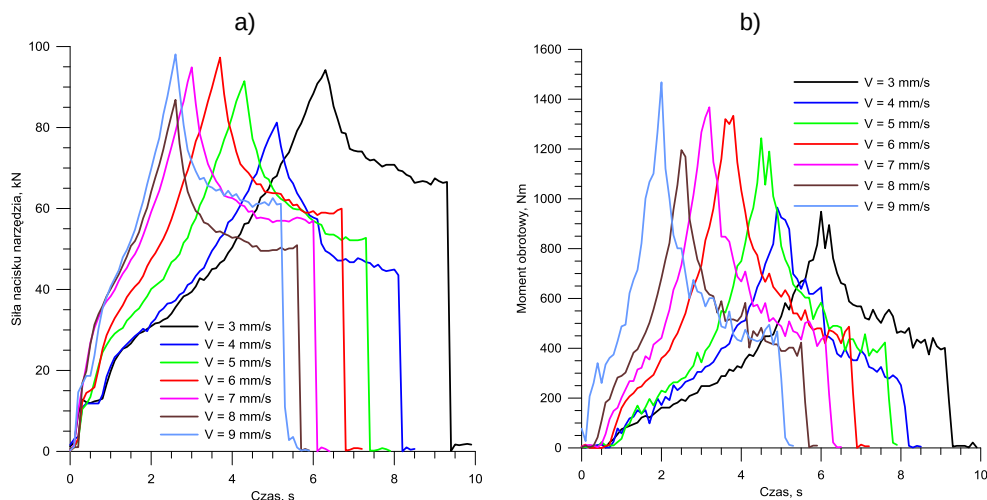
W trakcie eksperymentu przeanalizowano również wpływ prędkości ruchu postępowego narzędzi na przebieg procesu oraz geometrię kształtowanych odkuwek. Do badań wykorzystano półfabrykaty rurowe ze stali w gatunku C45 o względnej grubości ścianki $g_0/D = 0,13$ ($D = 38$ mm, $g_0 = 5$ mm, $L_0 = 120$ mm), które kształtowano z prędkościami v/n w zakresie od 5 mm/obr do 15 mm/obr ($v = 3 \div 9$ mm/s). Podczas obciskania dla wszystkich prędkości przyjęto jednakowy stopień gniotu, który wynosił $\delta = 1,5$. Ukształtowane w ten sposób odkuwki ze skrajnymi przewężeniami pokazano na rys. 5.14. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość kształtowania odkuwek w szerokim zakresie prędkości względnych narzędzi. Ponadto zauważono, że stopnie odkuwek obciskane z większymi prędkościami mają większą dokładność kształtu. Odkuwki obciskane z mniejszymi prędkościami ($v/n < 7$ mm/obr) charakteryzują się dość dużą graniastością przekroju poprzecznego obciskanych stopni ($\Delta = 0,5 \div 0,7$ mm). Ponadto proces kształtowania odkuwek z małymi prędkościami ($v/n < 4$ mm/obr) nie gwarantuje uzyskania wyrobów o wymaganej dokładności. Zauważono również, że obniżenie prędkości do $v/n = 3$ mm/obr powoduje dużą deformację przekroju poprzecznego kształtowanych stopni (graniastność). Niewątpliwie jest to

związane z nadmiernym wychłodzeniem materiału podczas dłuższego czasu realizacji procesu obciskania. W rezultacie dochodzi do wzrostu oporów plastycznego płynięcia materiału i generowania drgań w układzie narzędzia – kształtowany półfabrykat, które są jedną z przyczyn utraty stateczności ścianki.



Rys. 5.14. Odkuwki elementarnych wałków ukształtowane z różnymi prędkościami narzędzi ($D = 38 \text{ mm}$, $g_o = 5 \text{ mm}$, $v = 3 \div 9 \text{ mm/s}$, $\delta = 1,5$)

Zarejestrowane w trakcie eksperymentu przebiegi parametrów siłowych (rys. 5.15) wskazują, że zwiększenie prędkości kształtowania w ograniczonym stopniu wpływa na zmianę wartości maksymalnych sił.



Rys. 5.15. Przebiegi parametrów siłowych zarejestrowane podczas obciskania obrotowego odkuwek drążonych z różnymi prędkościami narzędzi ($D = 38 \text{ mm}$, $g_o = 5 \text{ mm}$, $v = 3 \div 9 \text{ mm/s}$, $\delta = 1,5$): a) siły nacisku narzędzi, b) momenty obrotowe

Natomiast wyraźne zróżnicowanie wyników jest widoczne w odniesieniu do momentów obrotowych. W większości przypadków zwiększenie prędkości postępowej narzędzi powoduje wzrost wartości maksymalnych momentów obrotowych. Można to tłumaczyć zwiększeniem się jednostkowych gniotów i zwiększeniem powierzchni kontaktu obciskanego materiału z narzędziami, a w rezultacie przesunięciem ramienia działania siły wypadkowej.

5.4. Próby obciskania obrotowego na zimno skrajnych stopni stalowych odkuwek drążonych

W trakcie eksperymentu określono również możliwość realizacji procesu obciskania obrotowego półfabrykatów rurowych na zimno. Podczas prób kształtowano skrajne przewężenia na odcinkach stalowych rur w gatunku C45, których wymiary wynosiły odpowiednio: średnica zewnętrzna $\varnothing 38$ mm, długość $L_o = 120$ mm oraz grubość ścianek $g_o = 2,6; 3,0; 4,0; 5,0$ mm. Przed procesem wsady poddano wyżarzaniu rekrytalizującemu. Z uwagi na umocnienie materiału podczas odkształcania, proces obciskania drążonych odkuwek na zimno realizowano z niewielkimi wartościami stopnia gniotu ($\delta \leq 1,2$). Dodatkowo przyjęto znacznie mniejszą prędkość narzędzi, która wynosiła $v/n = 0,8$ mm/obr dla wszystkich analizowanych wariantów obciskania na zimno.

Ukształtowane w trakcie eksperymentu wyroby pokazano na rys. 5.16. Poprawny kształt odkuwek uzyskano jedynie dla niewielkich stopni gniotu, nie przekraczających $\delta \leq 1,1$, co odpowiada redukcji średnicy zewnętrznej do zaledwie $\varnothing 34,5$ mm. Na niektórych ukształtowanych półfabrykatkach można zaobserwować zniekształcenia zarysu kołowego (graniastość), które wywołane zostały osiągnięciem granicznej wartości gniotu dla przyjętych parametrów procesu.



Rys. 5.16. Stalowe odkuwki drążonych wałków ze skrajnymi stopniami, obciskane na zimno

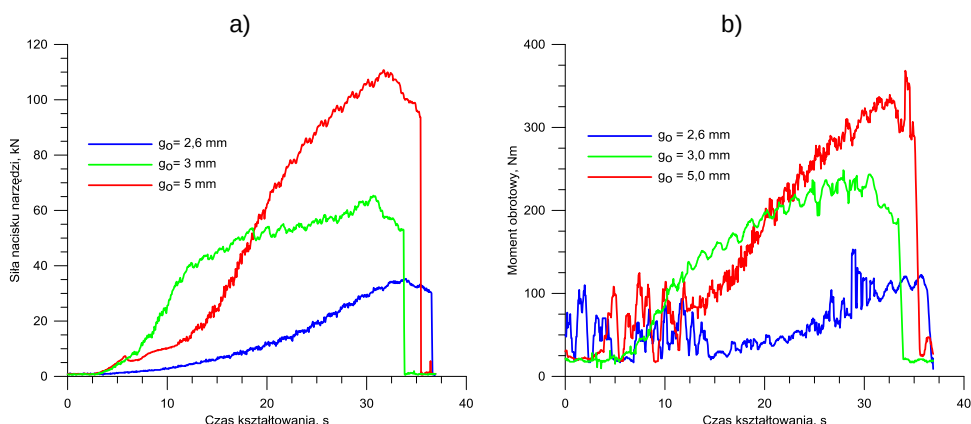
Próby obciskania wyrobów na zimno z większymi stopniami gniotu zakończyły się deformacją przekroju poprzecznego kształtowanych odkuwek (rys. 5.17) lub deformacją i pękaniem wzdłużnym materiału w obszarze oddziaływania narzędzi.

Zaobserwowane wady (zarówno deformacja, jak i wzdłużne pęknięcia) są spowodowane utratą stateczności ścianki oraz umocnieniem odkształcanego materiału. Powodują one ograniczenie zakresu stosowania technologii na zimno do kształtowania elementów o niewielkich redukcjach średnicy zewnętrznej. Oczywiście możliwe jest uzyskanie większych gniotów, jednak w tym przypadku należy zastosować wyżarzanie międzyoperacyjne, które przywróci własności plastyczne materiału.



Rys. 5.17. Deformacja obciskanych na zimno stopni odkuwki, powstała w wyniku przyjęcia zbyt dużego gniotu ($g_o = 2,6 \text{ mm}$, $\delta = 1,2$)

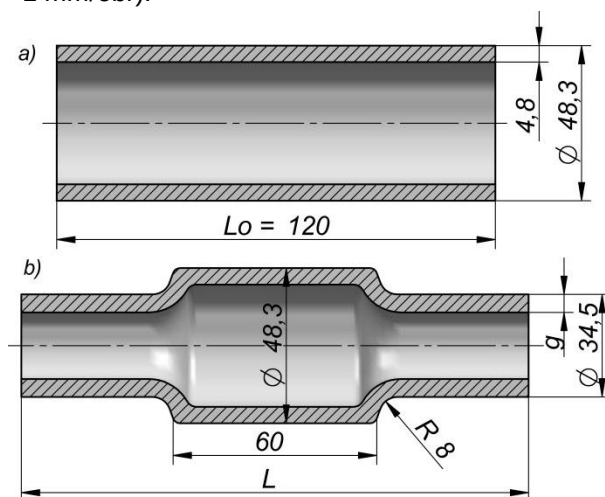
Zarejestrowane podczas badań przebiegi sił kształtowania oraz momentów obrotowych pokazano na rys. 5.18. Zgodnie z oczekiwaniami kształtowanie odkuwek o większych grubościach ścianek powoduje wzrost wartości sił i momentów obrotowych. Również charakter przebiegów parametrów siłowych uzależniony jest od grubości ścianek obciskanych półfabrykatów. Podczas kształtowania tulei o mniejszych grubościach ścianek charakterystyki siłowe są spłaszczone. W tym przypadku, zarówno siły nacisku narzędzi, jak i momenty obrotowe narastają stosunkowo wolno. Zwiększenie grubości ścianki powoduje bardzo szybki wzrost siły i momentu, co tłumaczy się znacznie większymi oporami odkształcenia plastycznego oraz silnym umocnieniem materiału. Dla wszystkich grubości ścianek zaobserwowano oscylacje wartości sił i momentów obrotowych, które spowodowane są niewielką deformacją przekroju poprzecznego obciskanych stopni (trójkątowaniem), które usuwane jest dopiero w fazie kalibrowania.



Rys. 5.18. Przebieg parametrów siłowych podczas obciskania drążonych odkuwek stalowych na zimno o różnych grubościach ścianek: a) siły nacisku, b) momenty obrotowe

5.5. Próby obciskania obrotowego na zimno i na gorąco odkuwek drążonych ze stopów aluminium

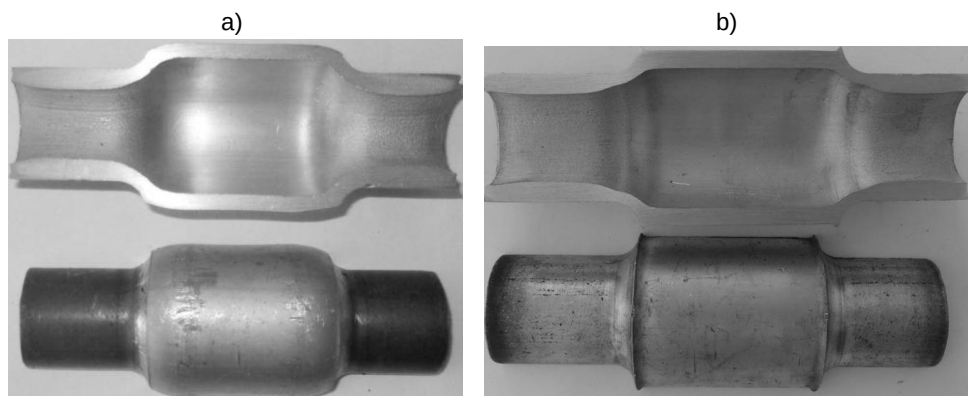
Dużą grupę części maszyn stanowią również elementy cienkościenne, wykonane ze stopów metali nieżelaznych. Znajdują one szerokie zastosowanie między innymi w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnych. W związku z tym podjęto próbę określenia możliwości obciskania obrotowego na zimno i na gorąco drążonych odkuwek o niewielkich grubościach ścianek ze stopu aluminium w gatunku 6061 (PA38 wg PN). Próby obciskania odkuwek cienkościennych wałków elementarnych ze stopu aluminium zrealizowano dla dwóch różnych temperatur początkowych półfabrykatów: na zimno (półfabrykaty miały temperaturę otoczenia) oraz na gorąco (półfabrykaty nagrzewano do temperatury 480 °C). Odcinki rur obciskane na zimno przed procesem dodatkowo poddano wyżarzaniu rekrystalizującemu. Wartość gniotu ($\delta = D/d$) w obszarze kształtowanych stopni dla obydwu wariantów wynosiła $\delta = 1,4$, co odpowiadało średnicy $\varnothing 34,5$ mm redukowanych stopni (rys. 5.19). Prędkość postępową narzędzi v uzależniona była od temperatury półfabrykatu. Dla procesu realizowanego na gorąco wynosiła ona 4 mm/s ($v/n = 6,6$ mm/obr), natomiast dla obciskania na zimno narzędzia przemieszczały się z prędkością 0,5 mm/s ($v/n = 1$ mm/obr).



Rys. 5.19. Kształt i wymiary cienkościennej odkuwki wałka elementarnego: a) półfabrykat, b) obciskana odkuwka

Ukształtowane podczas prób doświadczalnych odkuwki pokazano na rys. 5.20. Zgodnie z uzyskanymi wynikami stwierdzono, że możliwe jest kształtowanie zaproponowaną technologią drążonych odkuwek stopniowanych wałków z cienkościennych półfabrykatów rurowych ze stopów aluminium. Proces

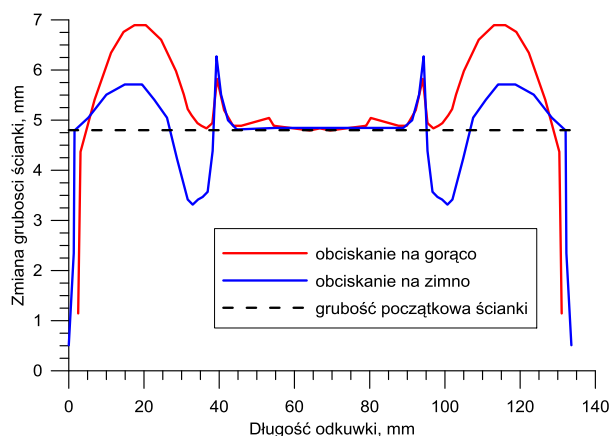
taki może być z powodzeniem zrealizowany zarówno na gorąco, jak i na zimno, zaś uzyskane odkuwki charakteryzuje dość duża zgodność geometryczna. Zaobserwowane różnice w geometrii odkuwek związane są z kinematyką płynięcia materiału i wynikają przede wszystkim z różnych wartości oporów kształtowania plastycznego, sztywności półfabrykatów oraz odmiennych warunków tarcia na powierzchniach kontaktu narzędzi z gorącym i zimnym materiałem. Podczas kształtowania na gorąco materiał w wyniku oddziaływania obracających się narzędzi przemieszcza się głównie promieniowo w kierunku osi półfabrykatu, zwiększając grubość ścianki redukowanych stopni, przy relatywnie niewielkim wydłużeniu obciskanych czopów. Jednocześnie niewielkiej deformacji ulega centralny stopień odkuwki (nie podlegający kształtowaniu), która przejawia się dość dużym zaokrągleniem krawędzi w pobliżu powierzchni czołowych tego stopnia oraz wklęsłą powierzchnią w jego centralnej części. W przypadku procesu realizowanego na zimno również dochodzi do wzrostu grubości ścianki w strefie kształtowanych stopni. Jednak odmiennie do procesu obciskania na gorąco, obserwuje się tendencję do intensywniejszego płynięcia materiału w kierunku osiowym (większe wydłużenie kształtowanych stopni). Widoczna jest także większa niejednorodność rozkładu grubości ścianki. Ponadto w odkuwkach obciskanych na zimno można zauważyć duży wzrost średnicy nieodkształcanego stopnia w pobliżu jego powierzchni czołowych, prowadzący do powstania ostrych kołnierzy, przy jednocześnie niezmienionej geometrii strefy centralnej wyrobu.



Rys. 5.20. Odkuwki obciskane ze stopu aluminium w gatunku 6061 ($D = 48,3 \text{ mm}$, $g_o = 4,8 \text{ mm}$, $\delta = 1,4$): a) na gorąco, b) na zimno

Przeprowadzona analiza dokładności geometrycznej przekrojów poprzecznych ukształtowanych odkuwek wykazała, że stopnie obciskane na gorąco charakteryzują się znacznie mniejszą dokładnością. Zmierzone odchyłki kołowości wynoszą około 0,6 mm dla odkuwek kształtowanych na gorąco oraz 0,25 mm dla procesu realizowanego na zimno. Różnica w dokładnościach obciskanych odkuwek związana jest z szeregiem czynników, wśród których największą rolę odgrywa sztywność ścianki oraz prędkość kształtowania.

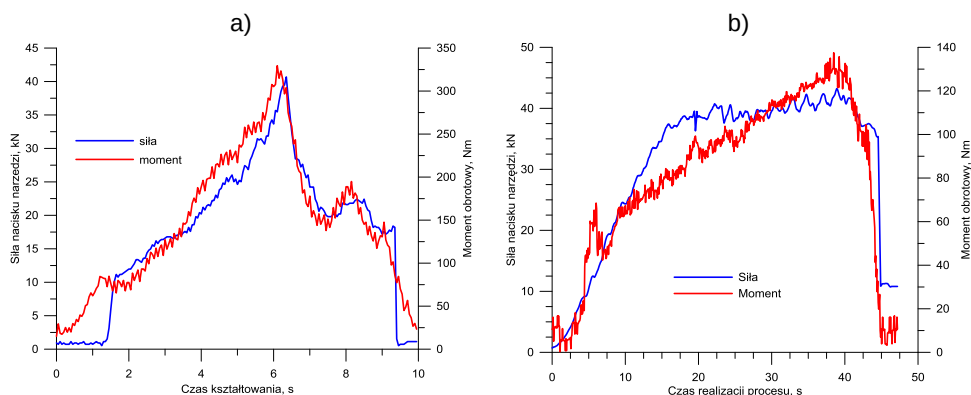
Zgodnie z rys. 5.21 można stwierdzić, że rozkład grubości ścianek odkuwek ukształtowanych ze stopów aluminium nie jest jednorodny, zaś charakter zmian grubości ścianek w dużym stopniu zależy od temperatury wsadu oraz prędkości obciskania. Widoczne jest, że dla cienkościennych półfabrykatów podczas kształtowania na gorąco materiał płynie przede wszystkim w kierunku promieniowym, zwiększając grubość ścianki w obszarze redukowanych stopni. Przyrost grubości ścianki jest dość duży i sięga 41% w stosunku do grubości początkowej. Obserwuje się przy tym niewielkie wydłużenie kształtowanych stopni oraz brak widocznych zmian grubości ścianki w obszarze promieni przejściowych między kolejnymi stopniami odkuwki. Natomiast odkuwki kształtowane na zimno charakteryzują się zdecydowanie mniejszym przyrostem grubości ścianki, który wynosi zaledwie 16% w stosunku do grubości początkowej oraz większym wydłużeniem obciskanych stopni. Zaobserwowane różnice w geometrii odkuwek kształtowanych na zimno są spowodowane mniejszymi siłami tarcia na powierzchni kontaktu narzędzi z półfabrykatem. W rezultacie materiał intensywniej płynie powierzchniowo w kierunku osiowym, co skutkuje mniejszym przyrostem grubości ścianki oraz większym wydłużeniem skrajnych stopni odkuwki. Widoczne jest również bardzo duże pocienienie ścianki w strefie promieni przejściowych (około 30 % grubości początkowej). W związku z tak dużym ubytkiem grubości ścianki można się spodziewać obniżenia własności wytrzymałościowych odkuwek kształtowanych przy takich parametrach, które tylko częściowo kompensowane będą umocnieniem materiału. Dlatego też proces obciskania na zimno należy prowadzić z mniejszymi wartościami gniotu. Pozwoli to ograniczyć niebezpieczeństwo nadmiernego pocienienia ścianki.



Rys. 5.21. Rozkłady grubości ścianek w odkuwkach obciskanych ze stopu aluminium 6061

Zarejestrowane podczas eksperymentu siły nacisku narzędzi i momenty obrotowe pokazano na kolejnym rys. 5.22. Cechą charakterystyczną uzyskanych

przebiegów jest duża zbieżność pomiędzy rozkładami sił nacisku narzędzi, a momentami obrotowymi w zakresie jednej temperatury wsadu. Natomiast zasadniczą różnicę można zauważyć porównując wartości oraz przebiegi sił i momentów wyznaczone dla różnych parametrów termicznych i kinematycznych procesu. Podczas obciskania odkuwek na gorąco obserwuje się szybki wzrost sił i momentów obrotowych przez cały etap kształtowania. Wartości maksymalne parametry siłowe w tym procesie osiągają w końcowej fazie kształtowania. Następnie podczas kalibrowania widoczny jest początkowo szybki, a następnie łagodniejszy spadek sił i momentów. Gwałtowny wzrost parametrów siłowych podczas fazy kształtowania jest efektem spadku temperatury półfabrykatu oraz wzrostem grubości ścianki obciskanych stopni. Analizując rozkłady wyznaczone w trakcie kształtowania na zimno daje się zauważyć nieco inny charakter przebiegów. W początkowym etapie procesu następuje bardzo szybki wzrost sił i momentów, który jest wywołany zagłębianiem się narzędzi w materiał. W ustalonej fazie kształtowania obserwuje się ustabilizowanie przebiegów siły oraz momentu i następnie powolny ich wzrost. Zaobserwowany stopniowy wzrost siły i momentu w tej fazie procesu jest spowodowany umacnianiem się materiału oraz przyrostem grubości ścianki. Ostatnia faza procesu – kalibrowanie jest znacznie krótsza w stosunku do obserwowanej podczas obciskania na gorąco i przebiega przy gwałtownie spadających wartościach siły i momentu.



Rys. 5.22. Przebiegi siły i momentu obrotowego zarejestrowane podczas obciskania odkuwki ze stopu aluminium 6061 ($D = 48,3$ mm, $g_o = 4,8$ mm, $\delta = 1,4$): a) na gorąco, b) na zimno

Porównując wartości maksymalne sił, zarejestrowane podczas obu procesów można zauważyć, że pomimo różnicy w temperaturze wsadu (wpływającej na różne wartości oporu odkształcenia plastycznego), siły nacisku narzędzi przyjmują zbliżone wartości maksymalne. Jest to spowodowane kilkukrotnie mniejszymi prędkościami przemieszczania się narzędzi kształtujących materiał na zimno w stosunku do procesu realizowanego na gorąco. W rezultacie wartość gniotu jednostkowego (odniesionego do drogi kształtowania) jest znacznie

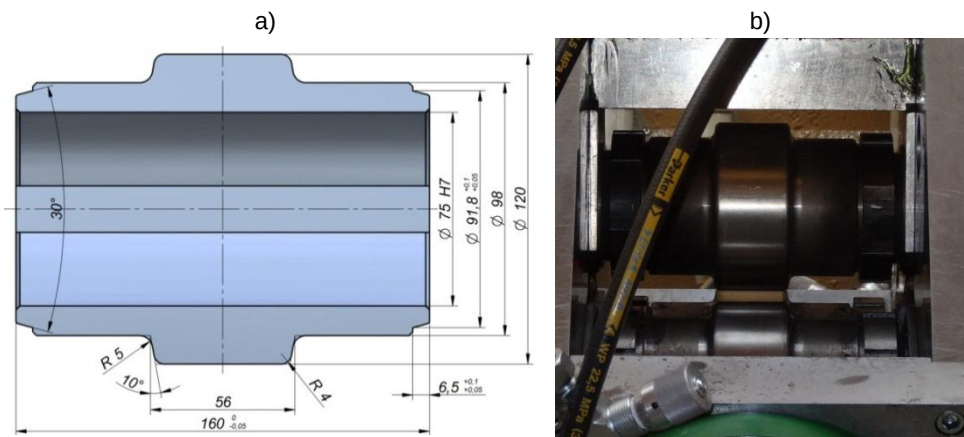
mniejsza, co wpływa na obniżenie wielkości siły nacisku narzędzi. Ciekawych informacji dostarczają wartości maksymalne momentów obrotowych, które dla procesu realizowanego na zimno są znacznie mniejsze (ponad 2 razy). Moment walcowania jest funkcją nacisków jednostkowych oraz parametrów geometrycznych kotłiny walcowniczej, te z kolei uzależnione są od wartości gniotu jednostkowego. Również ważnym parametrem, od którego zależy wartość momentu obrotowego jest tarcie na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami. W przypadku procesów realizowanych na zimno jest ono kilkukrotnie mniejsze w stosunku do kształtowania na gorąco. W rezultacie pomimo kilkukrotnie większych oporów odkształcenia plastycznego materiału obciskanego na zimno, obserwuje się znacznie mniejsze wartości momentu obrotowego w stosunku do procesu realizowanego na gorąco.

5.6. Próby obciskania obrotowego na gorąco stopni centralnych stalowych odkuwek drążonych

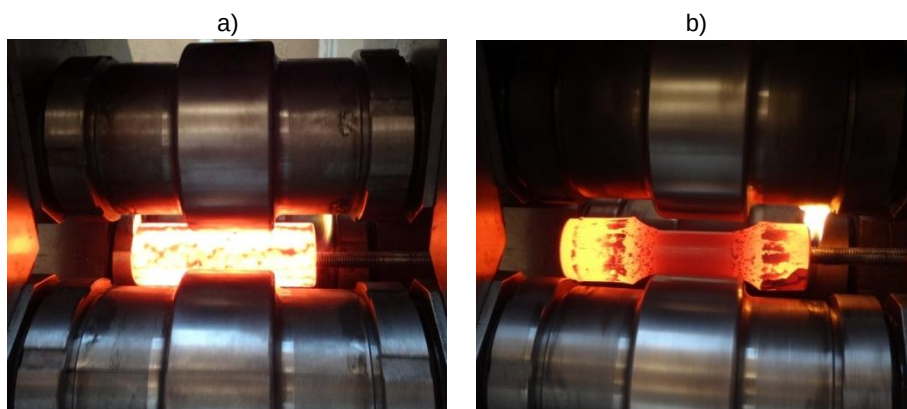
Do badań doświadczalnych procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek z centralnymi stopniami zaprojektowano i wykonano komplet dzielonych segmentów narzędziowych (rys. 5.23). Przyjęty do badań kształt walców umożliwił realizację procesu obciskania środkowych stopni (przewężeń) na półfabrykatakach rurowych w zakresie gniotów $\delta = 1 \div 2,1$. Podczas kształtowania redukowana jest średnica jedynie centralnego stopnia, zaś skrajne stopnie nie mają kontaktu z narzędziami. Uzbrojone wały agregatu w wykonane narzędzia pokazano na rys. 5.23b). W badaniach analizowano wpływ prędkości kształtowania, grubości ścianki półfabrykatu oraz wartości gniotu $\delta = D/d$ obciskanego stopnia na przebieg procesu i jakość ukształtowanych odkuwek. Do prób wykorzystano wsady rurowe ze stali C45 o średnicy zewnętrznej $\varnothing 42,4$ mm, długości początkowej $L_0 = 120$ mm i początkowej grubości ścianki g_0 wynoszącej odpowiednio 3; 5; 7; 9 oraz 11 mm. Półfabrykaty nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około 1150 °C, po czym przenoszono je do przestrzeni roboczej agregatu, gdzie prowadzono proces obciskania (rys. 5.24). W trakcie procesu narzędzia obracały się ze stałą prędkością $n = 36$ obr/min w zgodnym kierunku i jednocześnie przemieszczały się promieniowo ze stałymi prędkościami, które wynosiły $v = 1,5$ mm/s oraz $v = 3$ mm/s ($v/n = 2,5$ mm/obr oraz $v/n = 5$ mm/obr). Podczas eksperymentu analizowano stabilność przebiegu procesu, parametry geometryczne uzyskanych wyrobów oraz parametry siłowe obciskania.

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych jednoznacznie potwierdzono możliwość kształtowania drążonych odkuwek z centralnymi przewężeniami z wsadu rurowego. Potwierdzeniem tego są ukształtowane

w trakcie prób drążone odkuwki elementarnych wałków o różnych grubościach ścianek, które pokazano na rys. 5.25.



Rys. 5.23. Narzędzia do obciskania obrotowego odkuwek drążonych ze środkowym przewężeniem: a) kształt i wymiary narzędzi, b) narzędzia zamontowane na wałach roboczych agregatu



Rys. 5.24. Obciskanie drążonej odkuwki elementarnego wałka w agregacie kuźniczym do obciskania obrotowego: a) wsad umieszczony w przestrzeni roboczej urządzenia, b) ukształtowana odkuwka

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość kształtowania odkuwek w szerszym zakresie grubości względnych ścianek $g_0/D = 0,07 \div 0,26$, (w stosunku do procesu obciskania skrajnych stopni). Można to tłumaczyć większą sztywnością odkuwek, w których skrajne, nieodkształcane stopnie obustronnie utrzymują stopień podlegający redukcji średnicy. Należy przy tym zaznaczyć, że odkuwki ukształtowane z półfabrykatów o najmniejszej grubości ścianki ($g_0/D = 0,07$) charakteryzują się stosunkowo dużą odchyłką kołowości (około 0,5 mm).



Rys. 5.25. Odkuwki elementarnych wałków ze środkowym przewężeniem ukształtowane z półfabrykatów rurowych o różnych grubościach ścianki ($D = 42,4 \text{ mm}$, $v/n = 5 \text{ mm/obr}$, $\delta = 1,5$)

Może to świadczyć, że takie parametry geometryczne wsadów są granicznymi, przy których możliwe jest jeszcze uzyskanie w miarę poprawnych elementów. Na części ukształtowanych odkuwek (obciskanych z półfabrykatów o grubszych ściankach $g/D > 0,2$) zaobserwowano wygięcie osi odkuwki (rys. 5.26). Przyczyną wyginania odkuwek jest brak podparcia półfabrykatu w strefie skrajnych czopów, które podczas obciskania nie stykały się z narzędziami. Zjawisko wyginania odkuwek można w łatwy sposób wyeliminować, zmieniając konstrukcję narzędzi tak, aby w ostatniej fazie procesu – podczas kalibrowania, wszystkie stopnie półfabrykatu stykały się z powierzchniami roboczymi walców. Innym defektem kształtu, (zaobserwowanym również podczas kształtowania odkuwek ze skrajnymi przewężeniami) jest graniastość przekroju poprzecznego obciskanego stopnia (rys. 5.27), która jest przejawem utraty stateczności ścianki.



Rys. 5.26. Wygięcie osi obciskanej odkuwki, spowodowane brakiem podparcia skrajnych stopni podczas kształtowania wyrobu

Podobnie, jak miało to miejsce podczas obciskania stopni skrajnych, do deformacji przekroju poprzecznego dochodzi w czasie kształtowania odkuwek o małych grubościach ścianek z niewielkimi prędkościami względnymi ($v/n \leq 3,0$ mm/s). W odkuwkach obciskanych z półfabrykatów o większych grubościach ścianek nie zaobserwowano tej tendencji.



Rys. 5.27. Deformacja obciskanego stopnia odkuwki zaobserwowana podczas kształtowania półfabrykatów z małymi prędkościami ($g_0 = 3$ mm, $v/D = 1,6$ mm/s, $\delta = 1,5$)

Przyczyną deformacji przekroju poprzecznego stopni obciskanych z małymi prędkościami było nadmierne wychłodzenie materiału (na całej grubości ścianki). Spadek temperatury prowadził do wzrostu oporów odkształcenia plastycznego i utrudniał promieniowe płynięcie materiału. W rezultacie, w pierwszej chwili utraty stateczności dochodziło do dużego zniekształcenia przekroju poprzecznego obciskanego stopnia, które można nazwać trójkątowaniem. Pomimo silnej deformacji zarysu odkuwka ciągle była obracana przez narzędzia, co powodowało, że rozmieszczone co 120° walce kształtowały zniekształcony stopień o zarysie zbliżonym do pięciokąta lub kwadratu w zależności od średnicy początkowej wsadu oraz wielkości przyjętego gniotu.

6. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z rezultatami badań doświadczalnych

Nowatorski charakter technologii obciskania obrotowego elementów drążonych, ma swoje odzwierciedlenie w braku szerszej wiedzy na temat modelowania numerycznego podobnych procesów. W rezultacie utrudniony jest proces tworzenia modeli obliczeniowych, które z jednej strony wprowadzałyby dopuszczalne uproszczenia, pozwalające skrócić czas analizy, zaś z drugiej strony uwzględniałyby jak największą liczbę czynników, mających istotny wpływ na przebieg procesu i jakość uzyskanych wyników. Dodatkowym utrudnieniem podczas modelowania takich procesów jest ich rotacyjny charakter, który przejawia się między innymi bardzo małym polem kontaktu materiału z narzędziami oraz ciągłą jego zmianą. W związku z tym za celowe uznano przeprowadzenie porównawczej analizy wyników obliczeń numerycznych z efektami eksperymentu, które pozwolą na jakościową i ilościową ocenę uzyskanych wyników oraz wskażą kierunki modyfikacji zastosowanych modeli numerycznych.

Większość spotykanych w budowie maszyn stopniowanych osi i wałów charakteryzuje się stosunkowo niewielką różnicą średnic dwóch sąsiednich stopni (D/d). Ten parametr konstrukcyjny ze względów wytrzymałościowych najczęściej nie przekracza 1,5, a często jest znacznie mniejszy. Dlatego też porównawczą analizę teoretyczno-doświadczalną przeprowadzono dla procesów obciskania obrotowego odkuwek drążonych ze skrajnymi oraz centralnymi stopniami, dla których gniot określony zależnością $\delta = D/d$ wynosił 1,5.

6.1. Analiza porównawcza obciskania skrajnych stopni odkuwek wałków drążonych

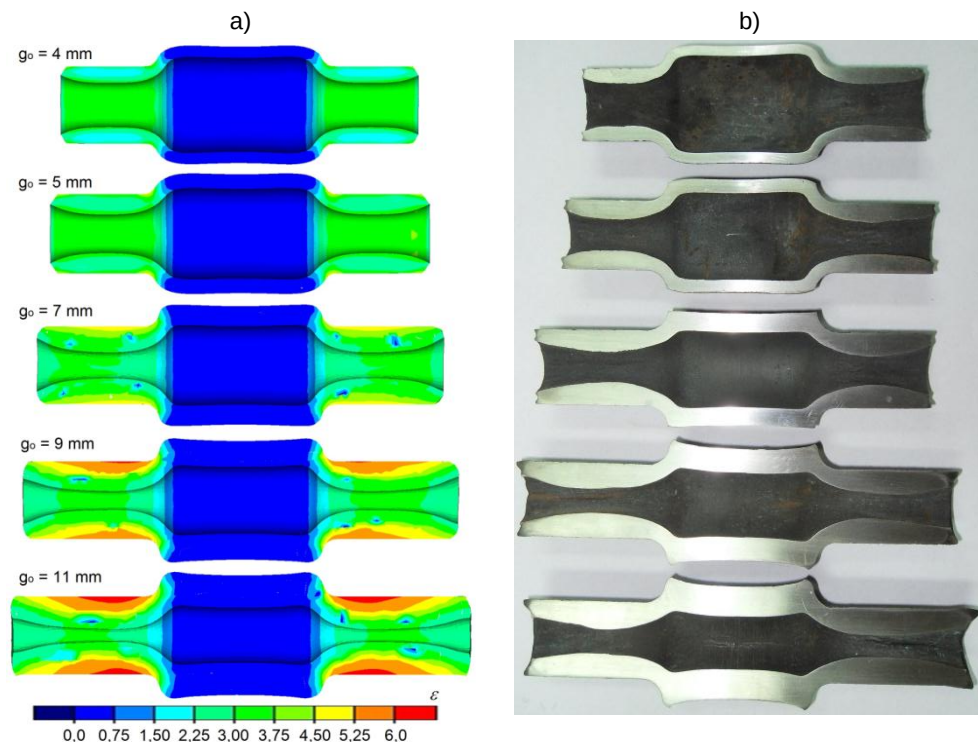
Walidacji przyjętych założeń technologicznych podczas modelowania procesu obciskania obrotowego odkuwek ze skrajnymi stopni dokonano w oparciu o takie kryteria jak:

- ocena geometrii ukształtowanych odkuwek;
- ocena stabilności przebiegu procesu;
- rozkłady temperatury;
- przebiegi i wartości parametrów siłowych podczas kształtowania.

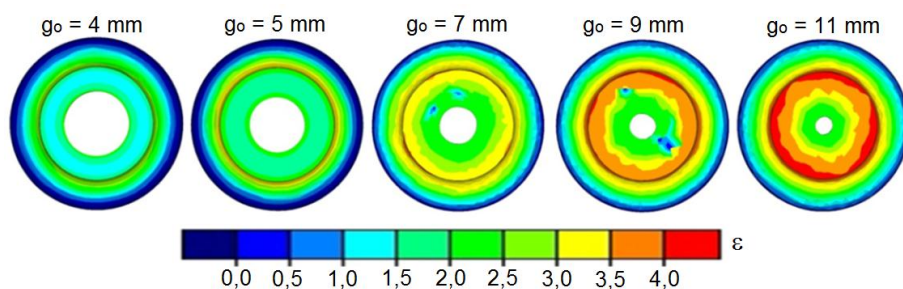
Badania przeprowadzono dla wybranej grupy odkuwek kształtowanych z jednakowymi parametrami kinematycznymi i termicznymi, z zastosowaniem stalowych półfabrykatów rurowych (w gatunku C45) o różnych grubościach ścianek. Zestawienie ważniejszych parametrów geometrycznych przyjmowanych podczas badań obejmuje: stopień gniotu kształtowanych czopów odkuwki $\delta = 1,5$, średnicę zewnętrzną wsadów $D = 42,4$ mm, grubości ścianki rur $g_o = (4,0; 5,0; 7,0; 9,0; 11,0)$ mm, długości początkowe wsadów $L_o = 120$ mm, średnicę zewnętrzną narzędzi $D_n = 120$ mm. Do parametrów kinematycznych, przyjmowanych w badaniach można zaliczyć zaś: prędkość obrotową narzędzi $n = 36$ obr/min, prędkość postępową narzędzi $v = 3$ mm/s oraz czas kalibrowania $t = 2$ s. Natomiast parametry termiczne uwzględniały takie czynniki jak: temperatura początkowa (nagrzewania) wsadów $T = 1150$ °C, temperatura narzędzi $T_n = 80$ °C, temperatura otoczenia $T_o = 20$ °C. Obliczenia MES wykonano dla pełnych modeli geometrycznych procesu, przyjmując identyczne warunki brzegowe jak podrozdziale 4.1.

Zestawienie odkuwek, które wyznaczono numerycznie podczas prowadzonych symulacji oraz uzyskanych w trakcie prób laboratoryjnych pokazano na rys. 6.1. Widoczne jest, że niezależnie od metody badań (numeryczna i doświadczalna), redukcji zewnętrznej średnicy wsadów towarzyszy intensywne płynięcie metalu w kierunku promieniowym (w kierunku osi odkuwek), czego efektem jest zwiększenie grubości ścianek w obszarach oddziaływania narzędzi. Zaobserwowano także osiowe przemieszczanie materiału w strefach obciskanych stopni, którego efektem jest wzrost długości odkuwki. Analizując wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia (rys. 6.1a), można zauważyć dużą niejednorodność przerobu plastycznego materiału. Widoczna koncentracja odkształceń w warstwach powierzchniowych spowodowana jest głównie obwodowym płynięciem materiału, wywołanym przez siły tarcia podczas obracania odkuwki przez walce. Należy przy tym wspomnieć, że materiał płynie w warstwach powierzchniowych również w kierunku osiowym, czego potwierdzeniem są wklęsłe powierzchnie czołowe ukształtowanych stopni. Istotny jest również fakt, że pomimo przyjęcia identycznej wartości gniotu dla wszystkich analizowanych przypadków, obserwuje się wzrost odkształceń oraz ich większą niejednorodność wraz ze zwiększaniem się grubości początkowej ścianki półfabrykatu (zwiększenie grubości początkowej ścianki z 4 mm do 11 mm powoduje ponad trzykrotny wzrost intensywności odkształcenia przy tej samej wartości redukcji średnicy zewnętrznej). Efekt ten został szczegółowo wyjaśniony w rozdziale czwartym i jest wywołany przemieszczaniem większej objętością materiału podczas obciskania półfabrykatów o grubszych ściankach. Silna niejednorodność odkształceń, zarówno w przekrojach wzdłużnych (rys. 6.1a), jak i w przekrojach poprzecznych kształtowanych stopni (rys. 6.2), niewątpliwie będzie miała wpływ na własności mechaniczne uzyskanych

odkuwek. Dlatego też, ukształtowane półfabrykaty po procesie kształtowania powinny być poddawane obróbce cieplnej.



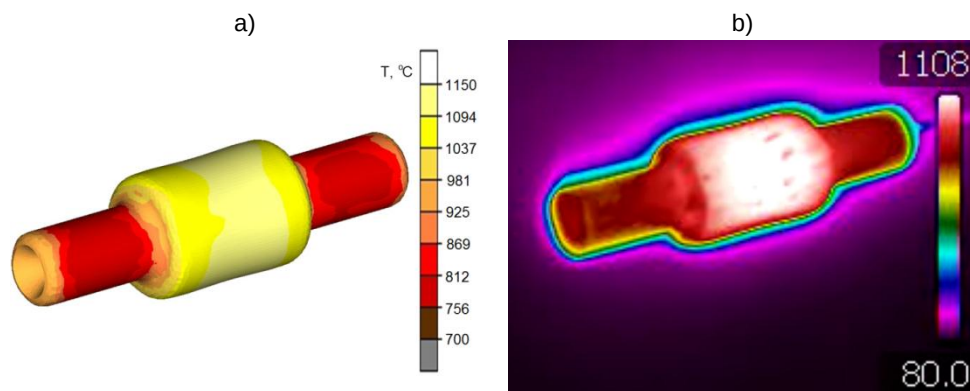
Rys. 6.1. Kształt drążonych odkuwek wałków ze skrajnymi przewężeniami: a) wyznaczony MES (wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia), b) obciśniętych w trakcie prób laboratoryjnych [140]



Rys. 6.2. Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w przekrojach poprzecznych obciskanych stopni dla odkuwek kształtowanych z półfabrykatów o różnych grubościach początkowych ścianki

Zgodnie z wynikami prezentowanymi w rozdziale czwartym, podczas kształtowania wsadów rurowych pojawia się tendencja do dużego wychłodzenia

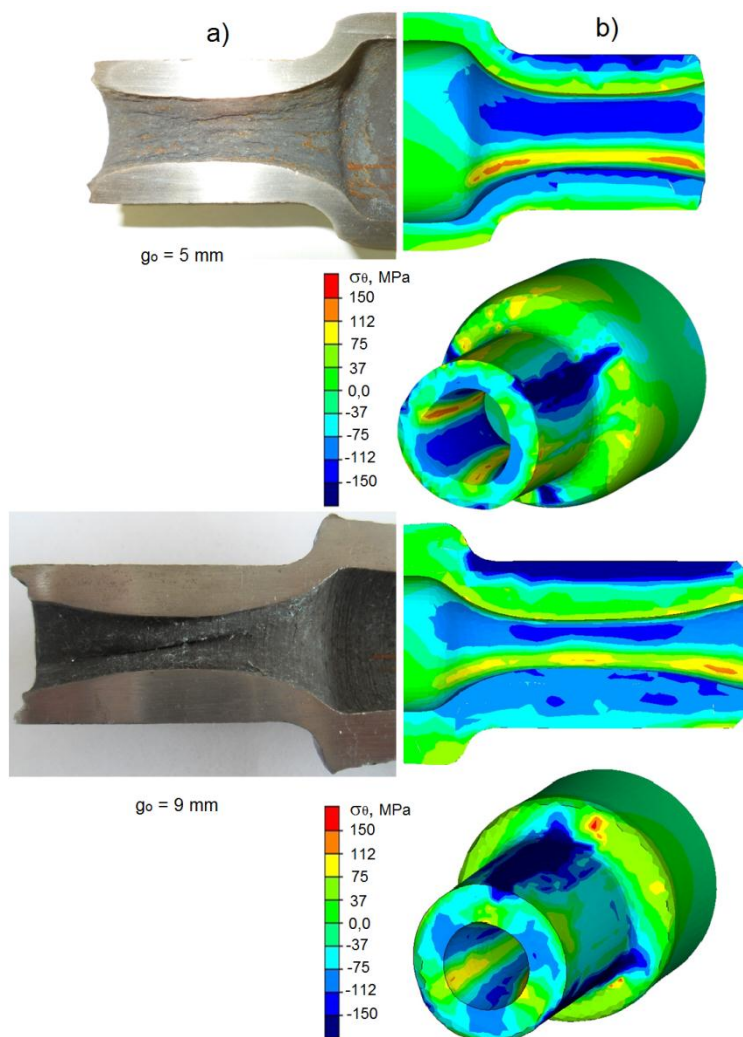
redukowanych stopni odkuwek, zwłaszcza z półfabrykatów o niewielkich grubościach ścianek, dla których spadki temperatury obejmują praktycznie cały przekrój obciskanych stopni. Dla tych odkuwek temperatura w obszarze kształtowanych stopni spada nawet do około 700 °C. W przypadku większych grubości ścianek spadek temperatury jest lokalny (powierzchniowy). W tych przypadkach im dalej od warstw wierzchnich bezpośrednio kontaktujących się z narzędziami, tym temperatura materiału jest wyższa. Potwierdzeniem tych spostrzeżeń są rozkłady temperatury na powierzchni ukształtowanej odkuwki zarejestrowane przy użyciu kamery termowizyjnej (rys. 6.3). Podobnie jak w przypadku obliczeń (rys. 6.3a) obserwuje się dość duże spadki temperatury na powierzchniach kształtowanych stopni (wywołane oddawaniem ciepła do narzędzi), przy jednocześnie wysokiej temperaturze centralnego stopnia (niestykającego się z narzędziami).



Rys. 6.3. Rozkłady temperatury na powierzchni obciskanych odkuwek z półfabrykatów o grubości ścianki $g_0 = 7$ mm: a) wyznaczone MES, b) zarejestrowane podczas eksperymentu

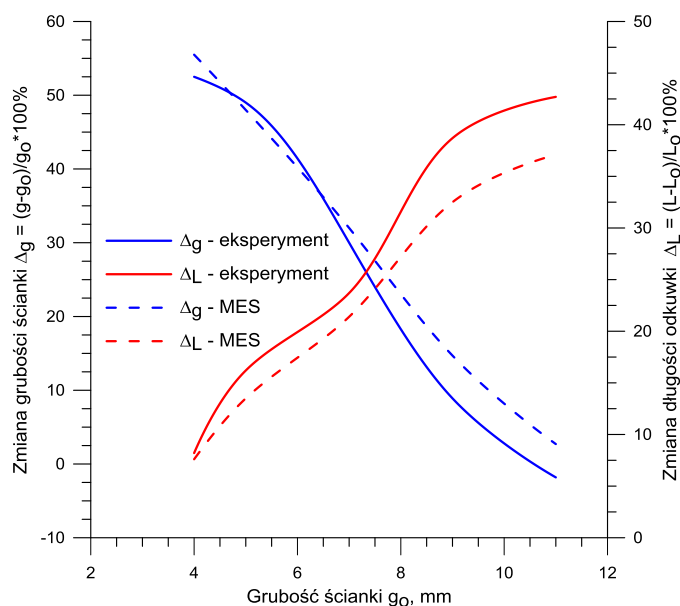
Dokładne oględziny ukształtowanych odkuwek ujawniły możliwość tworzenia się załamań na powierzchni otworu kształtowanych stopni (rys. 6.4). W przypadku obciskania obrotowego, załamania powierzchni otworu są przejawem utraty stateczności tego obszaru odkuwki, czego efektem jest wyboczenie plastyczne. Odpowiedzialnymi za to zjawisko są duże wartości obwodowych naprężeń ściskających, które podczas fazy kształtowania koncentrują się w zewnętrznych warstwach, położonych bezpośrednio pod narzędziami oraz w strefach wewnętrznych, zlokalizowanych w obszarze otworu. Koncentracja naprężeń obwodowych w warstwach zewnętrznych jest wywołana przyrostem gniotu oraz owalizacją przekroju poprzecznego, do której dochodzi podczas kształtowania. Jednak w tym obszarze materiał jest podparty przez walce, co uniemożliwia jego deformację. Natomiast koncentracja ściskających naprężeń obwodowych w warstwach wewnętrznych (zlokalizowanych w pobliżu otworu) jest konsekwencją płynięcia materiału w kierunku osi odkuwki. Obszar

występowania maksymalnych naprężeń ściskających w warstwach powierzchniowych otworu jest bardzo duży i obejmuje swoim zasięgiem ponad 65% obwodu otworu odkuwki, co sprzyja powstawaniu załamań swobodnej powierzchni otworu. Wraz ze wzrostem stopnia gniotu lub grubości ścianki wsadu zwiększa się niebezpieczeństwo załamywania powierzchni otworu. Jest to związane między innymi z koniecznością przemieszczenia promieniowego większych objętości materiału. Załamywanie się powierzchni otworu można wyeliminować lub ograniczyć w wyniku jej podparcia przy pomocy trzpienia.



Rys. 6.4. Skrajne stopnie odkuwek z załamaną powierzchnią otworu: a) odkuwki ukształtowane podczas eksperymentu, b) wyznaczone MES rozkłady naprężeń obwodowych

Ważnym kryterium weryfikacji przyjętych założeń technologicznych są parametry geometryczne obciskanych odkuwek. Wyniki badań doświadczalnych (w zakresie kształtu i wymiarów obciskanych odkuwek) dość dobrze pokrywały się z założeniami teoretycznymi (kształtem odkuwki założonym na etapie projektowania) oraz z wynikami uzyskanymi podczas prowadzonych symulacji numerycznych. Uzyskana duża zgodność wyników eksperymentalnych i teoretycznych jednoznacznie potwierdza trafność przyjętych założeń oraz poprawność modeli opracowanych do analizy MES. Jak już wcześniej wspomniano, podczas redukowania średnicy zewnętrznej skrajnych stopni odkuwki dochodzi do wzrostu grubości ścianki, który jest efektem promieniowego płynięcia materiału. Zwiększa się również długość odkuwki (w wyniku osiowego płynięcia materiału w obszarze obciskanych stopni). Jednak charakterystyczne jest to, że wielkości przyrostów grubości ścianki oraz długości odkuwki są ściśle związane z grubością początkową ścianek zastosowanych półfabrykatów. Zgodnie z informacjami przedstawionymi na rys. 6.5 wraz ze zwiększaniem się grubości początkowej ścianki obserwuje się spadek intensywności przyrostu grubości ścianki, przy jednoczesnej intensyfikacji przyrostu długości odkuwki.

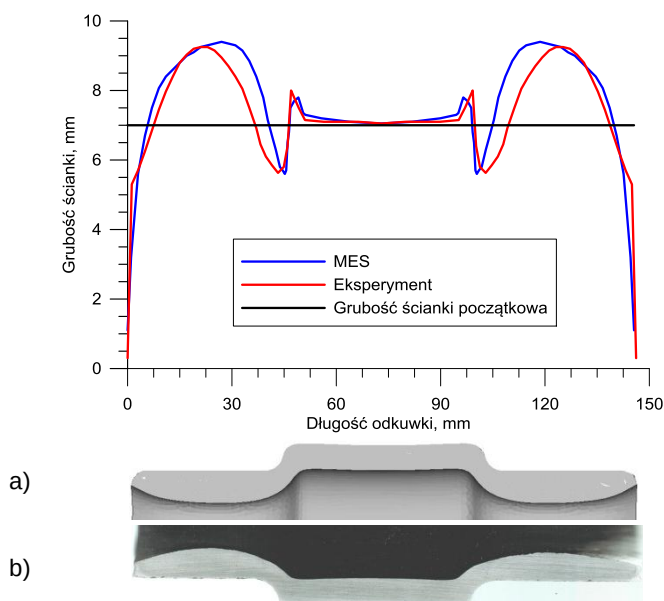


Rys. 6.5. Zmiany grubości ścianki oraz długości odkuwki wyznaczone MES oraz podczas eksperymentu

W trakcie kształtowania wsadów o największych grubościach ścianek zaobserwowano nawet pocienienie ścianki w stosunku do wymiaru początkowego. Porównując wyniki analizy numerycznej z danymi doświadczalnymi można zauważyć różnicę w charakterystykach zmian wymiarów odkuwek, które wyznaczono na podstawie modelowania numerycznego i eksperymentu. Podczas prób

eksperymentalnych kształtowania oduwek z półfabrykatów o większych grubościach ścianek można zaobserwować zdecydowanie mniejsze przyrosty grubości ścianki obciskanych stopni, którym towarzyszą intensywniejsze przyrosty ich długości w stosunku do wyników numerycznych. Rozbieżności między uzyskanymi charakterystykami prawdopodobnie wynikają z trudności w utrzymaniu jednakowych warunków termicznych podczas eksperymentu i modelowania. Przypuszczalnie większy spadek temperatury podczas eksperymentu powodował wzrost oporów plastycznego płynięcia materiału, co utrudniało jego płynięcie w kierunku promieniowym, zwiększając wydłużenie skrajnych czopów. Również duży wpływ na kinematykę płynięcia materiału mają wartości sił tarcia na powierzchni kontaktu wsadu z narzędziami. Podczas symulacji MES przyjęto graniczną wartość czynnika tarcia ($m = 1$). W rzeczywistości jego wartość może być nieco mniejsza, a tym samym i siły tarcia będą mniejsze, co ułatwia osiowe płynięcie materiału w warstwach powierzchniowych kształtowanych czopów.

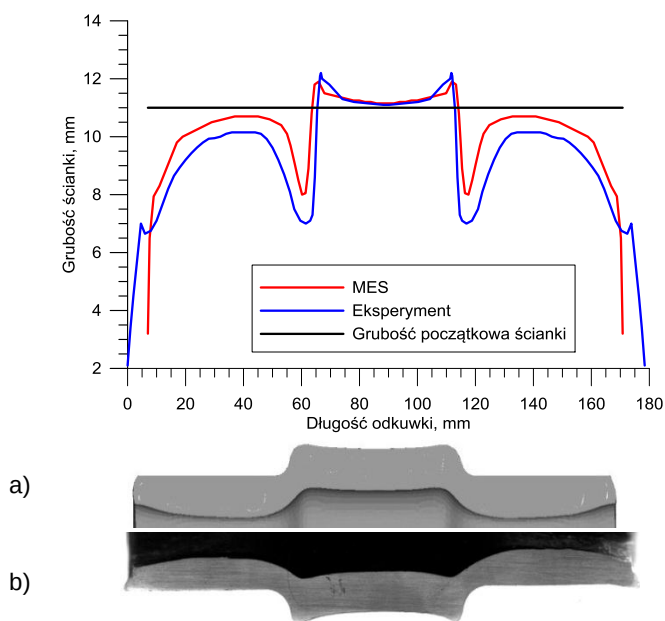
Dla większości analizowanych wariantów obciskania obserwuje się dużą niejednorodność grubości ścianek ukształtowanych stopni, które dodatkowo cechuje podobny charakter zmian grubości. Przykładowy rozkład grubości ścianki dla oduwek obciskanych z półfabrykatów rurowych o początkowej grubości ścianki $g_0 = 7$ mm pokazano na rysunku 6.6. Największy przyrost grubości ścianki zaobserwowano w obszarach centralnych uformowanych czopów.



Rys. 6.6. Rozkład grubości ścianki dla drążonych oduwek elementarnego wałka, kształtowanych z półfabrykatów o grubości początkowej $g_0 = 7$ mm: a) wyznaczony MES, b) uzyskany podczas eksperymentu

Następnie w miarę zbliżania się do powierzchni czołowych oraz środkowego stopnia odkuwki (nie podlegającego redukcji), obserwuje się stopniowe zmniejszanie grubości ścianki. Jest to efektem oddziaływania sił tarcia na warstwę wierzchnie półfabrykatu podczas osiowego płynięcia materiału w tych obszarach. W ukształtowanych odkuwkach można również wyróżnić strefy, w których dochodzi do zmniejszenia grubości ścianki. Są to przede wszystkim obszary położone przy powierzchniach czołowych obciskanych czopów, które powstają w wyniku powierzchniowego płynięcia materiału. Duże pocienienie ścianki zaobserwowano także w strefach promieni przejściowych między kształtowanymi stopniami, a nieodkształcaną częścią odkuwek. Zjawisko to może mieć negatywny wpływ na własności wytrzymałościowe elementów wytwarzanych z takich odkuwek. Pocienienie ścianki można tłumaczyć inną kinematyką płynięcia materiału w obszarach przejściowych między kolejnymi stopniami odkuwki. Oprócz zginięcia materiału, wywołanego naciskiem narzędzi, dochodzi tutaj również do rozciągania półfabrykatu, co sprzyja zmniejszeniu grubości ścianki. Duży wpływ na wielkość pocienienia ścianki w obszarach przejściowych ma wartość promieni zaokrągleń krawędzi na narzędziach. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wartości tych promieni zmniejsza się intensywność ubytku grubości ścianki. W związku z tym w celu zminimalizowania niekorzystnych skutków rozciągania materiału, wskazane jest stosowanie możliwie największych promieni w strefach przejściowych. Przedstawiony na rys. 6.6 rozkład grubości ścianki jest charakterystyczny dla odkuwek kształtowanych z półfabrykatów o względnych grubościach ścianek (g_0/D) mniejszych od 0,25. Podczas obciskania półfabrykatów rurowych o większych grubościach ścianek ($g_0/D > 0,25$), opory płynięcia materiału w kierunku promieniowym są tak duże, że metal płynie przede wszystkim powierzchniowo w kierunku osiowym (znacznie zwiększając długość skrajnych stopni). W rezultacie obserwuje się pocienienie ścianki (w stosunku do grubości początkowej) praktycznie w całym obszarze kształtowanych stopni, przy niewielkim zwiększeniu grubości ścianki nieodkształcanego (centralnego) stopnia w pobliżu jego powierzchni czołowych (rys. 6.7).

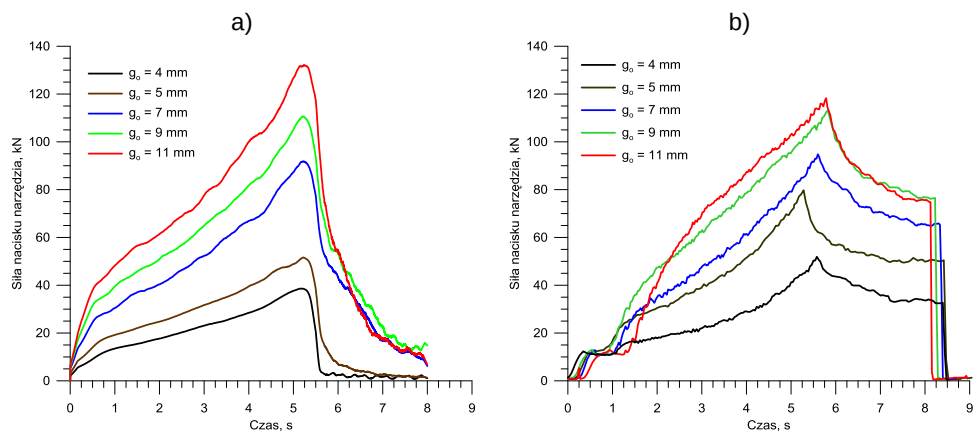
Możliwość realizacji technologii w warunkach przemysłowych w dużym stopniu uzależniona jest od wielkości sił kształtowania. Niejednokrotnie bardzo obiecujące procesy są odrzucane już we wstępnych fazach prac z powodu niedostatecznej wytrzymałości, sztywności lub trwałości narzędzi, wynikających między innymi z nadmiernych obciążeń lub niewłaściwej ich konstrukcji. Również wielkość i moc maszyn, wykorzystywanych do realizacji procesu kształtowania będzie uzależniona od wielkości i charakteru sił, które są odzwierciedleniem oporów plastycznego płynięcia materiału. Dlatego też w trakcie prowadzonych badań dokonano oceny możliwości realizacji procesu obciskania obrotowego ze względu na parametry siłowe podczas kształtowania.



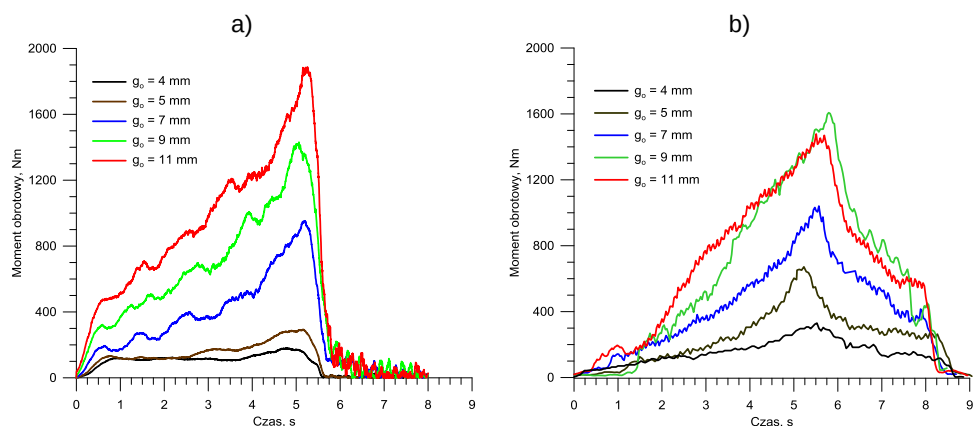
Rys. 6.7. Rozkład grubości ścianki dla drążonych odkuwek elementarnego wałka, kształtowanych z półfabrykatów o grubości początkowej $g_0 = 11$ mm: a) wyznaczony MES, b) uzyskany podczas eksperymentu

Określono również wpływ grubości ścianki kształtowanych odkuwek na wartość i przebieg sił oraz momentów obrotowych. Na podstawie wyznaczonych parametrów siłowych (sił nacisku narzędzi oraz momentów obrotowych), które przedstawiono na rys. 6.8 i 6.9, można stwierdzić, że proces jest możliwy do realizacji w warunkach przemysłowych. Wartości ekstremalne zarówno sił nacisku narzędzi, jak i momentów obrotowych nie przekraczają możliwości technologicznych zastosowanego do badań agregatu. Oczywiście jest, że wraz ze wzrostem grubości ścianki wsadu, zwiększają się wartości siły nacisku narzędzi oraz momentu obrotowego, przy czym we wszystkich analizowanych przypadkach charakter zmiany parametrów siłowych jest do siebie zbliżony. Zgodnie z informacjami zawartymi na rys. 6.8 i 6.9, pierwsze etapy kształtowania przebiegają przy szybkim wzroście sił i momentów, który jest związany z zagłębianiem się narzędzi w materiał i stopniowym redukowaniem średnicy zewnętrznej skrajnych czopów. Dodatkowo wzrost sił i momentów jest efektem spadku temperatury materiału oraz przyrostem względnej grubości ścianki półfabrykatu (g/D), w obszarze redukowanych czopów. We wszystkich analizowanych przypadkach największe wartości sił i momentów odnotowano w chwili, gdy narzędzia zajmują położenie, odpowiadające zakładanej redukcji średnicy zewnętrznej. Następnie obserwuje się dość szybki spadek wartości sił i momentów. Jest to ostatni etap procesu – kalibrowanie, podczas którego walce wykonują jedynie ruch obrotowy, usuwając niedokładności kształtu obciskanych

stopni. Porównując charakterystyki siłowe, które wyznaczono na podstawie symulacji MES oraz przeprowadzonych badań eksperymentalnych, daje się zauważyć różnice, zarówno w wartościach maksymalnych, jak i ich rozkładzie.



Rys. 6.8. Siły nacisku narzędzi w procesie obciskania obrotowego drążonych odkuwek stopniowanych wałków: a) wyznaczone MES, b) zmierzone podczas eksperymentu



Rys. 6.9. Rozkłady momentów obrotowych na narzędziach w procesie obciskania obrotowego drążonych odkuwek stopniowanych wałków: a) wyznaczone MES, b) zmierzone podczas eksperymentu

Widoczne jest, że dla procesu obciskania odkuwek o niewielkich grubościach ścianek ($g_o/D < 0,16$), wyznaczone w trakcie eksperymentu siły i momenty osiągają większe wartości w stosunku do obliczonych MES. Zauważone różnice prawdopodobnie spowodowane są rozbieżnościami pomiędzy rzeczywistymi warunkami termicznymi, a przyjętymi do obliczeń. Podczas kształtowania odkuwek o niewielkich grubościach ścianek dochodzi do szybszego wystudzenia materiału w stosunku do przyjętego modelu numerycznego, co przekłada się na

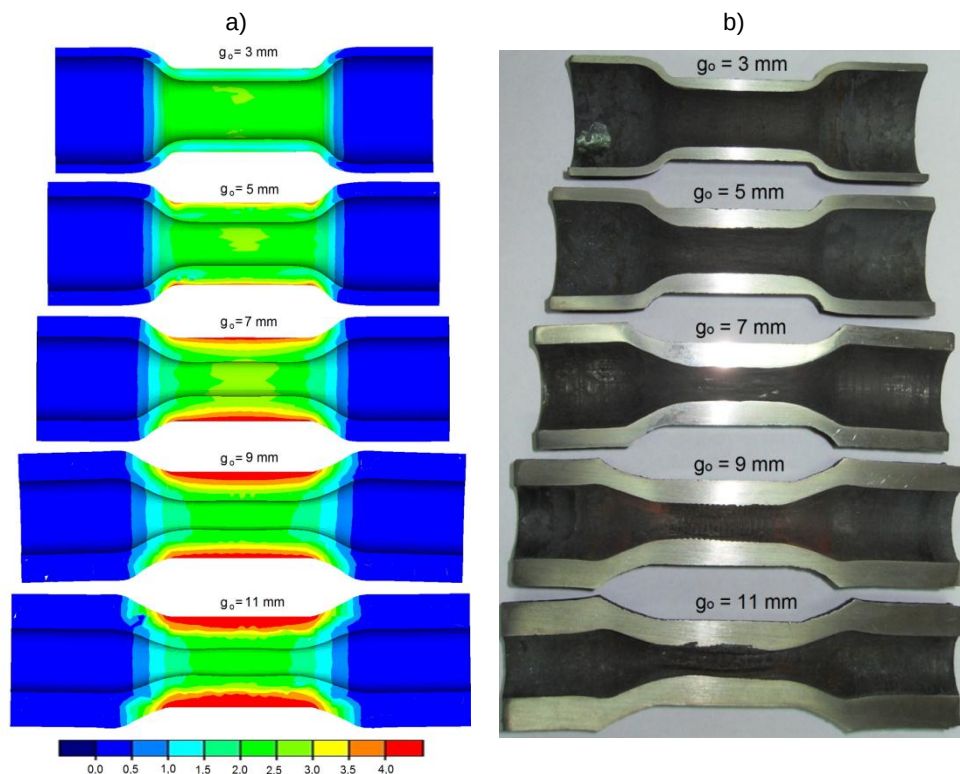
większe wartości sił i momentów. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia mogą być znacznie mniejsze różnice w wartościach parametrów siłowych uzyskanych podczas kształtowania odkuwek o większych grubościach ścianki. Tutaj z uwagi na większą pojemność cieplną półfabrykatów, temperatura kształtowanych odkuwek pozostaje stosunkowo wysoka, zapewniając lepszą plastyczność materiału. Rozkłady parametrów siłowych uzyskane z MES oraz eksperymentu dla pierwszych etapów procesu mają zbliżony charakter. Natomiast wyraźną różnicę można zaobserwować dla ostatniej fazy kształtowania – kalibrowania. W tej fazie wartości sił i momentów wyznaczonych podczas eksperymentu znacznie wolniej zmniejszają się w stosunku do rozkładów wyznaczonych MES. Jest to spowodowane intensywniejszym wychłodzeniem warstw powierzchniowych kształtowanych odkuwek w stosunku do przyjętego modelu numerycznego. W rezultacie usuwanie niedokładności kształtu (najczęściej owalizacji przekroju poprzecznego obciskanych stopni) przebiega przy większych oporach plastycznego płynięcia materiału, co wpływa na charakter rozkładów sił nacisku narzędzi i momentów obrotowych.

6.2. Analiza porównawcza obciskania stopni centralnych odkuwek wałków drążonych

Walidacji wyników numerycznych procesu obciskania obrotowego odkuwek drążonych ze środkowym przewężeniem dokonano również podczas kształtowania odkuwek z wsadów rurowych o różnych grubościach ścianek $g_o = (3,0; 5,0; 7,0; 9,0; 11,0)$ mm. Badania zrealizowano przy prędkości postępowej narzędzi $v = 2,5$ mm/s ($v/n = 4,2$ mm/obr). Pozostałe parametry symulacji numerycznych oraz prób doświadczalnych przyjęto identyczne, jak dla analizy porównawczej kształtowania stopni skrajnych.

Na rys. 6.10 pokazano przekroje osiowe odkuwek, obciskanych z półfabrykatów o różnych grubościach początkowych ścianek (wyznaczone w trakcie symulacji MES oraz uzyskane podczas eksperymentu). Porównując uzyskane w oparciu o dwie metody badawcze (analityczną i eksperymentalną) odkuwki można zauważyć dość dobrą zgodność wyników (w odniesieniu do parametrów geometrycznych). Widoczne jest, że w trakcie redukowania średnicy zewnętrznej wsadów rurowych następuje wzrost grubości ścianki (w obszarze oddziaływania narzędzi), który jest szczególnie widoczny w przypadku obciskania półfabrykatów o mniejszych grubościach ścianek. Jest to potwierdzeniem promieniowego kierunku płynięcia materiału (w obszarze oddziaływania narzędzi). Cechą charakterystyczną jest również dość duży przyrost długości odkuwek, którego intensywność wzrasta wraz ze zwiększaniem się grubości ścianki wsadu. Przy czym dla wszystkich analizowanych przypadków obciskania do wzrostu długości odkuwek odchodzi w obszarze przejściowym, pomiędzy zredukowanym stopniem, a skrajnymi, nieodkształca-

nymi czopami. Należy jednak zaznaczyć, że wzrost długości odkuwek w tych obszarach jest efektem osiowego płynięcia materiału jedynie w strefie redukowanego stopnia (głównie w warstwach powierzchniowych).

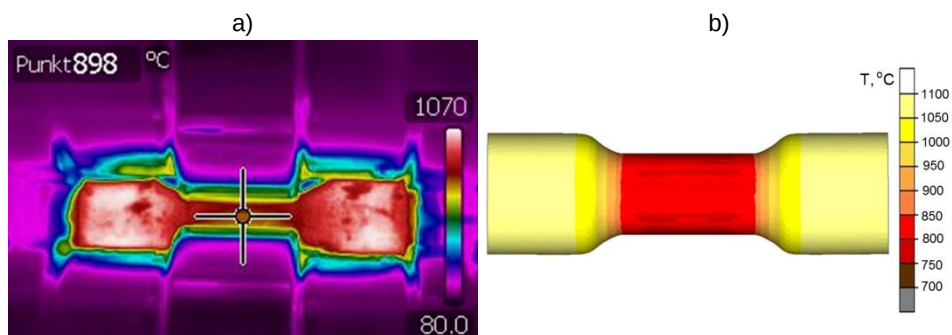


Rys. 6.10. Kształt drążonych odkuwek z centralnym przewężeniem, obciskanych z półfabrykatów o różnych grubościach ścianek: a) wyznaczony MES wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, b) uzyskany podczas eksperymentu

Potwierdzeniem takiej kinematyki płynięcia materiału jest charakter otrzymanych rozkładów intensywności odkształcenia (rys. 6.10a). We wszystkich analizowanych przypadkach największe odkształcenia koncentrują się w warstwach przypowierzchniowych zewnętrznej ścianki odkuwki. Następnie, w miarę zbliżania się do ścianki wewnętrznej, odkształcenia stopniowo się zmniejszają. Zwiększenie początkowej grubości ścianki powoduje wzrost maksymalnych wartości odkształceń (głównie w warstwach przypowierzchniowych) oraz sprzyja ich większej niejednorodności. Intensyfikacja odkształceń w strefie oddziaływania narzędzi jest bezpośrednią konsekwencją wzrostu oporów płynięcia materiału w kierunku promieniowym, które sprzyjają generowaniu odkształceń w warstwach powierzchniowych obciskanego stopnia. Wzrost odkształceń w tych obszarach ma dwójaki charakter, z jednej strony dochodzi do obwodowego

płynięcia materiału (spowodowanego przez siły tarcia), które nie powoduje zmiany geometrii odkuwki, z drugiej strony obserwuje się powierzchniowe płynięcie materiału w kierunku osiowym, efektem którego jest wzrost długości odkuwki.

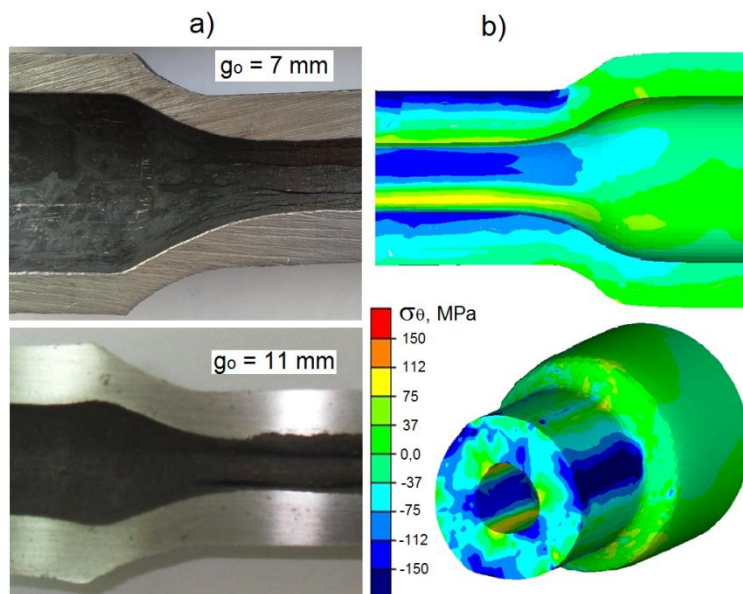
Początkowa grubość ścianki półfabrykatów ma również silny wpływ na wartość temperatury w ukształtowanych odkuwkach. Z uwagi na mniejszą pojemność cieplną do większego wychłodzenia materiału dochodzi podczas kształtowania cienkościennych wsadów. W tym przypadku spadek temperatury obejmuje cały przekrój poprzeczny obciskanego stopnia. Zwiększenie grubości ścianki pozwala na akumulowanie większych ilości ciepła w półfabrykatach, dzięki czemu powierzchniowe spadki temperatury (wywołane kontaktem materiału z chłodnymi narzędziami) rekompensowane są ciepłem przekazywanym z obszarów centralnych ścianki. Dlatego też kształtowanie odkuwek z półfabrykatów o grubszych ściankach jest łatwiejsze do zrealizowania. Wyniki pomiarów termowizyjnych również wskazują na wychłodzenie powierzchniowe materiału w obszarze kształtowanego stopnia (rys. 6.11). Występuje duża zbieżność pomiędzy wynikami pomiarów z wykorzystaniem systemów termowizyjnych oraz wynikami obliczeń numerycznych (dla grubości początkowej ścianki $g_0 = 7$ mm). Potwierdza to trafność przyjętych w modelu numerycznym wartości współczynników wymiany ciepła.



Rys. 6.11. Rozkłady temperatury na powierzchni ukształtowanej odkuwki o grubości początkowej ścianki $g_0 = 7$ mm: a) wyznaczone podczas eksperymentu, b) wyznaczone MES

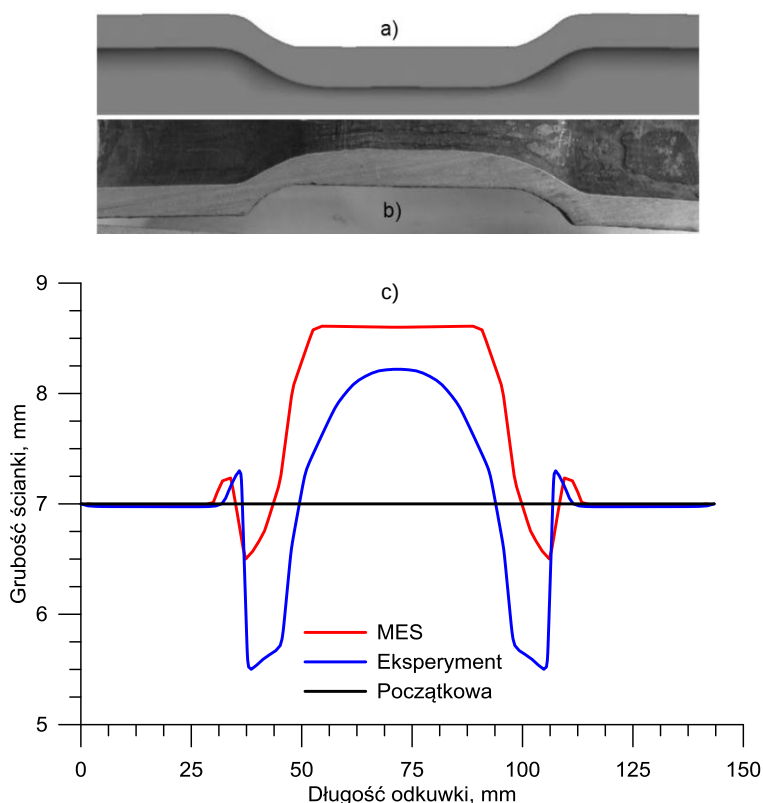
Szczegółowa analiza przekrojów osiowych ukształtowanych odkuwek ujawniła załamania powierzchni otworów (rys. 6.12). Zjawisko to zauważono dla elementów obciskanych z półfabrykatów o większych grubościach względnych ścianek ($g_0/D > 0,16$), zaś jego intensywność nasilała się wraz ze wzrostem grubości początkowej ścianki g_0 . Jak już wspomniano w poprzednim podrozdziale, tworzenie się załamów jest efektem plastycznego wyboczenia materiału pod działaniem ściskających naprężeń obwodowych (rys. 6.12). Podobnie, jak w przypadku odkuwek z obciskаныmi stopniami skrajnymi,

załamany się powierzchni otworu może być ograniczone między innymi w wyniku zastosowania trzpienia, który uniemożliwiałby wybaczanie się materiału.



Rys. 6.12. Załamanie powierzchni wewnętrznej otworu w drążonych odkuwkach z centralnym przewężeniem: a) przekroje osiowe ukształtowanych odkuwek, b) wyznaczony MES rozkład naprężeń obwodowych

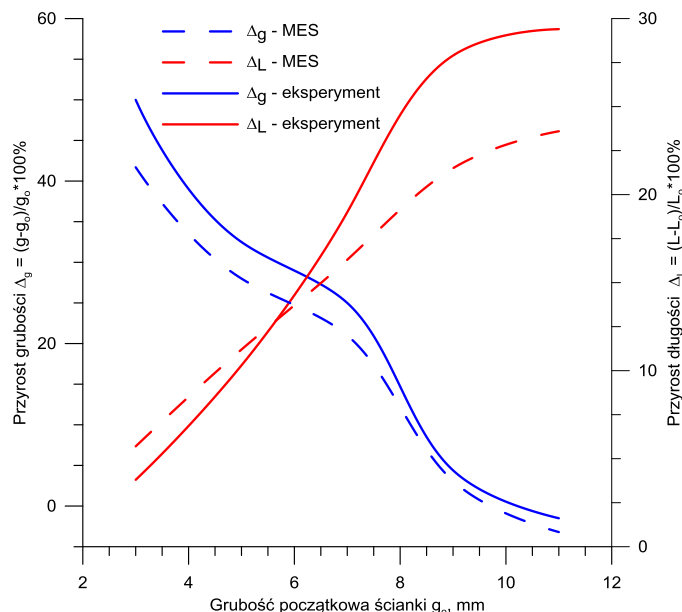
Analiza kształtu przekroji osiowych odkuwek, które wyznaczono podczas modelowania oraz prób eksperymentalnych wskazuje dobrą zgodność uzyskanych wyników, zarówno jakościową jak i ilościową. W obydwu przypadkach rozkład grubości ścianki ma podobny charakter (rys. 6.13). W strefie centralnej zredukowanego stopnia dochodzi do znacznego zwiększenia grubości ścianki, przy jednoczesnym pocienieniu ścianki w obszarach przejściowych. Niewielka rozbieżność wyników odnosi się do grubości ścianki w poszczególnych obszarach odkuwek. Wyniki MES wskazały większy przyrost grubości ścianki w strefie centralnej oraz mniejszy ubytek grubości w strefach przejściowych w stosunku do odkuwek ukształtowanych podczas eksperymentu. Zauważone różnice można tłumaczyć większym spadkiem temperatury w warstwach centralnych ścianki (trudnym do określenia w sposób doświadczalny). Większe wystudzenie objętościowe kształtowanej odkuwki utrudnia promieniowe płynięcie materiału, którego efektem jest właśnie wzrost grubości ścianki odkuwki.



Rys. 6.13. Zmiany grubości ścianki w odkuwce obciskanej z półfabrykatu o grubości początkowej $g_0 = 7$ mm, a) przekrój osiowy wyznaczony MES, b) przekrój osiowy ukształtowanej odkuwki, c) rozkłady grubości ścianki

Cechą charakterystyczną procesów obciskania obrotowego jest w większości przypadków przyrost, zarówno grubości ścianki, jak i długości odkuwek. Względny przyrost grubości ścianki kształtowanego przewężenia (odniesiony do grubości początkowej) zmniejsza się w miarę wzrostu grubości początkowej ścianki półfabrykatu (rys. 6.14), a nawet w przypadku obciskania półfabrykatu o największej grubości ścianki ($g_0 = 11$ mm) obserwuje się niewielki ubytek grubości ścianki zredukowanego stopnia odkuwki. Odwrotna tendencja występuje w przypadku zmiany długości ukształtowanych odkuwek. Zwiększenie początkowej grubości ścianki powoduje wzrost długości odkuwki. Wynika to bezpośrednio z różnic w oporze plastycznego płynięcia materiału, który uzależniony jest między innymi od grubości ścianki półfabrykatu. Pomijając wpływ temperatury, podczas kształtowania półfabrykatów z cienkimi ściankami opory płynięcia w kierunku promieniowym są znacznie mniejsze niż w kierunku osiowym, co powoduje intensywny wzrost grubości ścianki odkuwek. Przy

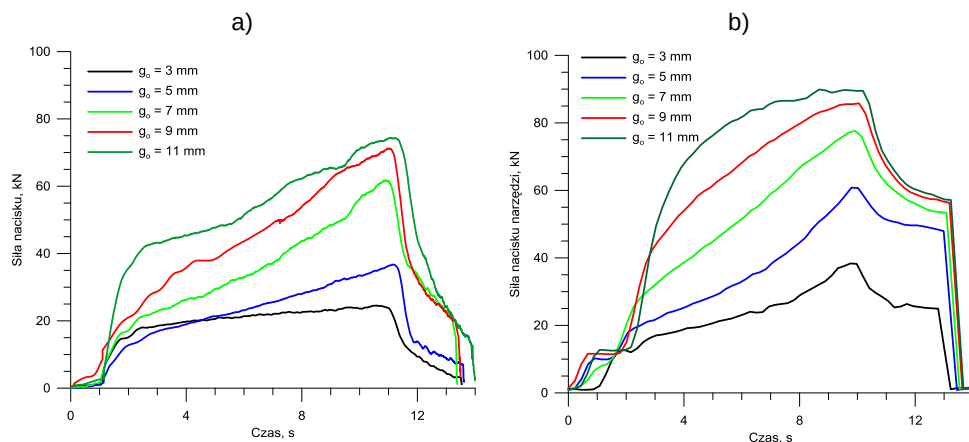
większych grubościach ścianek, materiał łatwiej płynie w kierunku osiowym, powodując intensywny wzrost długości odkuwki.



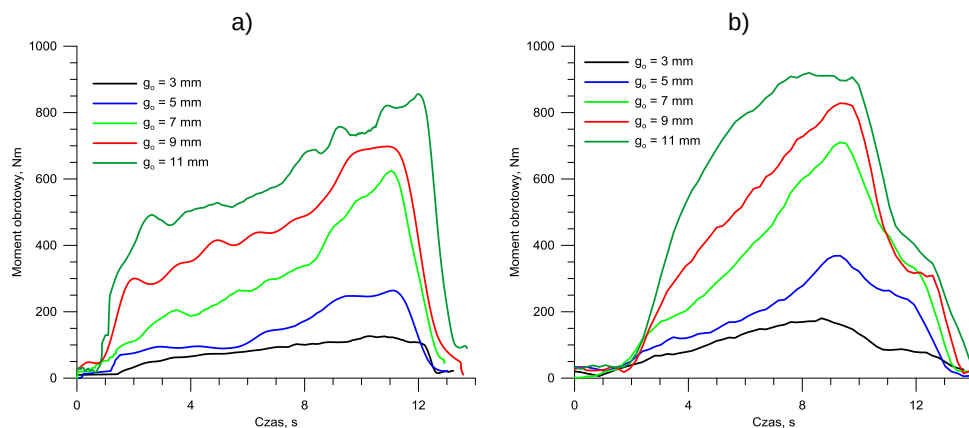
Rys. 6.14. Zmiany grubości ścianki oraz długości odkuwki wyznaczone MES oraz podczas eksperymentu

Wyznaczone w trakcie prowadzonych badań teoretyczno-doświadczalnych przebiegi parametrów siłowych przedstawiono na kolejnych rys. 6.15 oraz 6.16. Widoczne jest, że wraz ze wzrostem grubości ścianki wsadu, zwiększają się wartości siły nacisku narzędzi (rys. 6.15) oraz momentu obrotowego (rys. 6.16), zaś sam charakter zmiany parametrów siłowych we wszystkich analizowanych przypadkach jest zbliżony. Po początkowo szybkim wzroście sił i momentów podczas zagłębiania się narzędzi następuje spłaszczenie charakterystyk i łagodniejszy wzrost parametrów siłowych w ustalonej fazie kształtowania. W końcowym etapie procesu, w trakcie kalibrowania obserwuje się szybki spadek sił i momentów. Daje się jednak zauważyć różnice w sposobie przebiegu oraz wartościach sił i momentów uzyskanych MES oraz podczas eksperymentu. Charakterystyki eksperymentalne znacznie szybciej narastają w stosunku do rozkładów uzyskanych podczas modelowania MES. Również w trakcie prób doświadczalnych uzyskano większe wartości sił i momentów (zwłaszcza dla mniejszych grubości ścianki, gdzie różnice sięgają nawet kilkudziesięciu procent). Zauważone różnice mogą być spowodowane szybszym studzieniem materiału w czasie prób doświadczalnych w stosunku do przyjętego modelu numerycznego. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia mogą być znacznie mniejsze różnice w wartościach parametrów siłowych otrzymanych podczas kształtowania

odkuwek o większych grubościach ścianki. Z uwagi na większą pojemność cieplną półfabrykatów, temperatura kształtowanych odkuwek pozostaje stosunkowo wysoka, zapewniając dobrą plastyczność materiału.



Rys. 6.15. Przebiegi siły nacisku podczas obciskania drążonych odkuwek z centralnym przewężeniem z półfabrykatów o różnych grubościach początkowych ścianki g_0 : a) wyznaczone MES, b) zmierzone podczas eksperymentu



Rys. 6.16. Przebiegi momentu obrotowego podczas obciskania drążonych odkuwek z centralnym przewężeniem z półfabrykatów o różnych grubościach początkowych ścianki g_0 : a) wyznaczone MES, b) zmierzone podczas eksperymentu

Zestawienie wyników z symulacji MES z wynikami doświadczalnymi wskazuje na ich dobrą zgodność jakościową. Ilościowe rozbieżności dotyczą głównie wartości parametrów siłowych oraz zmian grubości ścianek i długości odkuwek. Przyczyną zauważonych różnic są trudności w dokładnym odwzorowaniu rzeczywistych warunków procesu w opracowanych modelach numerycznych. Wynikają one również z przyjętych uproszczeń, które z jednej

strony podnoszą wydajność obliczeń, zaś z drugiej wpływają na dokładność uzyskanych wyników.

Pomimo zaobserwowanych różnic, jakość uzyskanych wyników można uznać za zadowalającą. Potwierdza to zasadność stosowania technik numerycznych do analizy procesów plastycznego kształtowania metali i ich stopów. Należy jednak zaznaczyć, że nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie prób doświadczalnych, które w wielu przypadkach doprecyzowują wyniki modelowania numerycznego, dając pełny obraz na temat przebiegu procesu technologicznego.

7. Przykłady zastosowania technologii obciskania obrotowego

Głównym przeznaczeniem technologii obciskania obrotowego jest kształtowanie niezbyt długich odkuwek drążonych wałków stopniowanych z półfabrykatów rurowych. Dlatego też pełnym potwierdzeniem możliwości technologicznych proponowanej metody wytwarzania jest ukształtowanie serii drążonych odkuwek z zastosowaniem materiałów rzeczywistych. Z uwagi na nowatorski charakter technologii, badania przeprowadzono w oparciu o własnej konstrukcji agregat do obciskania obrotowego, zainstalowany w Politechnice Lubelskiej. Założono przy tym, że zostaną ukształtowane odkuwki, które charakteryzują się zróżnicowaną wartością gniotu oraz różną geometrią obciskanych stopni (walcowy, stożkowy, kulisty). Ponadto w trakcie kształtowania elementów drążonych zachowano warunki zbliżone do przemysłowych.

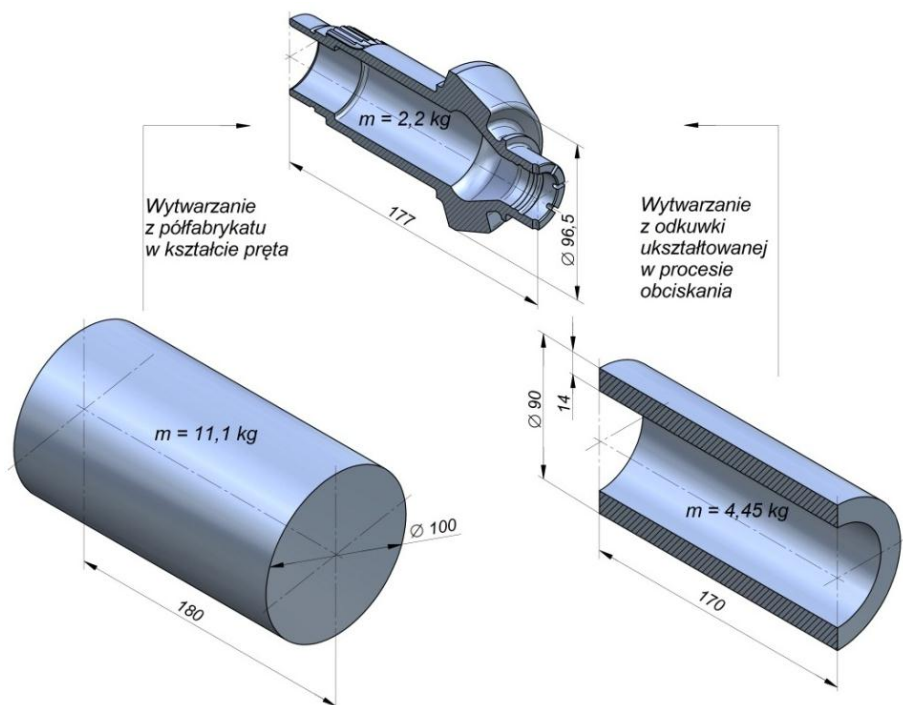
Dotychczas prezentowane wyniki badań dotyczyły w większości przypadków kształtowania prostych elementów (elementarne wałki drążone z dwoma skrajnymi lub jednym centralnym przewężeniem). W przypadku wałków wielostopniowych, których geometria jest bardziej złożona, procesy ich obciskania będą przebiegały przy odmiennej kinematyce płynięcia materiału. W celu zobrazowania zjawisk zachodzących podczas procesu kształtowania wyniki eksperymentu zestawiono z danymi, uzyskanymi podczas obliczeń numerycznych.

7.1. Kształtowanie odkuwki stopniowanego wałka drążonego

Przykładem kształtowania odkuwki drążonego wałka stopniowanego, jest wałek stosowany w układzie napędowym (przekładni głównej) jednego ze śmigłowców. Obecnie wałek wytwarzany jest metodami obróbki ubytkowej z półfabrykatów w kształcie pręta, co wiąże się z dużymi stratami materiałów i energii. W związku z tym zaproponowano zmianę technologii wytwarzania, która polegała na zastąpieniu pełnego wsadu półfabrykatem w postaci drążonej odkuwki, kształtowanej w procesie obciskania obrotowego (rys. 7.1). Zastosowanie odkuwek drążonych w miejsce półfabrykatów pełnych pozwoli na ponad dwukrotne zmniejszenie zużycia materiałów oraz obniżenie nakładów robocizny, a w konsekwencji na obniżenie kosztów jednostkowych wyrobu.

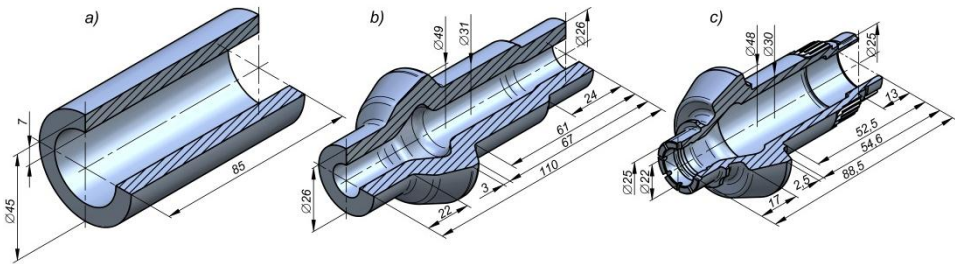
Ze względu na ograniczone wymiary przestrzeni roboczej agregatu próby kształtowania odkuwek wałka wykonano w skali 1:2. Zaprojektowany kształt

odkuwki wałka napędowego pokazano na rys. 7.2. Przyjęto, że odkuwka będzie obciskana z półfabrykatu w kształcie odcinka rury handlowej (rys. 7.2a).

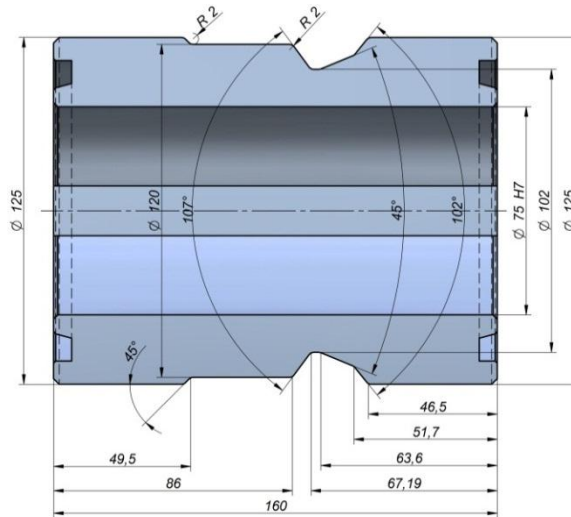


Rys. 7.1. Zużycie materiału w procesie wytwarzania wałka napędowego przekładni śmigłowca z półfabrykatu pełnego oraz drążonego

Parametry geometryczne wałka powodują, że proces realizowany jest z różnymi wartościami stopnia gniotu δ w poszczególnych obszarach odkuwki. Z maksymalną wartością stopnia gniotu $\delta = 1,73$ kształtowane są skrajne czopy odkuwki, zaś w obszarze centralnego, stożkowego stopnia, stopień gniotu przyjmuje wartości mniejsze od jedności $\delta = 0,92$, co oznacza, że w tym obszarze dochodzi do wzrostu średnicy odkuwki w stosunku do wymiarów wsadu wskutek spęcznienia materiału. Cechą charakterystyczną procesu obciskania obrotowego jest stopniowe odwzorowywanie kształtu narzędzi na półfabrykacie. Dlatego też tworząca walców powinna być zgodna z zarysem kształtowanych odkuwek w stanie gorącym. Jeden z segmentów narzędziowych, który zaprojektowano na potrzeby badań przedstawiono na rys. 7.3.



Rys. 7.2. Kształt i wymiary a) wsadu rurowego, b) drążonej odkuwki wałka napędowego, c) drążonego wałka napędowego (w skali 1:2) [89]

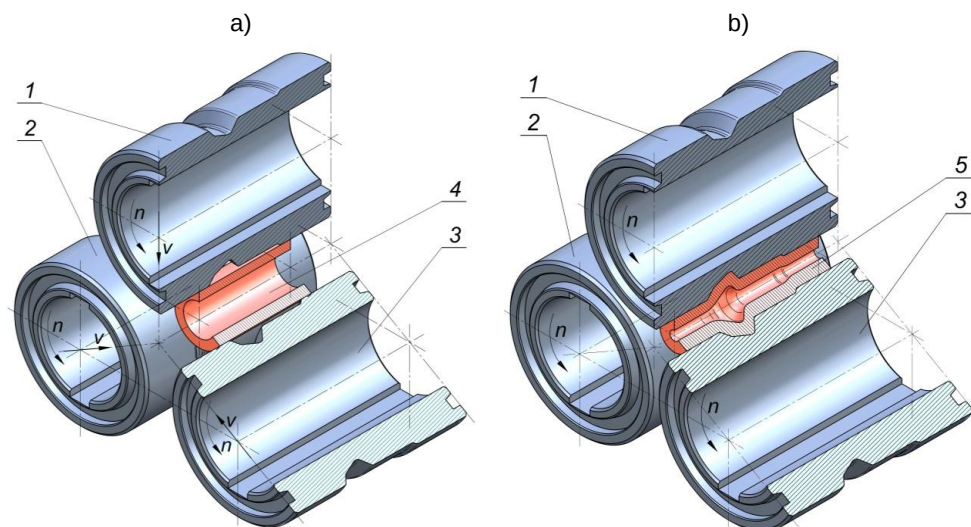


Rys. 7.3. Konstrukcja dzielonego segmentu narzędziowego do obciskania odkuwek wałka napędowego

7.1.1. Modelowanie numeryczne obciążenia obrotowego drążonej odkuwki stopniowanego wałka napędowego

W oparciu o metody numeryczne dokonano oceny możliwości technologicznych kształtowania drążonych odkuwek stopniowanych wałków w procesie obciskania obrotowego. Określono również zakres parametrów technologicznych, przy których możliwe jest stabilne prowadzenie procesu kształtowania. Model geometryczny procesu obciskania odkuwki wałka, który wykorzystano w obliczeniach MES pokazano na rys. 7.4. W skład modelu wchodzi trzy jednakowe narzędzia (1, 2, 3) oraz wsad (4). Przyjęte prędkości obrotowe narzędzi wynikały z możliwości technologicznych maszyny i wynosiły $n = 36$ obr/min, prędkość postępową narzędzi w kierunku osi wsadu przyjęto równą $v = 3,5$ mm/s ($v/n = 5,8$ mm/obr). Wsad stanowi rura stalowa w gatunku 42CrMo4 (40HM) o średnicy zewnętrznej $\varnothing 45$ mm, grubości ścianki $g_o = 7$ mm i długości $L_o = 85$ mm. Wsad opisano elementami ośmiowęzłowymi, zaś model

materiałowy stali 42CrMo4 zaczerpnięto z bazy danych oprogramowania Simufact Forming.

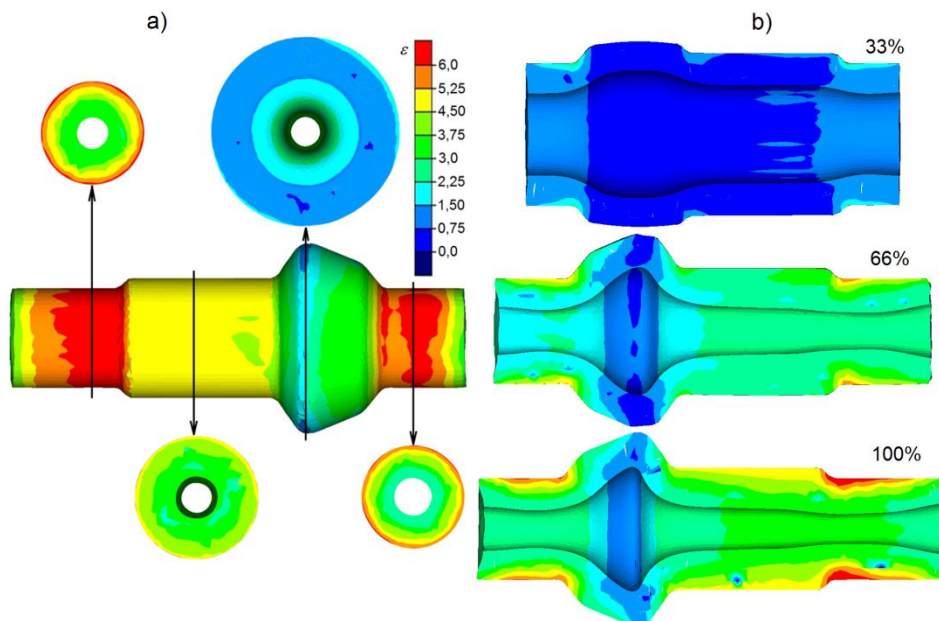


Rys. 7.4. Schemat procesu obciskania obrotowego drążonej odkuwki wałka stopniowanego, według którego realizowano badania: a) początek procesu, b) koniec procesu

Temperaturę początkową wsadu przyjęto równą 1150 °C (jednakową w całej objętości), zaś temperatura narzędzi w trakcie procesu była stała i wynosiła 80°C. Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach to: czynnik tarcia $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem, a narzędziem – 25 kW/m²K oraz między materiałem, a otoczeniem – 0,3 kW/m²K.

Wyznaczony MES kształt drążonej odkuwki wałka stopniowanego wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia na powierzchni oraz w przekrojach poprzecznych kolejnych stopni pokazano na rys. 7.5a. Kształt otrzymanej odkuwki jest poprawny, zgodny z zakładanym na etapie projektowania. Również zarysy przekrojów poprzecznych poszczególnych stopni wyrobu (zarówno w obszarze ścianki zewnętrznej, jak i wewnętrznej) nie wykazują nadmiernej owalizacji. Duży wpływ na przebieg procesu technologicznego oraz ostateczny kształt wyrobu ma kinematyka ruchu narzędzi i wsadu. W trakcie procesu obciskania obracające się w tym samym kierunku narzędzia wprawiają materiał wsadowy w ruch obrotowy. Rotacyjny ruch półfabrykatu powoduje, że zginięcie materiału zachodzi stopniowo, jednocześnie w trzech obszarach rozmieszczonych co 120° na obwodzie kształtowanej odkuwki. Taki charakter odkształcania sprzyja poprawie stabilności procesu oraz powoduje obniżenie sił kształtowania w stosunku do innych technologii. W pierwszej kolejności

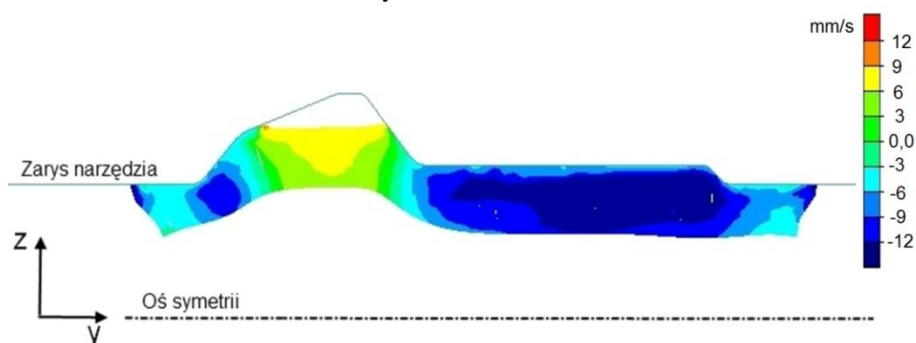
narzędzia kształtują skrajne czopy wałka, czemu towarzyszy intensywne płynięcie metalu zarówno w kierunku promieniowym, jak i osiowym (rys. 7.5b).



Rys. 7.5. Wyznaczony MES rozkład intensywności odkształcenia: a) w ukształtowanej odkuwce wałka drążonego, b) w kolejnych etapach kształtowania

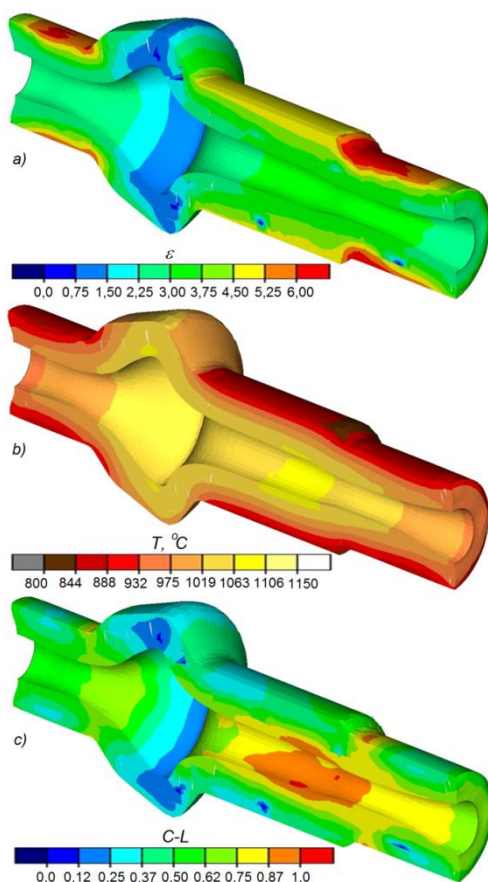
Efektom tego jest nierównomierny wzrost grubości ścianki oraz długości skrajnych czopów odkuwki. W kolejnych etapach zginiatane są jednocześnie wszystkie stopnie wałka, aż do uzyskania zakładanej wartości redukcji zewnętrznych średnic półfabrykatu. W ostatnim etapie procesu narzędzia jedynie kalibrują kształt odkuwki. Analizując kinematykę płynięcia materiału można zauważyć, że skrajne stopnie odkuwki wałka powstają w wyniku promieniowego oraz osiowego płynięcia materiału, co jest typowe dla obciskania elementarnych wałków. Następnie w strefie stopnia centralnego materiał przemieszczany jest głównie promieniowo w kierunku osi odkuwki, czemu towarzyszy intensywny wzrost grubości ścianki. W obszarze stopnia stożkowego (o największej średnicy) dochodzi do spęczniania materiału. W rezultacie następuje zwiększenie średnicy odkuwki w stosunku do średnicy początkowej wsadu (rys. 7.6). Obszary odkuwki, w których prędkość płynięcia materiału przyjmuje wartości ujemne przemieszczają się zgodnie z ruchem narzędzi tj. przeciwnie do zwrotu osi Z (powodując redukcję średnicy zewnętrznej i wzrost grubości ścianki). W obszarze stożkowego stopnia odkuwki materiał płynie w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu narzędzi powodując tym samym zwiększanie jego średnicy zewnętrznej. Taka kinematyka płynięcia materiału (w dwóch wzajemnie

przeciwnych kierunkach) pozwala kształtować odkuwki ze stopniami o większych średnicach w stosunku do średnicy wsadu.



Rys. 7.6. Rozkład prędkości płynięcia materiału w kierunku ruchu postępowego narzędzia

Analiza rozkładów odkształceń (rys. 7.5 oraz rys. 7.7a) wskazuje, że materiał nie został przerobiony plastycznie równomiernie w całej objętości. Rozkład odkształceń w przekrojach poprzecznych mają charakter pierścieniowy, który jest efektem generowania odkształceń zbędnych (w kierunku obwodowym). Dodatkowo zjawisko to potęguje różna wartość stopnia gniotu, z którym kształtowane są kolejne obszary odkuwki. W rezultacie prędkości obwodowe poszczególnych stref odkuwki są różne i prowadzą do skręcania osiowego odkuwki oraz poślizgów pomiędzy kształtowanym materiałem, a narzędziami (generującymi odkształcenia w kierunku obwodowym). Zatem w obszarach przypowierzchniowych materiał podlega zdecydowanie większym odkształceniom w stosunku do stref centralnych. Ponadto maksymalne wartości odkształceń zlokalizowane są w obszarach odkuwki, które podlegają największej redukcji przekroju poprzecznego (rys. 7.7a). Niewielka prędkość postępową narzędzi i stosunkowo mała grubość ścianki półfabrykatu mają wpływ na parametry termiczne w końcowym etapie kształtowania. Cechą charakterystyczną wyznaczonego MES rozkładu temperatury (rys. 7.7b) jest niejednorodny i dość duży spadek temperatury w ukształtowanym półfabrykacie (do około 800 °C).



Rys. 7.7. Wyznaczone MES rozkłady: a) intensywności odkształcenia, b) temperatury, c) kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama [89]

Jest to informacja szczególnie istotna ze względu na stosunkowo długi czas trwania procesu (około 11 s) oraz niewielką pojemność cieplną półfabrykatu. Zaobserwowane spadki temperatury związane są przede wszystkim z oddawaniem ciepła do narzędzi i występują w okolicach zewnętrznej powierzchni kształtowanego półfabrykatu, gdzie materiał przez cały czas trwania procesu cyklicznie styka się ze znacznie chłodniejszymi walcami. W trakcie prowadzonych obliczeń prognozowano również możliwość powstawania pęknięć w obciskanej odkuwce. W tym celu wykorzystano znormalizowane kryterium według Cockrofta-Lathama, którego rozkłady pokazano na rys. 7.7c. Uzyskane wyniki wskazują na niebezpieczeństwo pęknięcia materiału w obszarze przypowierzchniowym otworu (w strefie centralnego stopnia). Wartość całki Cockrofta-Lathama w tym miejscu jest dość duża (około 1). W przypadku prostych schematów odkształcenia przy tych wartościach stałej Cockrofta-Lathama mogą pojawiać się już pierwsze pęknięcia materiału. Największe

wartości kryterium występują w warstwach przypowierzchniowych, które stanowią naddatek technologiczny, usuwany podczas obróbki wykańczającej.

7.1.2. Próby doświadczalne obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka stopniowanego

Trzy komplety dzielonych segmentów narzędziowych, które zamontowano na wałach głównych klatki roboczej agregatu pokazano na rys. 7.8.

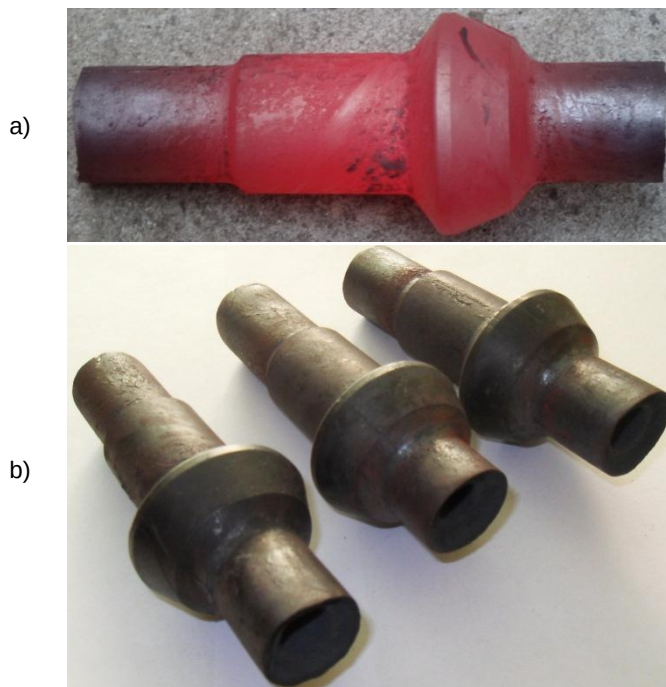


Rys. 7.8. Segmenty narzędziowe wykorzystane do obciskania drążonych odkuwek wałków napędowych

Półfabrykaty, zgodnie z wymiarami przyjętymi podczas obliczeń, po nagraniu w piecu komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około 1150 °C, wprowadzano do przestrzeni roboczej agregatu (utworzonej przez trzy obracające się walce). Następnie uruchamiano ruch postępowy walców, które wprowadzały wsad w ruch obrotowy i redukowały średnice kolejnych stopni odkuwki. Po przebyciu przez suwaki drogi odpowiadającej wymaganej redukcji średnicy (w tym przypadku $\Delta h = 9,5$ mm), następowało wyłączenie ruchu postępowego i kalibrowanie kształtu odkuwki podczas dalszego obrotu walców (przez czas około 3 s.). Następnie narzędzia rozsuwały się promieniowo, a ukształtowana odkuvka usuwana była z przestrzeni roboczej urządzenia. W trakcie eksperymentu przyjęto takie same parametry kinematyczne procesu, przy których prowadzono obliczenia ($n = 36$ obr/min, $v = 3,5$ mm/s).

Ukształtowane odkuwki studzono swobodnie w stojącym powietrzu (rys. 7.9), po czym poddano je oględzinom, celem wykrycia ewentualnych wad. W trakcie prób analizowano kolejne fazy procesu pod kątem pojawienia się ewentualnych zjawisk zakłócających jego stabilny przebieg (poślizg, deformacja przekroju poprzecznego, zgniecenie ścianki, rozdzielenie materiału). Nie stwierdzono występowania tego typu ograniczeń. Wstępne oględziny obciskanych odkuwek nie wykazały występowania wad, które dyskwalifikowałyby tak ukształtowane elementy z dalszego procesu produkcyjnego (mechaniczna obróbka wykańczająca). Powierzchnia odkuwek była gładka i wolna od zgorzeliny, która

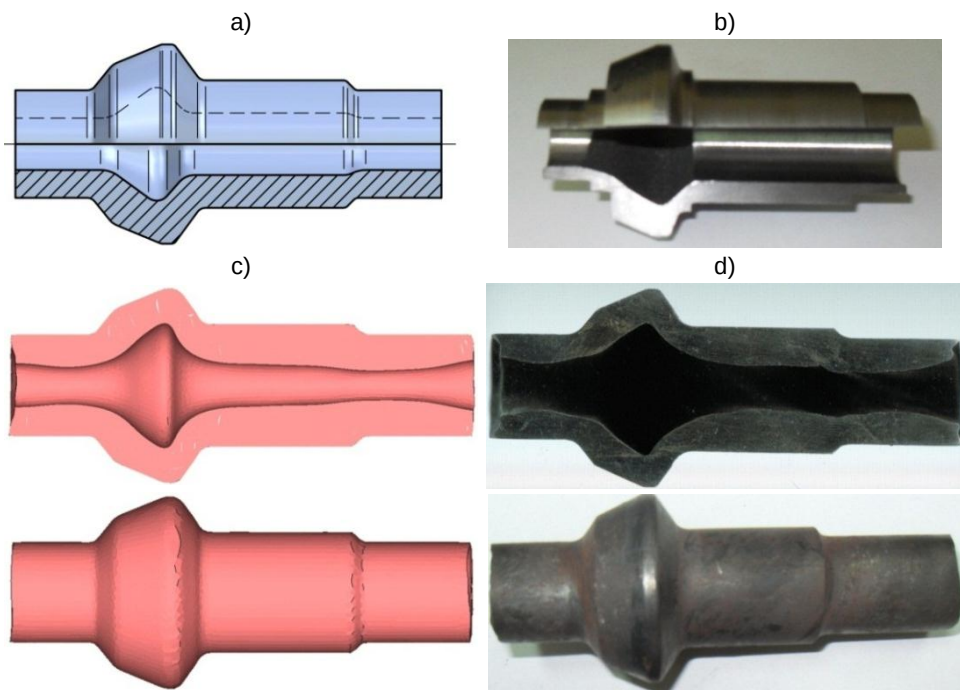
w czasie procesu samoczynnie usuwana była przez narzędzia i opadała na płytę dolną agregatu.



Rys. 7.9. Odkuwki ukształtowane podczas prób doświadczalnych obciskania obrotowego:
a) odkuwka w stanie gorącym bezpośrednio po obciskaniu, b) ostudzone w powietrzu
odkuwki wałka stopniowanego

7.1.3. Analiza wyników badań teoretyczno-doświadczalnych obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka stopniowanego

Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych (w zakresie kształtu i wymiarów obciskanych odkuwek) pozostawały w dobrej zgodności z założeniami teoretycznymi (kształtem odkuwki opracowanym na etapie projektowania) oraz wynikami prowadzonych symulacji numerycznych. Nie zauważono również pęknięć wewnętrznych. Na tej podstawie jednoznacznie stwierdzono, że możliwe jest kształtowanie drążonych odkuwek stopniowanych wałków technologią obciskania obrotowego z wykorzystaniem wsadu rurowego. Drążoną odkuwkę wałka, uzyskaną w trakcie modelowania numerycznego oraz prób obciskania wraz z gotowym elementem, wykonanym z ukształtowanego półfabrykatu pokazano na rys. 7.10. Cechą charakterystyczną obciśniętego półfabrykatu jest duża dokładność zarówno wymiarowa, jak i geometryczna. Pozostawione nadatki technologiczne (około 1 mm na średnicach zewnętrznych) w zupełności wystarczają, aby po ich usunięciu uzyskać wyrób zgodny z rysunkiem konstrukcyjnym (rys. 7.10c).

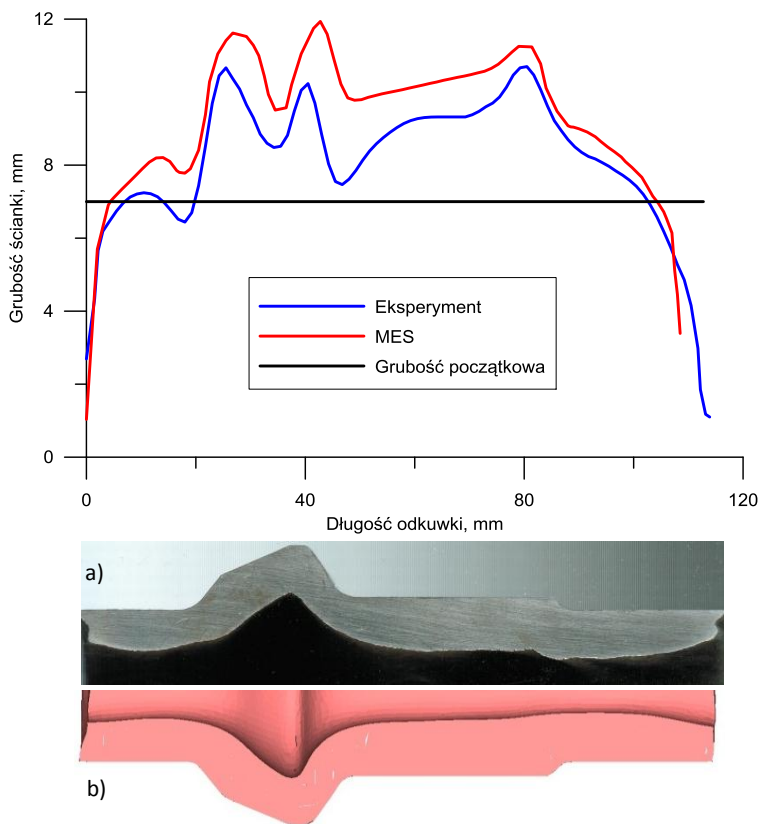


Rys. 7.10. Kształt drążonej odkuwki wałka stopniowanego: a) zakładany, b) wałek drążony wykonany z ukształtowanej odkuwki, c) wyznaczony MES, d) uzyskany podczas eksperymentu

Podczas kształtowania odkuwki dochodzi do intensywnego wydłużenia skrajnych czopów. W rezultacie obserwuje się znaczne wydłużenie odkuwki w stosunku do długości początkowej wsadu i tym samym zwiększenie nadadków technologicznych na długości skrajnych stopni. Wydłużenie skrajnych czopów odkuwki można zmniejszyć poprzez wykorzystanie krótszego wsadu lub zastosowanie dodatkowych kołnierzy na walcach, które zamykałyby materiał w wykroju narzędzi i tym samym ograniczały jego osiowe przemieszczanie.

Na kolejnym rys. 7.11 zestawiono rozkłady grubości ścianek ukształtowanej odkuwki podczas prób doświadczalnych oraz wyznaczonej numerycznie MES. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że podczas obciskania odkuwki dochodzi do zmiany grubości ścianki, która jest efektem promieniowego oraz osiowego płynięcia materiału. Dominującym zjawiskiem jest zwiększenie grubości ścianki, które jest korzystne, gdyż pozwala podnieść parametry wytrzymałościowe elementu, zwiększa również nadatek technologiczny w tym obszarze odkuwki, w którym mogą powstawać ewentualne pęknięcia powierzchniowe materiału. W rezultacie po usunięciu nadadku finalny element będzie wolny od jakichkolwiek wad. Zaobserwowany wzrost grubości ścianki nie jest jednak jednorodny na całej długości kształtowanych stopni. Najbardziej

zwiększyła się grubość ścianek centralnych stopni odkuwki, które podczas kształtowania ograniczone są pierścieniowymi powierzchniami narzędzi.

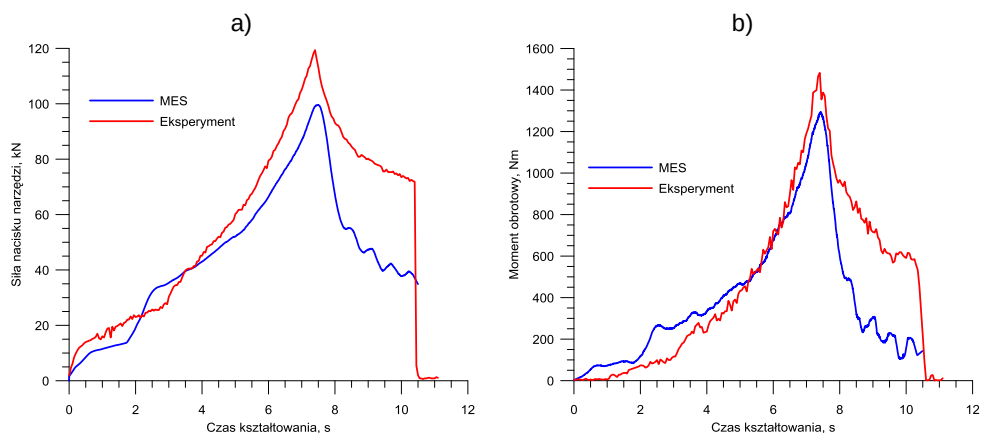


Rys. 7.11. Rozkłady zmiany grubości ścianek odkuwki: a) uzyskanej w trakcie eksperymentu, b) wyznaczonej MES [89]

W rezultacie materiał przemieszcza się przede wszystkim promieniowo w kierunku osi wyrobu. Nieco inny charakter mają rozkłady grubości w obszarze czopów skrajnych odkuwki, gdzie obserwuje się stopniowe zmniejszanie grubości ścianki w kierunku powierzchni czołowych, będące efektem osiowego płynięcia materiału w tych strefach. Analizując charakter zmian grubości ścianek odkuwki ukształtowanej podczas eksperymentu oraz wyznaczonej MES można zauważyć dużą zgodność w wyznaczonych rozkładach (rys. 7.11). Zmiany grubości ścianek występują w tych samych obszarach odkuwki. Zasadnicza różnica między eksperymentem, a obliczeniami związana jest z wartościami przyrostów grubości ścianek. Przyrost grubości ścianki w odkuwce wyznaczonej numerycznie jest większy o 15% w stosunku do półfabrykatu ukształtowanego podczas prób doświadczalnych. Zauważone różnice mogą być spowodowane szybszym studzeniem materiału w czasie prób doświadczalnych w stosunku do

przyjętego modelu numerycznego. Nadmierne wystudzenie półfabrykatu powoduje wzrost oporów plastycznego płynięcia metalu w kierunku promieniowym i w rezultacie mniejszy przyrost grubości ścianki.

Wyznaczone w trakcie prowadzonych badań (numerycznych i eksperymentalnych) parametry siłowe procesu obciskania obrotowego pokazano na rys. 7.12. Cechą charakterystyczną uzyskanych przebiegów jest duża zbieżność wyników eksperymentalnych i numerycznych, zarówno jakościowych, jak i ilościowych. Podobnie, jak podczas kształtowania odkuwek elementarnych wałków, przebiegi oraz wartości sił i momentów obrotowych uzależnione są od stopnia zaawansowania procesu. Wraz ze zwiększaniem się redukcji średnicy zewnętrznej wsadu następuje wzrost sił i momentów, które maksymalne wartości przyjmują w końcowej fazie kształtowania. W ostatnim etapie – podczas kalibrowania zauważalny jest szybki spadek wartości sił i momentów.



Rys. 7.12. Wyznaczone w trakcie badań przebiegi parametrów siłowych: a) sił nacisku narzędzi, b) momentów obrotowych

Pomimo dużej zbieżności rozkładów parametrów siłowych (wyznaczonych MES oraz podczas eksperymentu) zaobserwowano wyższe wartości eksperymentalne sił i momentów (w końcowym etapie kształtowania oraz podczas kalibrowania). Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenie o szybszym studzeniu materiału w czasie prób doświadczalnych w stosunku do przyjętego modelu numerycznego.

7.1.4. Próby doświadczalne obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka wielostopniowego ze stopów metali nieżelaznych

W oparciu o wykonany zestaw segmentów narzędziowych przeprowadzono próby obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałka stopniowanego ze stopów metali nieżelaznych (stopów aluminium i tytanu), które obecnie znajdują coraz szersze zastosowanie jako materiały w budowie maszyn. Głównym celem

badan było potwierdzenie możliwości technologicznych obciskania obrotowego znacznie szerszej grupy materiałów niż stal.

Kształtowanie drażzonych odkuwek wałka stopniowanego ze stopów aluminium

Proces obciskania obrotowego drażzonych odkuwek ze stopów aluminium zrealizowano z wykorzystaniem półfabrykatów w kształcie grubościennych tulei w gatunku 2618A o średnicy zewnętrznej $\varnothing 45$ mm, grubości ścianki $g_o = 8$ mm i długości $L_o = 85$ mm. Półfabrykaty nagrzewano do temperatury około 480°C , a następnie prowadzono obciskanie w przestrzeni roboczej agregatu z prędkością postępową narzędzi $v = 2,5$ mm/s ($v/n = 4,2$ mm/obr).

Kształtowanie odkuwek według przedstawionego schematu było trudne do zrealizowania z uwagi na intensywne studzenie półfabrykatu podczas procesu. W wyniku nadmiernego spadku temperatury w końcowym etapie obciskania dochodziło do silnej owalizacji przekroju poprzecznego i deformacji odkuwki, co dyskwalifikowało tak ukształtowany półfabrykat (rys. 7.13).



Rys. 7.13. Zdeformowane w wyniku silnej owalizacji podczas obciskania obrotowego odkuwki ze stopu aluminium 2618A

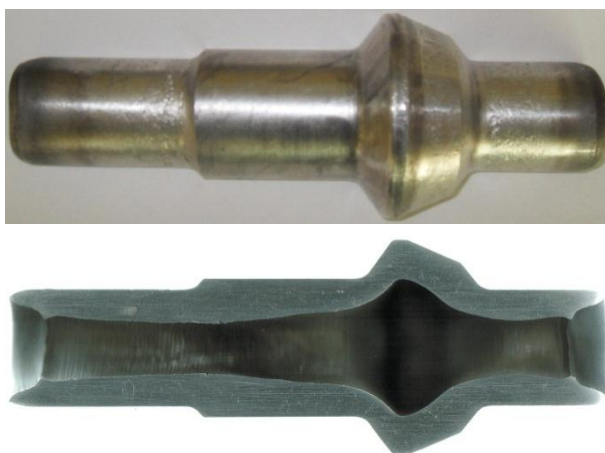
W celu wyeliminowania niekorzystnego wpływu nadmiernego spadku temperatury przyjęto dwuetapowy proces kształtowania z dogrzewaniem półfabrykatu. Wymaganą do ukształtowania odkuwki wartość stopnia gniotu czopów skrajnych $\delta = D/d$ podzielono na dwa etapy, przyjmując, że w pierwszym etapie $\delta_1 = 1,4$, zaś w drugim etapie $\delta_2 = 1,23$. W rezultacie tak prowadzonego procesu uzyskano elementy o zakładanej geometrii i jakości. Półfabrykat ukształtowany w pierwszym etapie obciskania pokazano na rys. 7.14. Wstępnie ukształtowane półfabrykaty po dogrzeniu w piecu komorowym poddawano dalszemu kształtowaniu (drugi etap obciskania), aż do uzyskania zakładanej redukcji średnicy. Ukształtowane w ten sposób drażone odkuwki wałków wielostopniowych ze stopu aluminium 2618A pokazano na rys. 7.15. Kształt uzyskanych odkuwek jest poprawny, a wymiary mieszczą się zakładanym polu

tolerancji. W stosunku do odkuwek stalowych widoczne są dużo większe długości czopów skrajnych (nieograniczonych przez kołnierze narzędzi).



Rys. 7.14. Ukształtowana przedkuwka wałka drążonego ze stopu aluminium po pierwszym etapie obciskania obrotowego

W tych strefach obserwuje się intensywne płynięcie metalu w warstwach powierzchniowych, czego efektem jest utworzenie bardzo dużych wklęsłych powierzchni czołowych (tzw. lei). Należy jednak zaznaczyć, że zniekształcone powierzchnie czołowe odkuwki znajdują się w obszarze naddatków technologicznych i nie wpływają na jakość wyrobów. Tym samym można stwierdzić, że technologia obciskania obrotowego może być stosowana do kształtowania drążonych odkuwek wałków stopniowanych ze stopów aluminium.

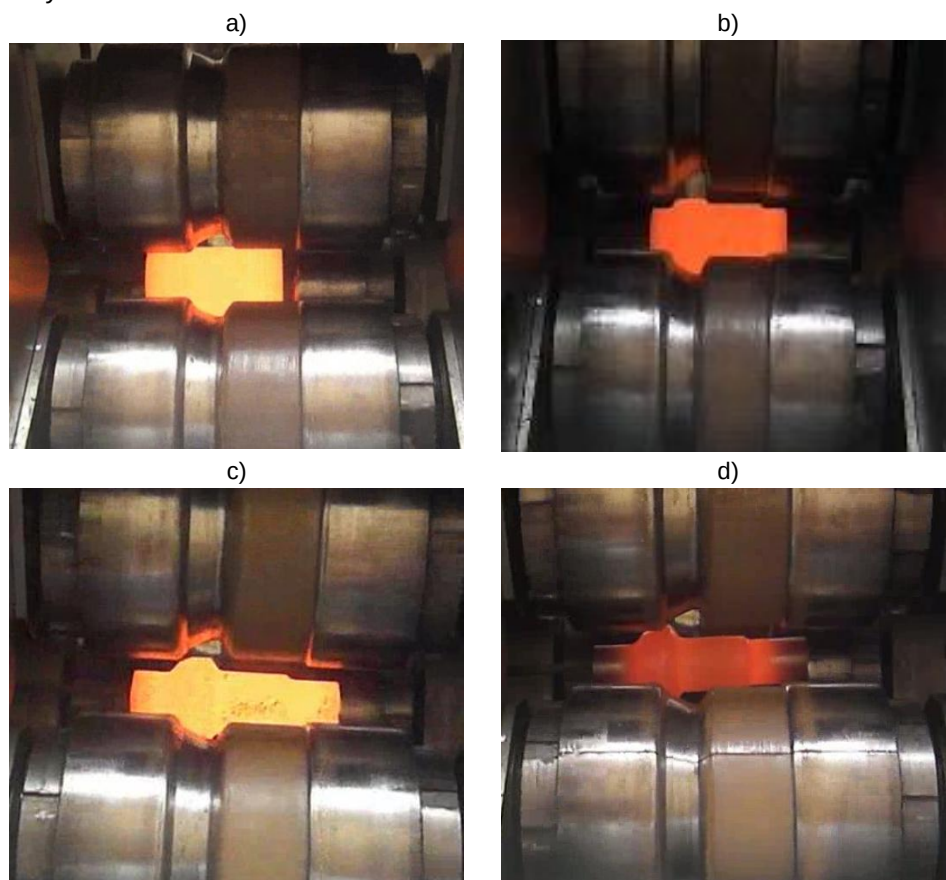


Rys. 7.15. Odkuwki wałka drążonego ze stopu aluminium 2618A ukształtowane w drugim etapie obciskania obrotowego

Kształtowanie drążonych odkuwek wałka stopniowanego ze stopów tytanu

Do prób obciskania zastosowano półfabrykaty w kształcie tulei ze stopu tytanu w gatunku Ti6Al4V. Wymiary wsadów przyjęto identyczne jak dla stopów aluminium (średnica zewnętrzna $\varnothing 45$ mm, grubość ścianki $g_o = 8$ mm i długości $L_o = 85$ mm). Z uwagi na bardzo wąski zakres temperatur obróbki plastycznej na gorąco stopów tytanu, proces obciskania został podzielony na trzy etapy. Wsad

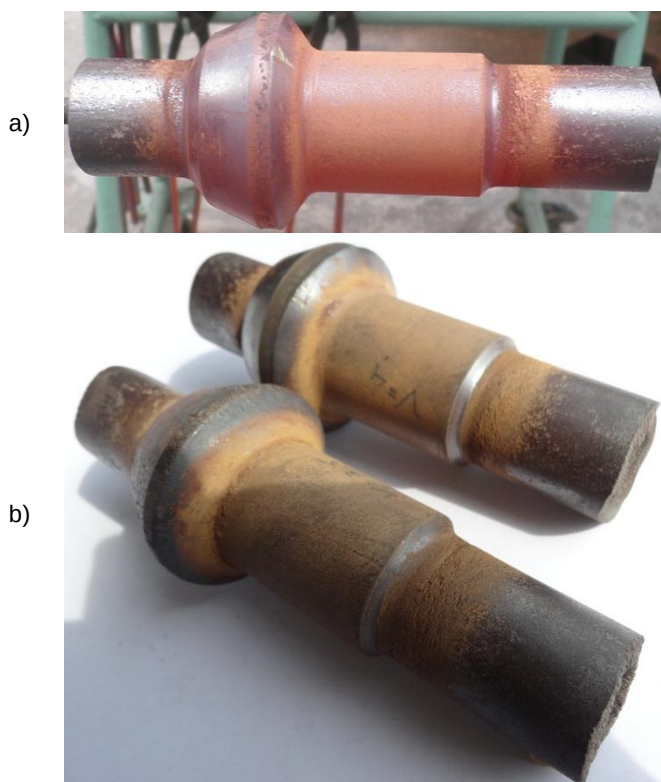
przed procesem obciskania nagrzewany był w piecu komorowym (bez atmosfery ochronnej) do temperatury 960 °C, po czym obciskano przedkulkę ze stopniem gniotu $\delta_1 = 1,2$. Następnie półfabrykat dogrzewano do temperatury 960 °C i ponownie kształtowano między walcami agregatu. Po trzecim etapie uzyskiwano wymaganą wartość $\delta = 1,73$, po czym studzono ukształtowane odkuwki w stojącym powietrzu. Kolejne etapy obciskania odkuwki pokazano na rys. 7.16, a ukształtowane w ten sposób półwyroby stopniowanych wałków pokazano na rys. 7.17.



Rys. 7.16. Kolejne etapy kształtowania odkuwki wałka stopniowanego ze stopu tytanu: a) wsad umieszczony w przestrzeni roboczej agregatu, b) koniec I etapu, c) koniec II etapu, d) koniec III etapu [96]

Analiza kształtu odkuwek wykazała niecałkowite wypełnienie wykroi narzędzi. Niewypełnienie to przejawia się wklęsłą powierzchnią na stożkowym stopniu odkuwki. Nie należy jednak traktować tej wady jako wykluczającej dalszą przydatność uzyskanego półwyrobu. Wynikające z niewypełnienia zarysu odkuwki zmniejszenie średnicy mieści się w granicach przyjętego naddatku technologicznego na obróbkę wykańczającą. Oprócz niewielkiego niewypełniania

zarysu stożkowego stopnia nie zaobserwowano (nieuzbrojonym okiem) żadnych wad, które wykluczałyby dalsze wykorzystanie tak ukształtowanych odkuwek. W porównaniu do półfabrykatów obciskanych ze stali oraz ze stopów aluminium, odkuwki ze stopu tytanu charakteryzują się znacznie mniejszym wydłużeniem skrajnych stopni. Obserwuje się przy tym intensywny przyrost grubości ścianki. Taki charakter płynięcia materiału wynika z właściwości termicznych stopów tytanu, które charakteryzują się niskim współczynnikiem przewodności cieplnej.



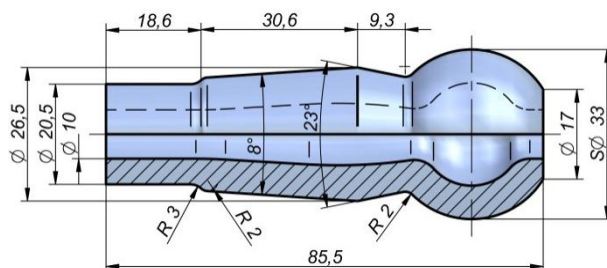
Rys. 7.17. *Drążone odkuwki stopniowanego wałka ze stopu tytanu uzyskana w badaniach doświadczalnych: a) bezpośrednio po procesie obciskania, b) po ostudzeniu*

W rezultacie, powierzchniowe spadki temperatury, wywołane kontaktem materiału z narzędziami nie są na bieżąco rekompensowane ciepłem przekazywanym z warstw centralnych, gdzie utrzymuje się wysoka wartość temperatury. Powoduje to wzrost oporów odkształcenia plastycznego w warstwach powierzchniowych, co ogranicza osiowe płynięcie materiału, zaś wysoka temperatura materiału w strefach centralnych ułatwia promieniowe płynięcie materiału, którego efektem jest intensywny przyrost grubości ścianki. Przeprowadzone próby obciskania obrotowego odkuwek drążonych ze stopu tytanu potwierdziły przydatność proponowanej technologii do kształtowania materiałów trudnoobrabialnych (plastycznie i mechanicznie). Należy jednak liczyć

się z trudnościami w kształtowaniu tej grupy materiałów, które wynikają z właściwości termicznych stopów tytanu. Również dość sporym utrudnieniem jest intensywne utlenianie powierzchni wsadu (w przypadku nagrzewania bez atmosfer ochronnych). Tlenki tytanu, które tworzą się na powierzchni materiału (jasno brunatny nalot), powodują zmniejszenie współczynnika tarcia między wsadem, a narzędziami. Konsekwencją zmniejszenia sił tarcia na powierzchni kontaktu kształtowany materiał – narzędzia może być pojawienie się niekontrolowanych poślizgów, które są niepożądane szczególnie w rotacyjnych procesach obróbki plastycznej.

7.2. Kształtowanie drążonych odkuwek sworzni kulistych

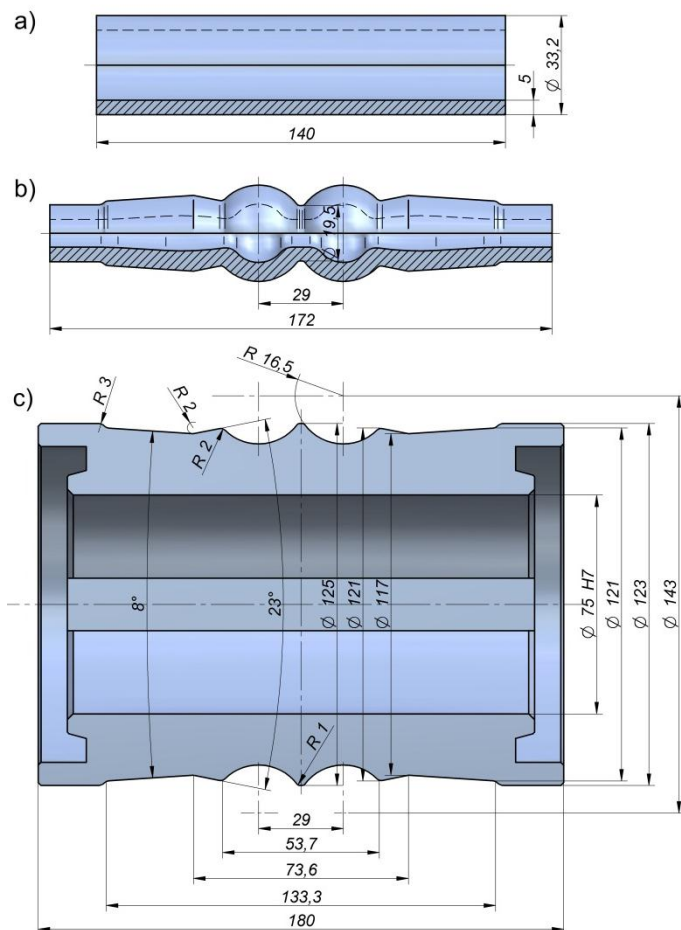
Możliwość zastosowania procesu obciskania obrotowego do wytwarzania drążonych sworzni kulistych przeanalizowano na przykładzie elementu zaczerpniętego z motoryzacji, który pokazano na rys. 7.18. Sworzeń ten zbudowany jest z części kulistej o największej średnicy, dwóch stożkowych powierzchni oraz części cylindrycznej. Ze względu na kształt elementu, zaproponowano obciskanie odkuwki w układzie podwójnym, celem zrównoważenia sił działających w kierunku osiowym oraz zmniejszenia nadadków technologicznych [95].



Rys. 7.18. Półfabrykat drążonego sworznia kulistego z zaznaczonymi ważniejszymi wymiarami

W oparciu o wyniki badań kształtowania odkuwek elementarnych wałków, przyjęto sposób połączenia obciskanych półfabrykatów sworzni. Zdecydowano, że będą one połączone ze sobą częściami kulistymi, przy pomocy łączników cylindrycznych (rys. 7.19b). Przy takim położeniu odkuwek eliminuje się problem swobodnego płynięcia materiału w kierunku powierzchni czołowych wsadu, który występowałoby w przypadku odwrotnego rozmieszczenia elementów. Ponadto kształtowanie w centralnej części narzędzi stopni odkuwki, które mają maksymalne średnice, pozwala na zmniejszenie wymiarów półfabrykatu (jego średnicy i długości). Po procesie kształtowania elementy rozdzielane są za pomocą przecinania, realizowanego np. na przecinarkach tarczowych. Opracowaną konstrukcję narzędzi, które miały kształt stopniowanych wałków,

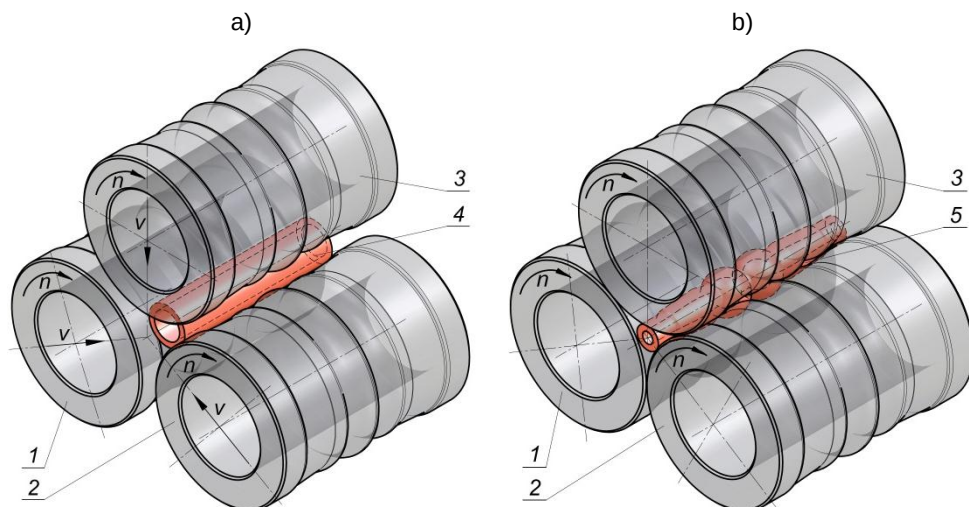
podzielonych wzdłuż osi na dwa segmenty pokazano na rys. 7.19c. Założono również wymiary wsadu (rys. 7.20a), które wynosiły: średnica zewnętrzna $\varnothing 33,2$ mm, grubość ścianki $g_o = 5$ mm, długość wsadu $L_o = 140$ mm (rys. 7.19a).



Rys. 7.19. Parametry konstrukcyjne: a) wsadu, b) odkuwki sworznia w układzie podwójnym, c) segmentu narzędziowego

Schemat kształtowania odkuwek sworzni według proponowanej koncepcji przedstawiono na rys. 7.20. Podobnie, jak w przypadku kształtowania odkuwek wałków wielostopniowych, poprawność przyjętych parametrów konstrukcyjno-technologicznych procesu oceniono w drodze symulacji numerycznej (wykonanej MES). Obliczenia przeprowadzono w programie Simufact Forming, przy następujących parametrach procesu: prędkość obrotowa narzędzi $n = 36$ obr/min, prędkość postępową walców $v = 1,5$ mm/s, temperatura wsadu 1150 °C, temperatura narzędzi 50 °C, czynnik tarcia $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła

między materiałem a narzędziami $25 \text{ kW/m}^2\text{K}$, materiał wsadu – stal w gatunku C45, której krzywe płynięcia opisano modelem wg równania (4.4).

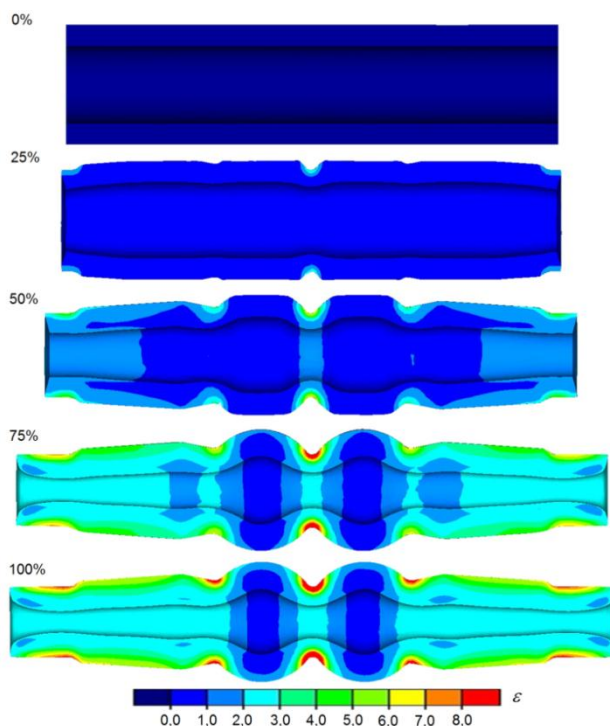


Rys. 7.20. Schemat procesu obciskania obrotowego odkuwki sworznia kulistego w układzie podwójnym: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1, 2, 3 – narzędzia, 4 – wsad, 5 – odkuwki sworznia kulistego

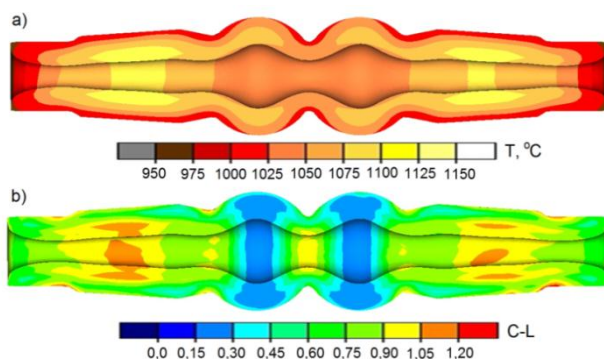
Wyniki symulacji MES wskazują, że proces kształtowania odkuwek dla przyjętych parametrów będzie przebiegał bez zakłóceń. Pomimo bardziej złożonej geometrii w stosunku do przypadku analizowanego w poprzednim podrozdziale, kinematyka płynięcia materiału jest podobna (rys. 7.21). W pierwszej fazie procesu redukowana jest średnica skrajnych stopni odkuwek, co pozwala na zamknięcie materiału w wykroju utworzonym przez trzy rolki. W kolejnym etapie procesu kształtowane są jednocześnie czopy skrajne oraz stopnie stożkowe, a na samym końcu również części kuliste odkuwki. Podczas obciskania materiał płynie w trzech kierunkach: promieniowym, powodującym wzrost grubości ścianki, osiowym, który prowadzi do zwiększenia długości części cylindrycznych (skrajnych) sworzni oraz obwodowym, nie wpływającym na zmianę kształtu, a jedynie na wzrost intensywności odkształcenia w warstwach powierzchniowych (rys. 7.21).

Przedstawiony na rys. 7.22a rozkład temperatury wskazuje, że pomimo długiego czasu realizacji procesu oraz niewielkiej pojemności cieplnej wsadu, temperatura materiału utrzymuje się w zakresie właściwym dla procesów obróbki plastycznej na gorąco, a zauważone wychłodzenie ma charakter powierzchniowy. Natomiast zgodnie z danymi przedstawionymi na rys. 7.22b największe niebezpieczeństwo pęknięcia materiału występuje na powierzchni wewnętrznej trzonu sworznia. W tej strefie może dochodzić do pęknięcia

powierzchniowego materiału. Dlatego też usunięcie uszkodzonej warstwy materiału będzie wymagać rozwiercenia otworu w trzonie.



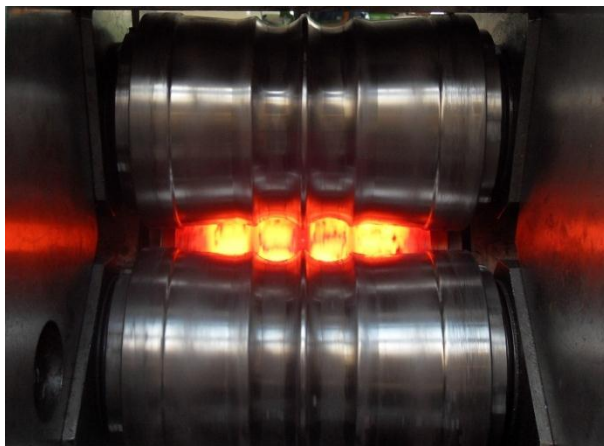
Rys. 7.21. Wyznaczona MES progresja kształtu odkuwki sworznia kulistego z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia



Rys. 7.22. Wyznaczone MES rozkłady w przekroju osiowym odkuwki sworznia kulistego: a) temperatury, b) kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama

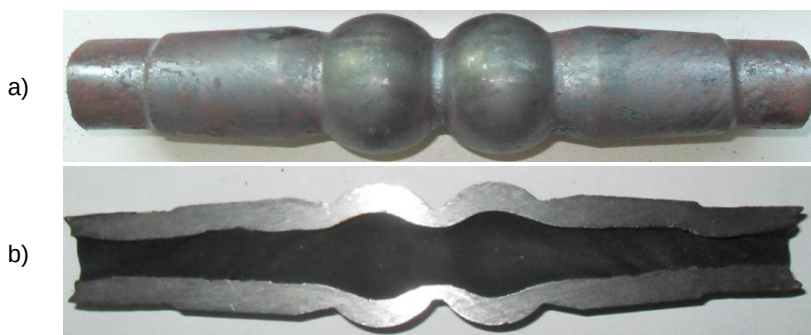
Pozytywne wyniki obliczeń numerycznych obciskania obrotowego drążonych odkuwek sworznia kulistego pozwoliły na rozpoczęcie prób doświadczalnych

procesu. Po zamontowaniu narzędzi na wałach roboczych agregatu (rys. 7.23) ukształtowano serię próbną odkuwek.



Rys. 7.23. Narzędzia zamontowane na wałach agregatu do obciskania obrotowego podczas kształtowania odkuwek sworzni kulistych w układzie podwójnym

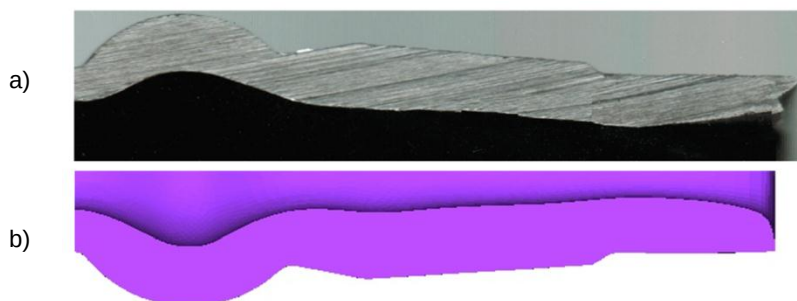
Przykładowe elementy uzyskane podczas obciskania wsadów rurowych w agregacie kuźniczym pokazano na rys. 7.24. W trakcie eksperymentu zachowano zbliżone parametry kinematyczne i termiczne do przyjmowanych podczas analizy MES.



Rys. 7.24. Ukształtowane podczas prób doświadczalnych drążone odkuwki sworzni kulistego: a) widok, b) przekrój osiowy

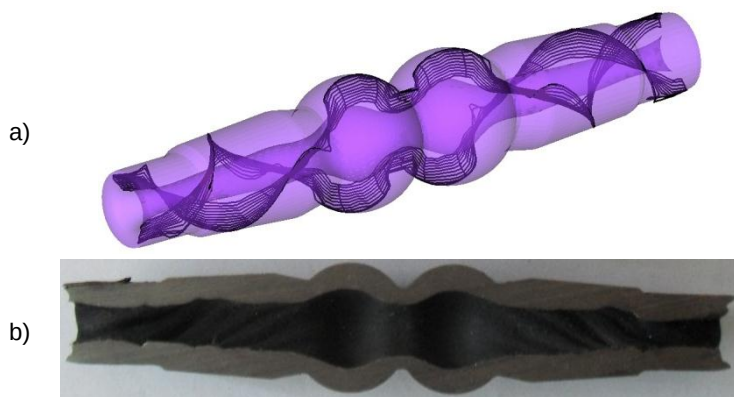
Rezultaty badań w pełni potwierdziły możliwość wytwarzania tą technologią półwyrobów drążonych sworzni kulistych. Uzyskane wyniki wskazują dużą zgodność geometryczną elementów ukształtowanych w trakcie eksperymentu z kształtem prognozowanym podczas symulacji (rys. 7.25). W obydwu przypadkach obserwuje się nierównomierny wzrost grubości ścianki oraz wydłużenie skrajnych (walcowych) stopni odkuwek. W przypadku eksperymentu

widoczne jest większe wydłużenie zewnętrznego stopnia, kosztem zmniejszenia grubości ścianki. Należy jednak zaznaczyć, że uzyskana grubość ścianki mieści się w zakładanym polu tolerancji (wraz z naddatkiem na obróbkę wykańczającą otworu).



Rys. 7.25. Przekroje osiowe drążonej odkuwki sworznia kulistego: a) ukształtowanej podczas prób, b) wyznaczonej MES

Obie metody badawcze wskazują na skręcenie przekroju poprzecznego odkuwki wzdłuż jej osi (rys. 7.26). Do skręcania dochodzi głównie w obszarze stożkowego oraz walcowego stopnia półwyrobu. Jest ono wywołane różnymi prędkościami obwodowymi stopni o innych średnicach.

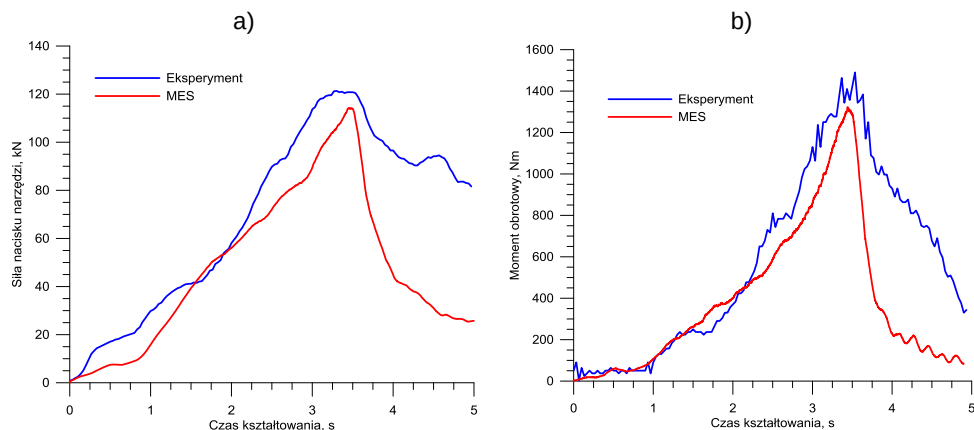


Rys. 7.26. Skręcenie przekroju poprzecznego drążonej odkuwki sworznia kulistego: a) wyznaczone MES, b) ujawnione w ukształtowanej odkuwce

Zniekształcony obszar powierzchni otworu w wyniku wyboczenia plastycznego, a następnie jego skręcenia zostanie usunięty podczas rozwiercania otworu. Dlatego też zauważona wada nie będzie miała wpływu na przydatność tak ukształtowanych elementów.

W trakcie badań monitorowano także parametry siłowe procesu obciskania. Rozkłady sił nacisku jednego z narzędzi oraz momentu obrotowego na wale roboczym agregatu pokazano na rys. 7.27. Otrzymane rozkłady z obliczeń

i eksperymentu są bardzo zbliżone do siebie, zarówno jakościowo, jak i ilościowo.



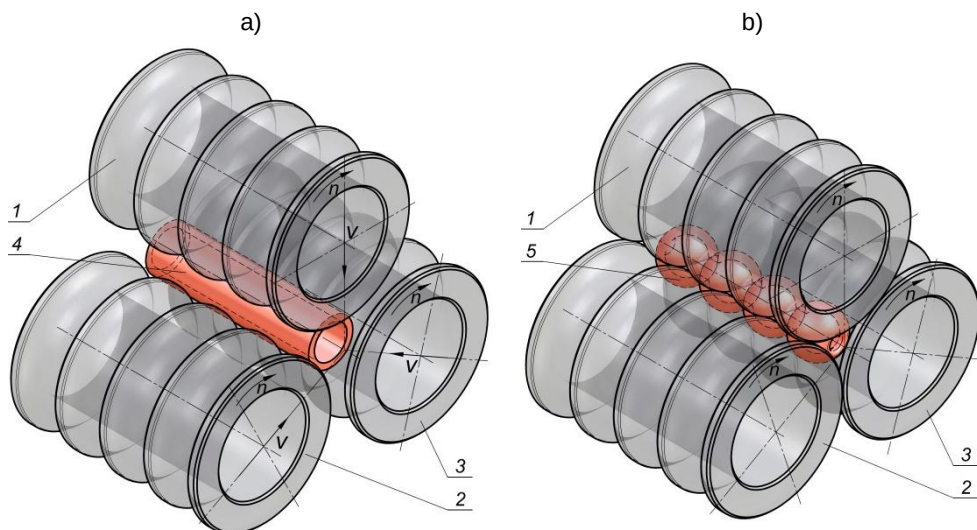
Rys. 7.27. Wyznaczone w trakcie obciskania odkuwek swożnia kulistego parametry siłowe procesu: a) siły nacisku narzędzi, b) moenty obrotowe

W trakcie kształtowania siła i moment wzrastają do chwili, gdy walce przemieszczają się o wartość równą połowie gniotu ($\Delta h/2 = (D - d_{min})/2 = 6,85$ mm). Następnie podczas kalibrowania, wraz z usuwaniem niedokładności kształtu następuje szybkie zmniejszanie się siły i momentu. Pod względem ilościowym, odnotowano większe wartości siły i momentu podczas prób doświadczalnych. Zróżnicowanie wartości jest niewielkie, gdzie w przypadku siły wynosi 5%, zaś dla momentów około 7%. Zauważone rozbieżności najprawdopodobniej wynikają z niewielkich różnic w temperaturze odkuwki rzeczywistej i wirtualnej.

7.3. Obciskanie obrotowe odkuwek kul drażonych

Szerokie zastosowanie w budowie maszyn znajdują elementy drażone w kształcie kul. Stosowane są one między innymi w zaworach kulowych do sterowania przepływem cieczy oraz jako elementy ślizgowe wszelkiego rodzaju samonastawnych łączników przegubowych. Obecnie proces wytwarzania drażonych elementów kulistych opiera się głównie na technologiach skrawania, co wiąże się ze znacznymi stratami materiału sięgającymi nawet 75%. W przypadku większych średnic kul wykorzystuje się również technologie obróbki plastycznej (głównie procesy kucia) do kształtowania pełnych półfabrykatów, poddawanych następnie obróbce mechanicznej, w trakcie której wiercone są otwory. Optymalizacji procesu wytwarzania takich elementów można dokonać między innymi poprzez wykorzystanie plastycznie ukształtowanych półwyrobów w kształcie drażonych kul, w których pozostawiono jedynie minimalne naddatki na obróbkę wykańczającą (zarówno na powierzchni zewnętrznej, jaki

i w otworze). Przeprowadzone badania wykazały, że elementy tego typu mogą być efektywnie kształtowane z półfabrykatów rurowych technologią obciskania obrotowego. Schemat realizacji takiego procesu pokazano na rys. 7.28.

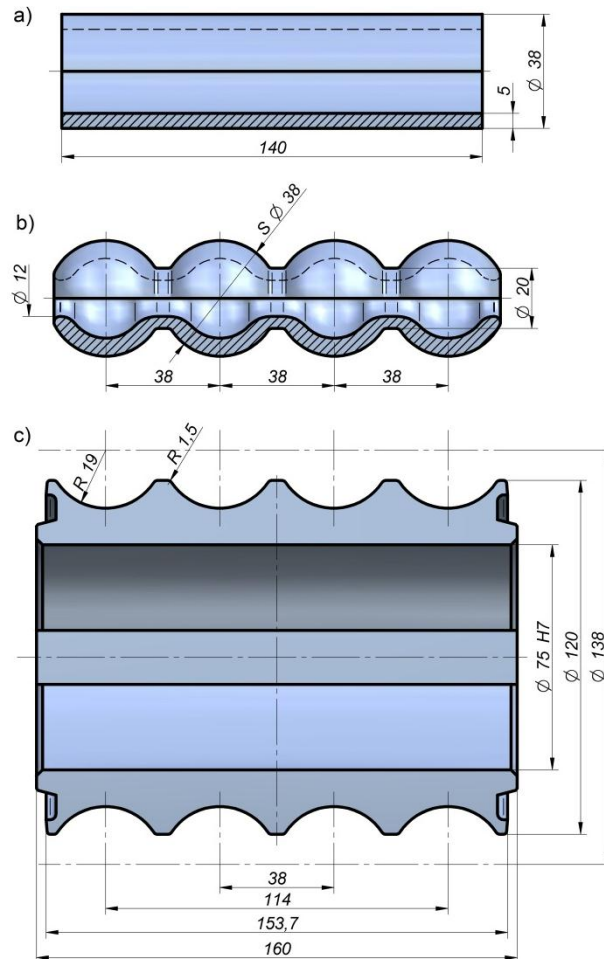


Rys. 7.28. Schemat procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek kul: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1, 2, 3 – narzędzia, 4 – wsad, 5 – odkuwki kul

Przydatność technologii do kształtowania drążonych odkuwek kulistych potwierdzono podczas dwuetapowych badań (teoretyczno-doświadczalnych), w trakcie których analizowano proces obciskania odkuwek kul o średnicy $\varnothing 38$ mm z półfabrykatów rurowych o grubości ścianki $g_o = 5$ mm.

Uwzględniając kształt elementów, przyjęto, że proces obciskania odkuwek kul będzie realizowany w układzie wielokrotnym. Poszczególne odkuwki będą ze sobą połączone przy pomocy walcowych łączników (rys. 7.29), a ich rozdzielanie będzie przeprowadzane w kolejnej operacji. Wsadem będą odcinki rur handlowych o średnicy zewnętrznej równej średnicy kształtowanych kul. Do realizacji procesu wykorzystano segmentowe narzędzia w kształcie wałków, na powierzchniach których wykonane były pierścieniowe bruzdy o zarysie obciskanych kul (rys. 7.29c).

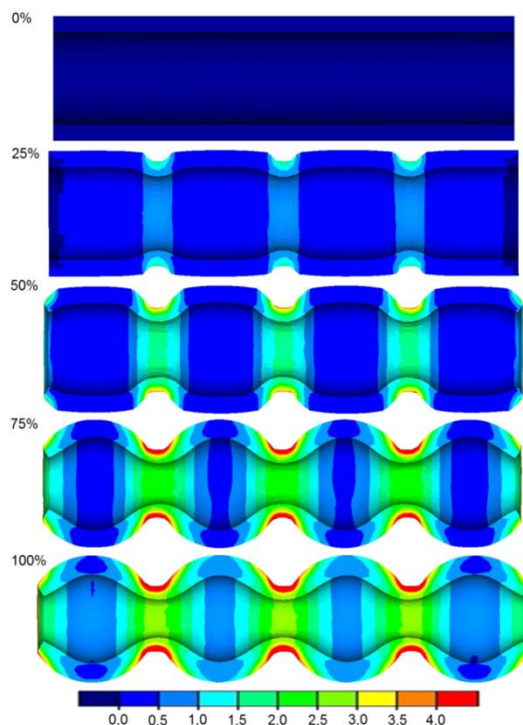
Wyznaczoną MES progresję kształtu podczas obciskania drążonych odkuwek kul pokazano na rys. 7.30. Kształtowanie odkuwek kul jest efektem redukowania zewnętrznej średnicy wsadu w obszarze walcowych łączników. W wyniku oddziaływania pierścieniowych kołnierzy o wklęsłych powierzchniach bocznych, materiał płynie głównie w kierunku promieniowym, jednocześnie następuje stopniowe kształtowanie zewnętrznych powierzchni (sferycznych) odkuwek kul.



Rys. 7.29. Ważniejsze parametry geometryczne: a) wsadu, b) odkuwek kul, c) narzędzi

W stosunku do procesów obciskania elementów, które charakteryzują się walcowym kształtem skrajnych stopni, obserwuje się znacznie mniejszy przyrost długości odkuwek. Jest to związane z ograniczeniem osiowego płynięcia materiału przez zewnętrzne kołnierze umieszczone na narzędziach. W rezultacie dominującym zjawiskiem jest wzrost grubości ścianki odkuwek. Jedynie w strefie walcowych łączników dochodzi do pocienienia ścianki. W tych obszarach można również zauważyć koncentrację odkształceń, na którą mają wpływ trzy czynniki: duża redukcja średnicy zewnętrznej, skręcanie przekroju poprzecznego oraz generowanie odkształceń zbędnych w kierunku obwodowym.

Próby doświadczalne kształtowania odkuwek kul wykonano przy pomocy trzech zestawów dzielonych segmentów narzędziowych (rys. 7.31), które zostały zamontowane na wałach agregatu.



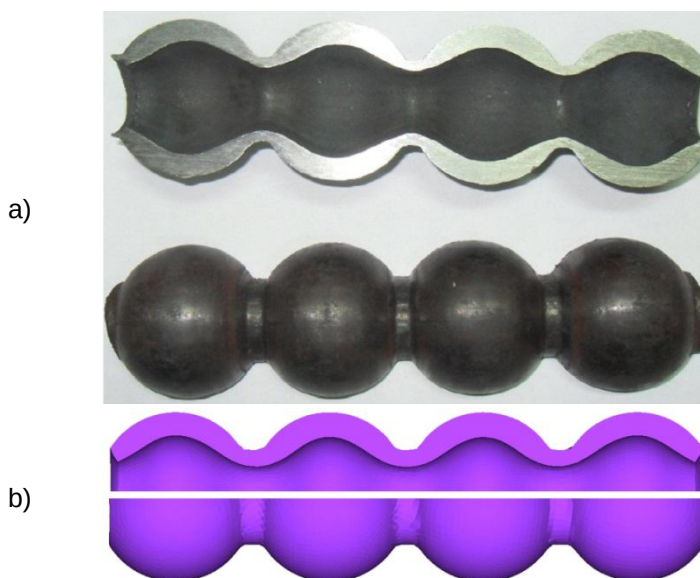
Rys. 7.30. Wyznaczona MES progresja kształtu podczas obciskania obrotowego odkuwek kul drążonych

Wsad w postaci stalowych odcinków rur handlowych w gatunku C45 nagrzewano do temperatury 1150 °C. Następnie kształtowano odkuwki z parametrami kinematycznymi procesu, które wynosiły: prędkość obrotowa narzędzi $n = 36$ obr/min, prędkość postępową narzędzi $v = 2$ mm/s, stopień gniołu $\delta = 1,9$.

Ukształtowane podczas eksperymentu oraz wyznaczone numerycznie odkuwki kul pokazano na rys. 7.32. Elementy połączone są ze sobą walcowymi szyjkami, które stanowią obszar rozdzielania odkuwek. Otrzymane w trakcie eksperymentu półwyroby charakteryzują się zadowalającą jakością i dokładnością. Powierzchnia zewnętrzna, jak i wewnętrzna jest wolna od wad. Ponadto widoczna jest dość dobra zgodność z wynikami uzyskanymi podczas modelowania numerycznego. W obu przypadkach w części sferycznej odkuwek widoczny jest wzrost grubości ścianki, zaś w strefie łączników jej pocienienie. Cechą charakterystyczną odkuwek jest również zbliżony do sferycznego kształt otworu. Jednak w wielu przypadkach drążone kule mają cylindryczny otwór. Przy takiej geometrii odkuwek, proces ich kształtowania powinien odbywać się z półfabrykatów o większych grubościach ścianek z zastosowaniem trzpienia, który ograniczałby swobodne płynięcie materiału w otworze.



Rys. 7.31. Zestaw dzielonych segmentów narzędziowych do obciskania obrotowego odkuwek kul drążonych



Rys. 7.32. Drążone odkuwki kul: a) ukształtowane podczas eksperymentu w procesie obciskania obrotowego, b) wyznaczone MES

Przedstawione w bieżącym rozdziale przykładowe procesy kształtowania odkuwek drążonych w pełni potwierdzają możliwości technologiczne obciskania obrotowego. Nie wyczerpują jednak asortymentu wyrobów, które mogą być wytwarzane z wykorzystaniem tej technologii, a stanowią jedynie demonstrację jej możliwości. W dalszym ciągu prowadzone są badania, które ukierunkowane są na przemysłowe wdrożenie procesów obciskania obrotowego do kształtowania odkuwek i wyrobów gotowych z półfabrykatów rurowych. Poszukuje się również innych obszarów aplikacji tej technologii, które w zależności od przeznaczenia i asortymentu produkcji pozwolą na efektywne wytwarzanie drążonych części maszyn.

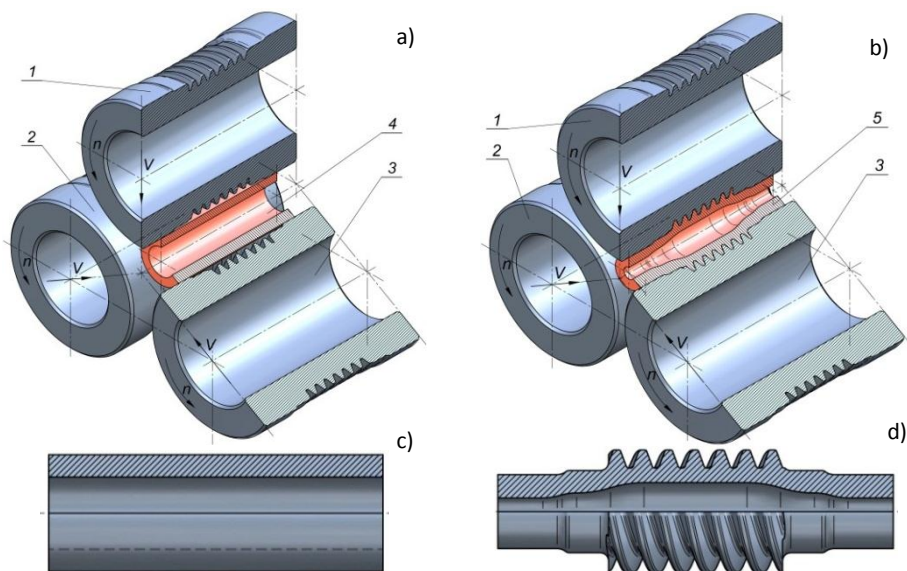
8. Kierunki rozwoju technologii obciskania obrotowego odkuwek drażonych

Obiecujące rezultaty badań procesu obciskania obrotowego odkuwek drażonych potwierdzają zasadność rozwijania tej technologii. W ramach dalszych prac badawczych zostały opracowane między innymi różnego rodzaju modyfikacje technologii, dzięki którym rozszerzono możliwy zakres wykorzystania procesów. W większości przypadków prezentowane rozwiązania technologiczne zostały wstępnie przeanalizowane z wykorzystaniem MES, co pozwoliło na dokonanie oceny możliwości fizycznej realizacji procesów kształtowania.

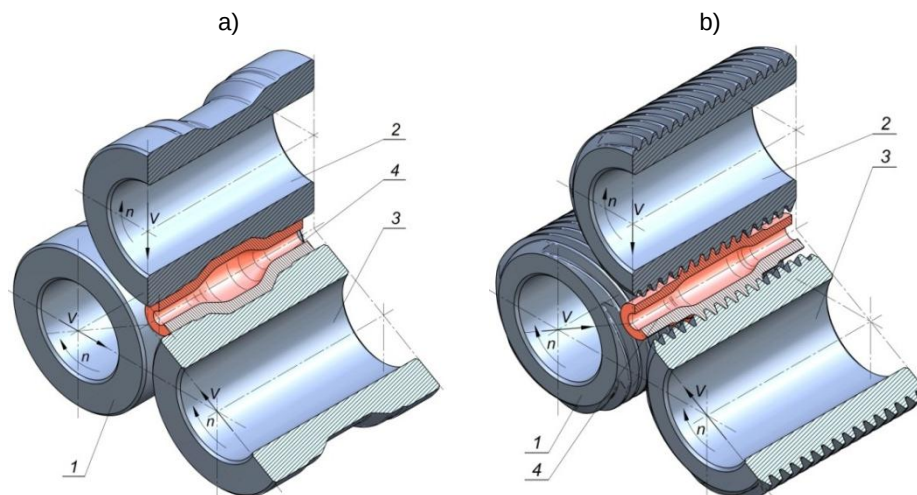
8.1. Obciskanie obrotowe drażonych odkuwek wałków stopniowanych z uzwojeniami ślimaka

Technologia obciskania obrotowego nie ogranicza się jedynie do kształtowania drażonych odkuwek z gładkimi stopniami. Umożliwia również wytwarzanie drażonych odkuwek stopniowanych wałów wraz z uzwojeniami ślimaków, a także kształtowania uzwojeń ślimaków na półfabrykatów pełnych. Schemat realizacji takiego procesu jest identyczny jak obciskanie odkuwek ze stopniami gładkimi (rys. 8.1). Zasadnicza różnica związana jest z kształtem narzędzi, które wykorzystuje się w procesie [133, 134]. Mają one kształt wielostopniowych rolek, w których na jednym ze stopni wykonano jest uzwojenie obciskanego ślimaka. W wyniku oddziaływania trzech obracających się i jednocześnie przemieszczających się w kierunku promieniowym narzędzi dochodzi do redukcji skrajnych stopni odkuwki. Dzięki temu centralna część wsadu zostaje zamknięta w wykroju narzędzi, ograniczając osiowe płynięcie materiału. Dalszy ruch narzędzi powoduje zwiększanie redukcji zewnętrznych czopów, połączonej z jednoczesnym kształtowaniem uzwojenia ślimaka na środkowym stopniu półfabrykatu. Wyniki wstępnych badań wskazują, że jednoczesne kształtowanie walcowych i uzwojonych stopni odkuwek ślimaków drażonych jest możliwe jedynie przy niewielkich wartościach stopnia gniotu ($\delta < 1,3$), co ogranicza wielkość uzyskiwanych modułów uzwojeń do $m \leq 2$ mm. Wynika to z różnicy prędkości obwodowych gładkich i uzwojonych stopni odkuwki i związanego z tym niebezpieczeństwa deformacji ścianki półfabrykatu. Ograniczenia te można wyeliminować poprzez zastosowanie dwuetapowego procesu obciskania takich elementów. W pierwszym etapie z półfabrykatu rurowego kształtowana jest drażona odkuwka wałka stopniowanego. Do tego celu wykorzystuje się narzędzia w kształcie stopniowanych walców. Następnie

w drugim etapie, przy pomocy narzędzi w kształcie uzwojonych walców, na jednym ze stopni poprzednio wykonanej przedkuwki kształtowane jest uzwojenie ślimaka (rys. 8.2) oraz (rys. 8.3).



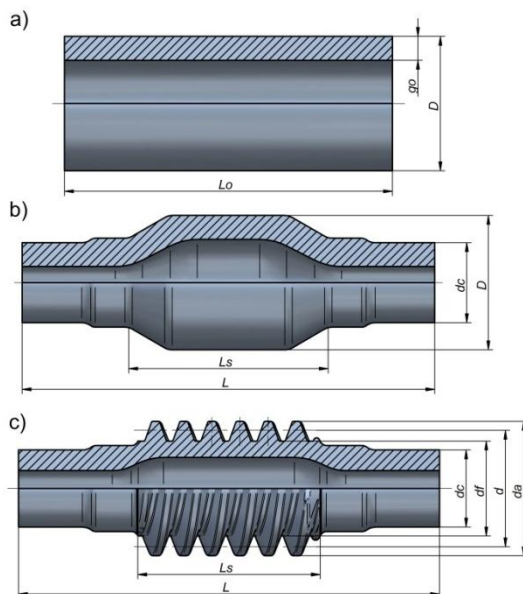
Rys. 8.1. Istota procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek ślimaków:
 a) początek procesu, b) koniec procesu, c) wsad, d) wyrób



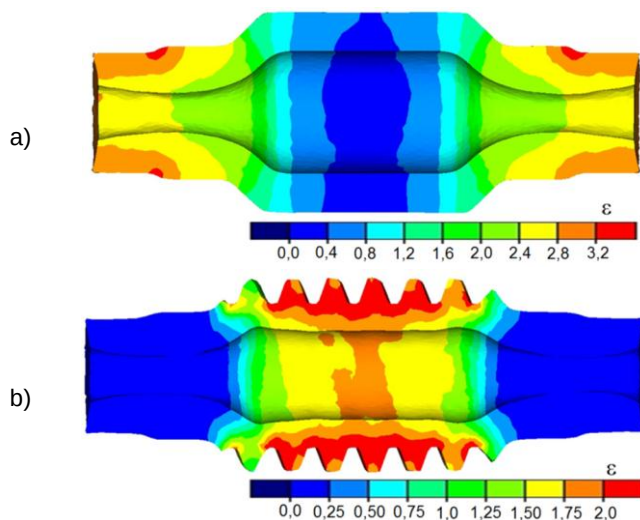
Rys. 8.2. Schemat procesu dwuetapowego kształtowania drążonych odkuwek wałków stopniowanych z uzwojeniami ślimaka; 1, 2, 3 – narzędzia, 4 – drążona odkuwka wałka stopniowanego z uzwojeniem ślimaka

Wyniki symulacji numerycznych proces kształtowania odkuwek ślimaków według przedstawionego schematu potwierdziły możliwości wytwarzania tego typu

elementów (rys. 8.4). Zostały również podjęte wstępne próby kształtowania odkuwek ślimaków w warunkach laboratoryjnych, które również zostały zakończone powodzeniem. Ukształtowane podczas eksperymentu drążone przedkewki wałków stopniowanych i gotowe odkuwki z uzwojeniami ślimaka pokazano na rys. 8.5.

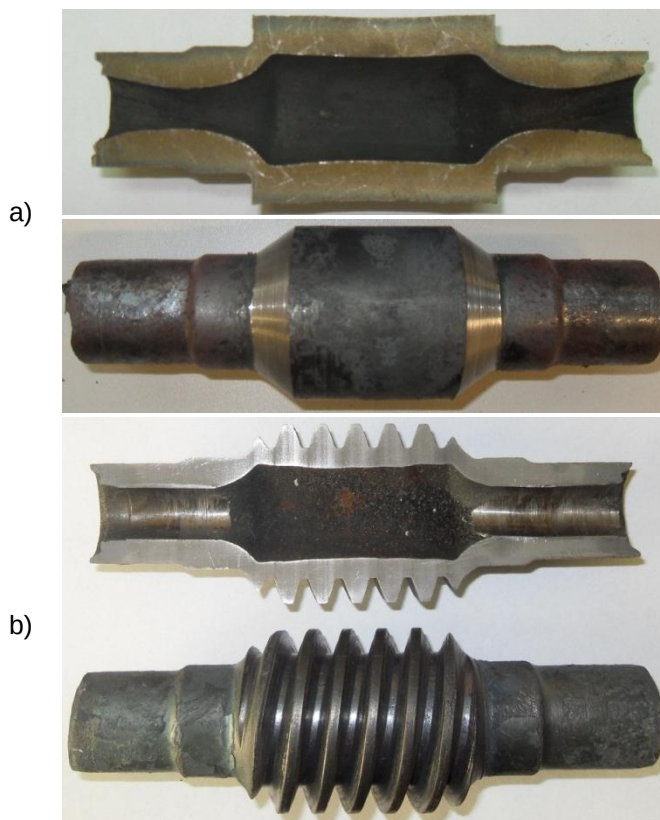


Rys. 8.3. Kolejne etapy kształtowania drążonej odkuwki wałka stopniowanego z uzwojeniem ślimaka: a) wsad, b) półfabrykat po pierwszej operacji obciskania – przedkewka, c) gotowa odkuwka wałka z uzwojeniami ślimaka



Rys. 8.4. Wyznaczony MES kształt drążonej odkuwki wałka stopniowanego z uzwojeniem ślimaka wraz z rozkładem intensywności odkształcenia: a) po I operacji, b) po drugiej operacji

Dzięki rozbiciu procesu kształtowania na dwie operacje, możliwe jest wytwarzanie drążonych odkuwek z uzwojeniami ślimaka, charakteryzujących się dużymi wartościami stopnia gniotu ($\delta = 1,75$).



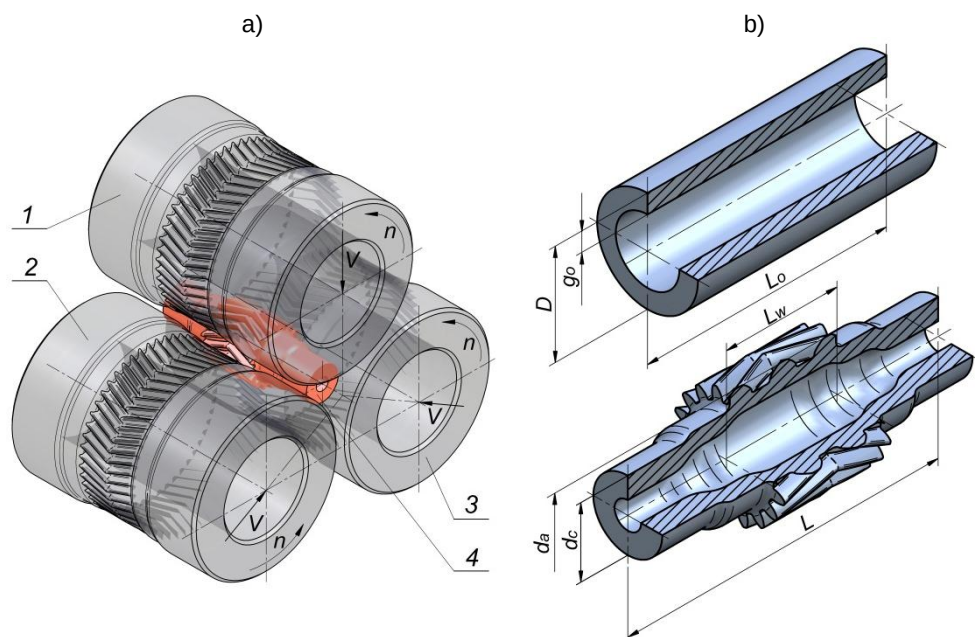
Rys. 8.5. Ukształtowane w trakcie eksperymentu: a) półfabrykat po I operacji obciskania oraz po zukosowaniu powierzchni czołowych, b) gotowa odkuwka ślimaka po II operacji obciskania

8.2. Kształtowanie drążonych odkuwek wałków stopniowanych z wieńcami uzębionymi

Rozwijając możliwości technologii, zaproponowano również wykorzystanie obciskania obrotowego do kształtowania drążonych odkuwek wałków stopniowanych z wieńcami uzębionymi [99, 102, 130, 136, 144]. Tego typu elementy są powszechnie stosowane w przemyśle motoryzacyjnym i maszynowym, a obecnie wykorzystywane metody ich wytwarzania w większości przypadków bazują na procesach skrawania. Zaproponowano przy tym by odkuwki wałków kształtowane były wraz z uzębieniem w czasie jednej operacji, wykorzystując do ich wytwarzania półfabrykaty rurowe. Takie rozwiązanie wydaje się być

optymalnym pod względem ekonomicznym i technologicznym, ograniczając zużycie materiału oraz ilość stosowanych operacji. W rezultacie możliwe jest skrócenie czasu produkcji, ograniczenie parku maszynowego oraz obniżenie kosztów wytwarzania.

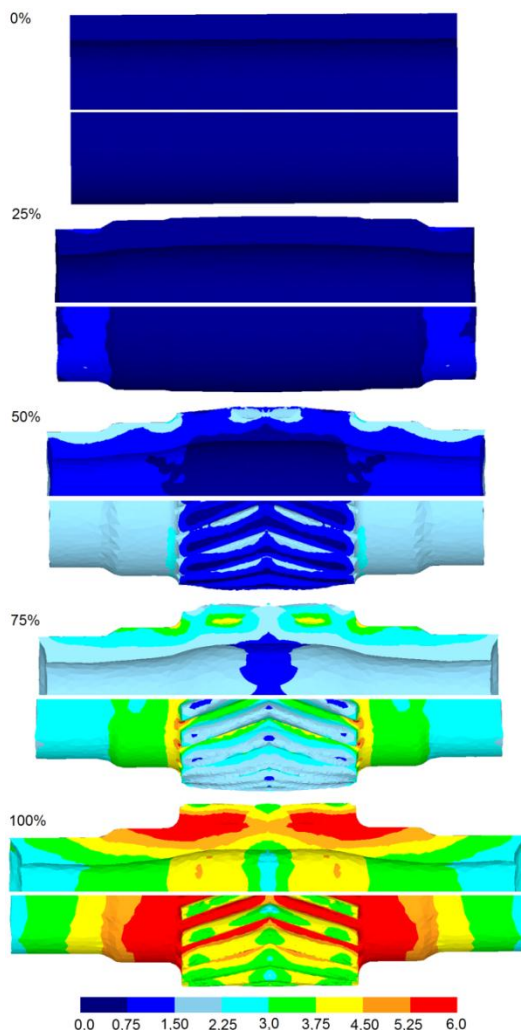
Schemat procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałków uzębionych pokazano na rys. 8.6. Podobnie jak w przypadku półwyrobów z uzwojeniami ślimaka, proces obciskania przebiega według typowego schematu kształtowania wałków wielostopniowych, a różnica między tymi procesami wynika jedynie z konstrukcji narzędzi. Stosowane podczas obciskania wałków uzębionych narzędzia mają kształt stopniowanych walców, które w swojej centralnej części wyposażone są w wieńce zębate. W rezultacie podczas obciskania walcowych stopni odkuwki jednocześnie kształtowane jest uzębienie w centralnej części półfabrykatu. Proponowana technologia została wstępnie zweryfikowana z zastosowaniem metody elementów skończonych (rys. 8.7), a uzyskane wyniki potwierdziły możliwość jej adaptacji do kształtowania drążonych odkuwek z wieńcami zębatymi.



Rys. 8.6. Obciskanie obrotowe drążonych odkuwek wałków stopniowanych z wieńcami uzębionymi: a) schemat procesu, b) kształt wsadu i obciskanej odkuwki [148]

Podobnie, jak w przypadku obciskania odkuwek ślimaków, jednocześnie kształtowanie stopni gładkich i uzębionych może być zrealizowane dla elementów charakteryzujących się stosunkowo małymi redukcjami średnicy zewnętrznej. Dla elementów charakteryzujących się dużymi stopniami gniotu (większe wartości modułów, duża różnica średnic kształtowanych stopni), proces

należy prowadzić w dwóch etapach, kształtując w pierwszym przedkuwkę z gładkimi stopniami, a w drugim wieniec uzębiony.

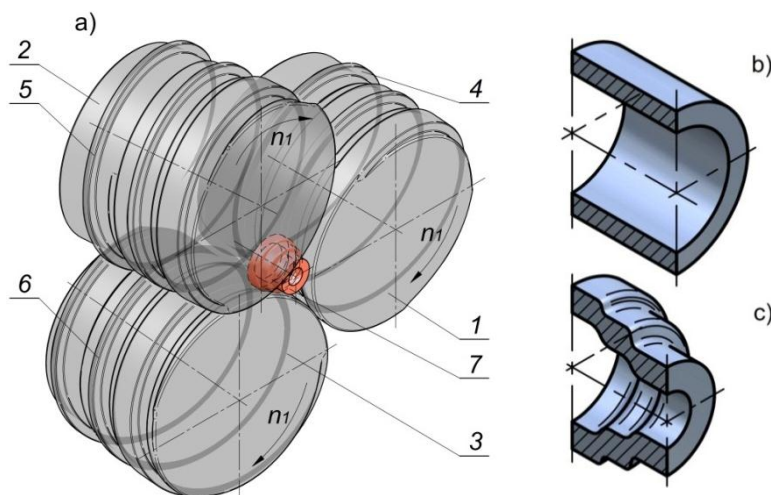


Rys. 8.7. Wyznaczona MES progresja kształtu drążonej odkuwki wałka stopniowanego z wieńcem uzębionym wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

8.3. Obciskanie obrotowe w walcach śrubowych odkuwek stopniowanych pierścieni

Szeroką grupę części maszyn stanowią różnego rodzaju osiowosymetryczne elementy w kształcie stopniowanych pierścieni i tulei, które z powodzeniem mogą być wytwarzane z półfabrykatów rurowych w oparciu o rotacyjne technologie obróbki plastycznej. Uwzględniając kształt takich elementów (niewielka długość

w stosunku do średnicy), zaproponowano aby ich odkuwki wytwarzać w oparciu o technologię obciskania obrotowego, wykorzystując w tym celu narzędzia śrubowe. Proces obciskania obrotowego w wykrojach śrubowych bazuje na technologii walcowania skośnego osiowosymetrycznych odkuwek wydłużonych z półfabrykatu w kształcie pręta między dwoma walcami o osiach skośnych, na powierzchniach których wykonane są śrubowe kołnierze zgniatające materiał [101, 137]. W przypadku obciskania odkuwek drążonych, wsadem są odcinki rur lub gładkich tulei, a proces realizowany jest między trzema walcami o osiach skośnych, rozmieszczonych symetrycznie dookoła osi półfabrykatu (rys. 8.8).



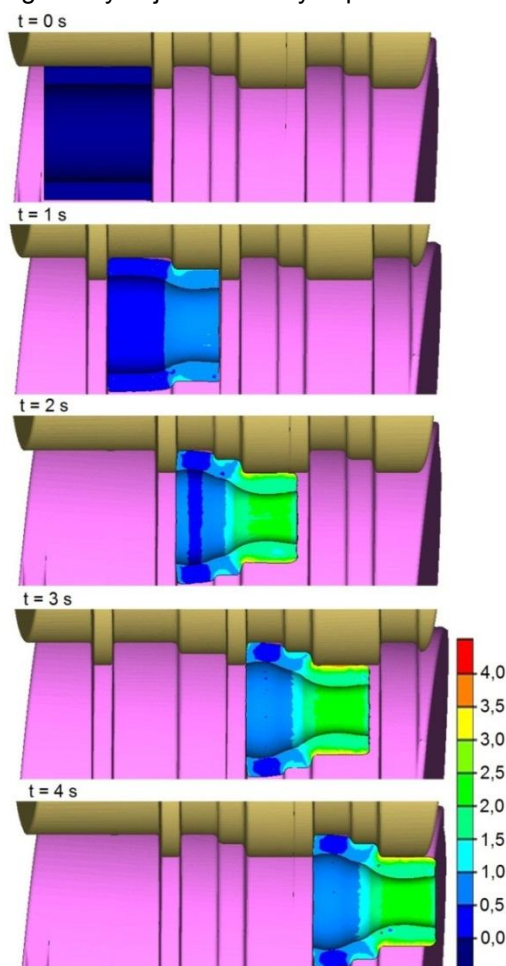
Rys. 8.8. Obciskanie obrotowe odkuwek drążonych w wykrojach śrubowych: a) schemat procesu (1, 2, 3 – walce robocze; 4, 5, 6 – obrzeża kształtujące, 7 – ukształtowana odkuwka pierścienia), b) wsad, c) przykładowa odkuwka

Na powierzchniach walców – 1, 2, 3 wykonane są śrubowe obrzeża kształtujące – 4, 5, 6, które tworzą wykroję o zarysie odpowiadającym tworzącej ukształtowanej odkuwki. Kąty zukosowania osi walców w stosunku do osi półfabrykatu równe są kątowi wzniosu obrzeży kształtujących. W trakcie obciskania walce obracają się z jednakowymi prędkościami w tym samym kierunku. Półfabrykat podawany jest do strefy wejściowej narzędzi, gdzie stopniowo zwiększając swoją wysokość obrzeża kształtujące wprawiają wsad w ruch obrotowy w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów walców i jednocześnie przemieszczają go wzdłuż jego osi. Podczas osiowego przemieszczania półfabrykatu w wykroju narzędzi, śrubowe obrzeża stopniowo redukują kolejne stopnie półfabrykatu, w wyniku czego uzyskuje się odkuwkę stopniowanego pierścienia – 7. W ostatniej fazie procesu (kalibrowanie) obrzeża kształtujące o stałej wysokości usuwają niedokładności kształtu odkuwki. Proces obciskania obrotowego odkuwek pierścieni w wykrojach śrubowych można również zrealizować na trzpieniu, który umieszczany jest w otworze półfabrykatu.

Dzięki temu możliwe jest zwiększenie dokładności wykonania otworów ukształtowanych odkuwek.

Jedną z zalet procesu obciskania odkuwek drążonych w wykrojach śrubowych jest możliwość stosowania narzędzi w kształcie walców, które wykonują jedynie ruch obrotowy. Taki schemat procesu pozwala na zmniejszenie pracochłonności dzięki wyeliminowaniu ruchu jałowego narzędzi. Odkuwki kształtowane są w sposób ciągły, bez konieczności zatrzymywania narzędzi lub zmiany kierunku ich ruchu. Również wielkość naddatków technologicznych oraz powstających odpadów jest znacznie mniejsza w porównaniu do innych metod kształtowania.

Wyznaczoną MES progresję kształtu drążonej odkuwki pierścienia w czasie obciskania obrotowego w wykrojach śrubowych pokazano na rys. 8.9.



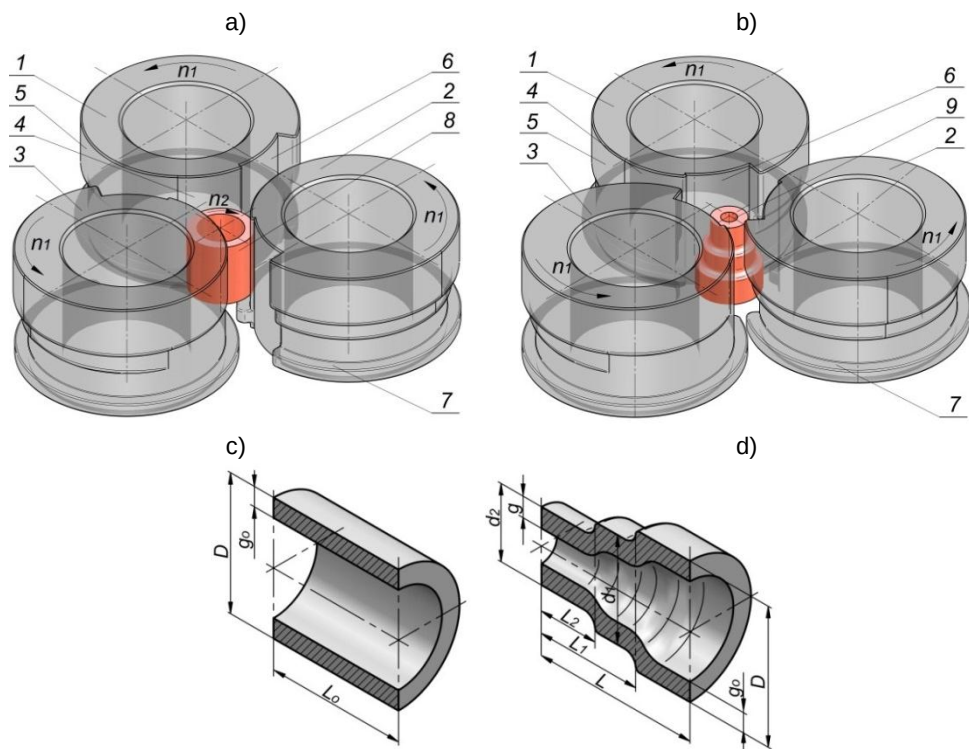
Rys. 8.9. Wyznaczona MES progresja kształtu odkuwki pierścienia podczas procesu obciskania w wykrojach śrubowych wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

Widoczne jest, że zaproponowana technologia pozwala na efektywne kształtowanie półwyrobów drążonych. Należy jednak zwrócić uwagę, że dość duży stopień skomplikowania narzędzi wpływa na wysoki koszt ich wykonania i regeneracji. W rezultacie tego typu proces będzie opłacalny dopiero w warunkach produkcji wielkoseryjnej i masowej.

8.4. Obciskanie obrotowe walcami mimośrodowymi odkuwek pierścieni

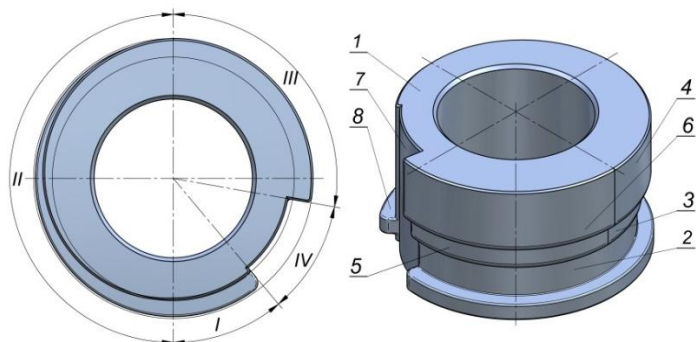
Zaprezentowana w poprzednim podrozdziale technologia ze względu na wysoki koszt narzędzi i złożoną konstrukcję maszyn, dedykowana jest głównie do masowego lub wielkoseryjnego wytwarzania drążonych półfabrykatów stopniowanych pierścieni i tulei. Przy niewielkich seriach produkcyjnych jej wykorzystanie staje się ekonomicznie nieuzasadnione. Dlatego też w przypadku produkcji małoseryjnej i średnioseryjnej zaproponowano, aby odkuwki były kształtowane przy pomocy trzech walców z mimośrodowymi wykrojami [138, 139].

Proces obciskania obrotowego odkuwek pierścieni w walcach mimośrodowych opiera się na technologii walcowania poprzecznego między trzema walcami (rys. 8.10). Zasadnicza różnica w stosunku do technologii walcowania poprzecznego polega na tym, że promień walców zmienia się wraz ze zmianą kąta ich obrotu. W początkowym etapie procesu półfabrykat – 8 w kształcie gładkiej tulei lub odcinka rury umieszczany jest na kołnierzach oporowych – 7 trzech jednakowych narzędzi – 1, 2, 3. Narzędzia mają kształt walców o osiach pionowych, równoległych do siebie i są rozmieszczone symetrycznie dookoła osi półfabrykatu co 120° . Na cylindrycznych powierzchniach roboczych narzędzi znajdują się mimośrodowe wykroje – 5, które w czasie ruchu obrotowego walców stopniowo zgniatają półfabrykat i kształtują kolejne stopnie odkuwki – 9. Wykonana odkuwka usuwana jest samoczynnie z przestrzeni roboczej narzędzi w specjalnym kanale, utworzonym przez wycięcia – 6, znajdujące się w strefie wyjściowej walców. Zaletą prezentowanego procesu obciskania jest prosta konstrukcja narzędzi, które kształtują odkuwkę w czasie jednego pełnego ich obrotu. Nie bez znaczenia jest również prosta kinematyka ruchu walców, które w czasie procesu jedynie obracają się w zgodnym kierunku dookoła własnych osi. W rezultacie proces możliwy jest do zrealizowania na prostych konstrukcyjnie maszynach. Przyjęta kinematyka ruchu narzędzi wpływa również korzystnie na wydajność procesu, dzięki wyeliminowaniu ruchu jałowego walców. Konstrukcję walca roboczego do obciskania obrotowego odkuwki pierścienia przedstawiono na rysunku 8.11. Narzędzie składa się z cylindrycznego walca, podzielonego na cztery strefy robocze.



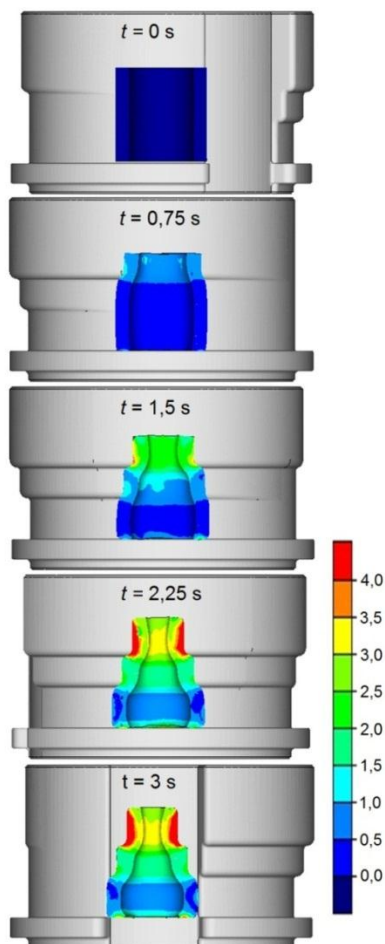
Rys. 8.10. Schemat obciskania obrotowego odkuwki pierścienia w walcach mimośrodowych: a) początek procesu, b) koniec procesu, c) wsad, d) ukształtowana odkuwka (opis w tekście)

Pierwsza strefa – I (wejściowa) ma kształt walcowej powierzchni – 2, po której toczy się wsad bez redukcji przekroju. Następnie w strefie – II (kształtowania) znajdują się obrzeża kształtujące – 3 i 4, które stopniowo zwiększają swoją wysokość. W kolejnej strefie – III (kalibrowania), obrzeża robocze – 5 i 6 mają stałą wysokość, która odpowiada wymaganej redukcji kolejnych stopni odkuwki.



Rys. 8.11. Konstrukcja narzędzia do obciskania odkuwek stopniowanych pierścieni (opis w tekście)

W ostatniej strefie – IV (wyjściowej) znajduje się cylindryczne wycięcie – 7, które umożliwia samoczynne usuwanie ukształtowanych półfabrykatów z przestrzeni roboczej narzędzi. W trakcie realizacji procesu obciskania półfabrykat spoczywa na kołnierzach oporowych – 8, które pozycjonują położenie półfabrykatu w przestrzeni roboczej w początkowej fazie procesu. Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych potwierdziły możliwość kształtowania odkuwek stopniowanych pierścieni w wykrojach mimośrodowych (rys. 8.12). Cechą charakterystyczną tak ukształtowanych odkuwek jest nierównomierny wzrost grubości ścianki, spowodowany swobodnym płynięciem materiału w kierunku promieniowym, co zwiększa naddatki technologiczne w tym obszarze półwyrobu. Jakość i dokładność powierzchni otworu można poprawić w wyniku częściowego ograniczenia swobodnego płynięcia materiału przy pomocy trzpienia, na którym kształtowana byłaby odkuwka.

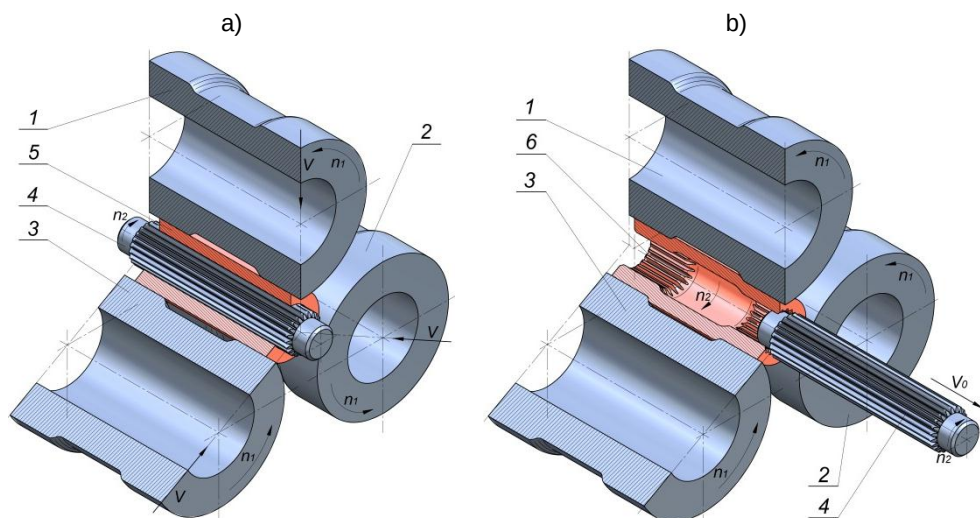


Rys. 8.12. Wyznaczona MES progresja kształtu odkuwki pierścienia w procesie obciskania obrotowego wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

8.5. Obciskanie obrotowe drążonych odkuwek na trzpieniu

Dotychczas prezentowane wyniki badań dotyczyły głównie kształtowania powierzchni zewnętrznej odkuwek drążonych, natomiast powierzchnia wewnętrzna (otwór) podlegały odkształcaniu w sposób swobodny, w wyniku promieniowego płynięcia materiału. Jak już wcześniej zasygnalizowano, taka kinematyka płynięcia materiału prowadzi do niejednorodnych zmian grubości ścianki oraz pogorszenia jakości powierzchni otworu, zwiększając naddatki technologiczne, usuwane podczas obróbki wykańczającej. W celu wyeliminowania tych mankamentów zaproponowano realizację procesu obciskania z wykorzystaniem trzpieni, które pozwoliłyby na równoczesne kształtowanie zarysu otworu w sposób kontrolowany.

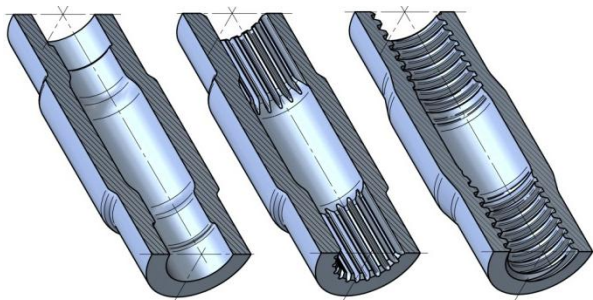
Schemat obciskania odkuwek na trzpieniu (rys. 8.13) jest podobny do procesów kształtowania, w których otwór półfabrykatu ma możliwość swobodnego odkształcania. Jedyną różnicą jest umieszczenie w otworze wsadu trzpienia, który ma możliwość swobodnego obrotu wraz z odkuwką. Pełni on rolę dodatkowego narzędzia, które kształtuje wewnętrzną powierzchnię odkuwki [146, 147].



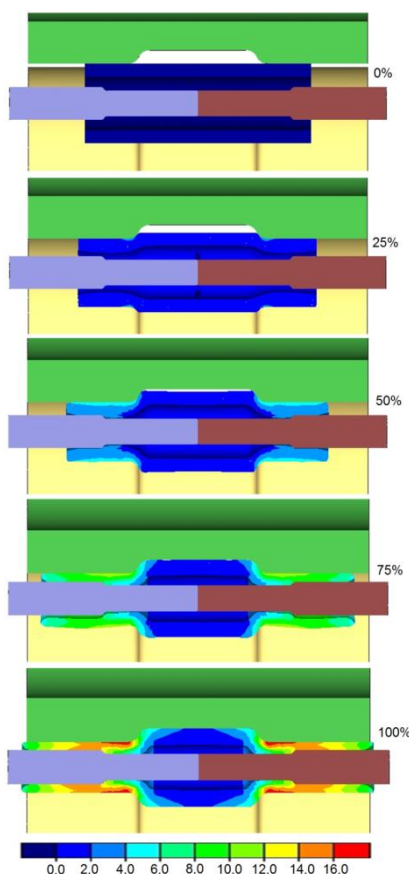
Rys. 8.13. Schemat obciskania elementów drążonych na trzpieniu: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1, 2, 3 – narzędzia, 4 – trzpień, 5 – wsad, 6 – ukształtowana odkuwka

W zależności od geometrii zastosowanych w procesie trzpieni możliwe jest kształtowanie odkuwek z gładkimi otworami cylindrycznymi, wielowypustów i wielokarbów, a także wewnętrznych zarysów śrubowych (rys. 8.14). Wstępne analizy numeryczne potwierdziły możliwość kształtowania metodą obciskania obrotowego na trzpieniu odkuwek drążonych (rys. 8.15). Z uwagi na ograniczenie płynięcia materiału w obszarze otworu, taki proces kształtowania jest znacznie trudniejszy do realizacji w stosunku do wcześniej prezentowanych metod.

Odwzorowanie zarysu trzpienia w otworze odkuwki jest głównie efektem promieniowego przemieszczania materiału, które jest znacząco ograniczone przez powierzchnie narzędzia. W rezultacie dochodzi do zgniatania ścianki półfabrykatu, czemu towarzyszy intensywne wydłużanie materiału.



Rys. 8.14. Przykładowy kształt otworów w drążonych odkuwkach obciskanych na trzpieniu



Rys. 8.15. Wyznaczona MES progresja kształtu drążonej odkuwki podczas obciskania obrotowego na trzpieniu z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

Wyniki obliczeń wskazują, że graniczne wartości stopnia gniotu, z którymi mogą być kształtowane zewnętrzne powierzchnie półfabrykatu są znacznie mniejsze w stosunku do otrzymanych podczas kształtowania odkuwek bez trzpieni. Pojawia się również konieczność dokładnego określenia początkowej grubości ścianki oraz stopnia gniotu w zależności od kształtu i wymiarów trzpienia. Niewłaściwy dobór parametrów geometrycznych i kinematycznych procesu może skutkować niecałkowitym odwzorowaniem zarysu trzpienia w otworze lub rozwalcowaniem ścianki odkuwki, którego efektem będzie deformacja przekroju poprzecznego. Należy przy tym zaznaczyć, że pomimo większych trudności w realizacji procesu, korzyści, jakie można osiągnąć ograniczając swobodne płynięcie materiału w obszarze otworu w pełni potwierdzają konieczność prowadzenia dalszych badań w tym kierunku.

Podsumowanie i wnioski

W opracowaniu przedstawiono najważniejsze wyniki prac badawczych dotyczących kształtowania drążonych odkuwek wałków stopniowanych innowacyjną technologią obciskania obrotowego. Na podstawie literatury scharakteryzowano obecnie stosowane metody wytwarzania elementów drążonych, z zaznaczeniem głównych obszarów ich wykorzystania. Z przeprowadzonej analizy literaturowej wynika, że większość obecnie wykorzystywanych procesów kształtowania plastycznego elementów drążonych charakteryzuje się dość dużym stopniem skomplikowania oraz koniecznością stosowania złożonych konstrukcyjnie maszyn i urządzeń. Wiąże się to z wysokimi nakładami finansowymi podczas uruchamiania produkcji, czyniąc takie technologie opłacalne dopiero w przypadku produkcji wielkoseryjnej lub masowej. Analiza profilu produkcji krajowych i zagranicznych zakładów kuźniczych wskazuje, że duży asortyment wytwarzanych wyrobów stanowią odkuwki kształtowane w małych i średnich seriach, co w pełni potwierdza zasadność poszukiwania alternatywnych technologii kształtowania tego typu elementów. Zaproponowana przez autora metoda, dzięki zastosowaniu prostych urządzeń i narzędzi może być z powodzeniem wykorzystana zarówno do kształtowania niewielkich serii wyrobów, a także w produkcji masowej. Zastosowanie w procesie wytwarzania wsadu rurowego pozwala na znaczne zmniejszenie zużycia materiałów, robocizny oraz energii, co przekłada się na mniejsze koszty wytwarzania.

Do analizy teoretycznej procesu obciskania obrotowego odkuwek drążonych zastosowano metodę elementów skończonych (MES). Użycie oprogramowania MES (Simufact. Forming) w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia pozwoliło na wyznaczenie rozkładów naprężeń, odkształceń, temperatury, kryterium zniszczenia (liczonego wg hipotezy Cockrofta-Lathama), parametrów siłowych, a przede wszystkim na określenie możliwości wytwarzania drążonych odkuwek wałków stopniowanych w oparciu o zaproponowaną metodę.

Weryfikację doświadczalną opracowanej metody kształtowania odkuwek drążonych wykonano w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, wykorzystując w tym celu własnej konstrukcji agregat kuźniczy do obciskania obrotowego, który stanowić będzie podstawę przyszłego urządzenia przemysłowego. Do badań zastosowano kilka zestawów narzędzi w kształcie rolek, umożliwiających realizację procesu obciskania obrotowego drążonych odkuwek wałków elementarnych ze skrajnymi i centralnymi stopniami. Przeprowadzono

również próby kształtowania bardziej złożonych elementów, typu wałki wielostopniowe, sworznie kuliste, kule drążone.

W rezultacie wykonanych obliczeń numerycznych, zweryfikowanych wynikami badań doświadczalnych, potwierdzono zasadność stosowania metody obciskania obrotowego do wytwarzania drążonych półwyrobów z wykorzystaniem wsadów rurowych. W efekcie badań określono również przyczyny zakłócające stabilność przebiegu procesu obciskania. Należą do nich między innymi: niekontrolowany poślizg, deformacja przekroju poprzecznego kształtowanych stopni, rozwalcowanie ścianki, zgniecenie ścianki. Ponadto zauważono, że w procesach przebiegających przy dużych stopniach gniotu ($\delta > 1,8$) występuje niebezpieczeństwo naruszenia spójności materiału na skutek nadmiernego skręcenia kolejnych stopni odkuwki. Należy wówczas realizować proces obciskania w kilku etapach, z mniejszymi wartościami jednostkowych stopni gniotów (przypadających na jedną operację), a także stosować dogrzewanie międzyoperacyjne materiału.

W trakcie badań analizowano wpływ parametrów technologicznych oraz geometrycznych półfabrykatów na przebieg obciskania obrotowego oraz jakość uzyskanych odkuwek. Wyznaczono rozkłady oraz oszacowano wartości parametrów siłowych procesu, niezbędnych do poprawnego opracowania konstrukcji urządzenia i projektowania technologii. Ponadto określono obszary stabilnej realizacji procesu oraz zakres stosowalności technologii obciskania obrotowego. Zaproponowano również kierunki rozwoju technologii obciskania obrotowego. Wskazano, że procesy te mogą być zastosowane do kształtowania stopniowanych wałów z wieńcami zębatymi oraz uzwojeniami ślimaków, a także wytwarzania na trzpieniu elementów drążonych o złożonej geometrii otworu (otwory wielostopniowe, wielowypusty, uzwojenia).

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Metodą obciskania obrotowego możliwe jest kształtowanie drążonych odkuwek stopniowanych osi i wałów z wsadów rurowych w szerokich zakresach grubości ścianek i stopni gniotu.
- Na podstawie obliczeń numerycznych MES stwierdzono, że podczas obciskania obrotowego drążonych odkuwek występuje duża niejednorodność odkształceń, która wynika z kinematyki realizacji procesu. Wraz ze zwiększaniem grubości początkowej ścianki obserwuje się większą niejednorodność odkształceń i koncentrację największych odkształceń w warstwach powierzchniowych kształtowanych stopni.
- Podczas obciskania półfabrykatów rurowych dochodzi głównie do wzrostu grubości ścianki kształtowanych odkuwek oraz zwiększenia długości obciskanych stopni. Intensywność tych przyrostów uzależniona jest od grubości początkowej ścianki zastosowanego półfabrykatu, prędkości kształtowania oraz temperatury realizacji procesu.

- Wyniki symulacji numerycznych wskazują, że podczas obciskania odkuwek o większych grubościach ścianek może dochodzić do powierzchniowego pęknięcia otworu w obszarze kształtowanych stopni. Wartości całki Cockrofta-Lathama w tych strefach są większe od wartości granicznych. Brak jest jednak szerszej wiedzy na temat wpływu złożonego stanu naprężenia (charakterystycznego dla obciskania obrotowego) na wartości graniczne całki Cockrofta-Lathama.
- Proces obciskania obrotowego odkuwek drążonych może zostać zakłócony przez takie zjawiska jak: niekontrolowany poślizg, nadmierne skrócenie kształtowanych stopni, prowadzące do rozdzielenia materiału, rozwalcowanie ścianki obciskanych stopni odkuwki, deformację przekroju poprzecznego oraz wzdłużne pęknięcie ścianki kształtowanych stopni. Możliwość wystąpienia niepożądanych zjawisk uzależnione jest od przyjętych parametrów procesu.
- Opracowana i wykonana konstrukcja urządzenia (agregatu do obciskania obrotowego) umożliwia fizyczne kształtowanie drążonych odkuwek zgodnie z przyjętym schematem procesu w szerokim zakresie parametrów technologicznych, z jednoczesną rejestracją parametrów siłowych i kinematycznych.
- Przeprowadzone próby obciskania obrotowego odkuwek drążonych dały wyniki zbliżone do rezultatów otrzymanych z obliczeń numerycznych.
- Obciskanie obrotowe odkuwek ze skrajnymi przewężeniami jest możliwe w szerokim zakresie grubości względnych ścianek $g_0/D = 0,094 \div 0,26$ i gwarantuje uzyskanie poprawnych wyrobów, wolnych od wad i deformacji.
- Kształtowanie odkuwek ze skrajnymi przewężeniami o niewielkich grubościach ścianek ($g_0/D < 0,094$), przy prędkościach względnych $v/n > 1$ mm/obr jest trudne do zrealizowania oraz obarczone niebezpieczeństwem utraty stateczności ścianki i jej zgnieceniem.
- Zmniejszenie prędkości kształtowania ($v/n < 1$ mm/obr) cienkościennych półfabrykatów ($g_0/D < 0,094$) pozwala na wyeliminowanie zgniecenia obciskanych stopni. Może jednak powodować inną deformację przekroju poprzecznego, która przejawia się silną graniastością przekroju poprzecznego ukształtowanych stopni. Przyczyną zniekształcenia tego typu jest nadmierne wychłodzenie materiału, związane z długim czasem realizacji procesu.
- Możliwe jest kształtowanie zaproponowaną technologią odkuwek drążonych ze stali na zimno. Graniczne wartości gniotów, przy których możliwe jest uzyskanie prawidłowych wyrobów są znacznie mniejsze, niż w procesach realizowanych na gorąco (nie przekraczają najczęściej $\delta \leq 1,1$). Ponadto półfabrykaty przed kształtowaniem powinny być uprzednio poddane zmiękczającej obróbce cieplnej.
- Możliwe jest obciskanie obrotowe drążonych odkuwek ze stopów aluminium i tytanu. Dla tych materiałów proces powinien być prowadzony w kilku etapach z międzyoperacyjnym dogrzewaniem materiału.

- Zrealizowane badania wskazują, że możliwe jest kształtowanie technologią obciskania obrotowego bardziej złożonych elementów (drążone wałki uzębione, ślimaki, pierścienie, kule drążone). Możliwe jest również modyfikowanie opracowanej technologii, co może zwiększyć obszar jej stosowania.
- Celowe jest prowadzenie dalszych badań przedwdrożeniowych i wdrożeniowych, które pozwolą na przemysłowe zastosowanie opracowanej technologii obciskania obrotowego odkuwek drążonych.

Literatura

- [1] Ahmetoglu M., Altan T.: *Tube hydroforming: state of the art and future trends*. "Journal of Materials Processing Technology", 2000, vol. 98, s. 25–33.
- [2] Ahmetoglu M., Sutter K., Li X., Altan T.: *Tube hydroforming: current research*. "Journal of Materials and Technology", 2000, vol. 98, s. 224–231.
- [3] Asnafi N., Nilsson T., Lassl G.: *Tubular hydroforming of automotive side members with extruded aluminum profiles*. "Journal of Materials Processes Technology", 2003, vol. 142, s. 93–142.
- [4] Alzahrani B., Ngaile G.: *Preliminary Investigation of the Process Capabilities of Hydroforming*. "Materials", 2016, 9, 40; doi:10.3390/ma9010040.
- [5] Bartnicki J., Magryta J., Pater Z.: *Zmiany grubości ścianek wyrobów drążonych obciskanych obrotowo*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2010, vol. 55, nr 6, s. 318–322.
- [6] Bartnicki J., Pater Z., Gontarz A., Kazanecki J., Samolýk G.: *The research on rolling-extrusion process of full and hollowed parts*. "Steel Research International". "Special edition: Metal Forming 2008", vol. 1, s. 364–368.
- [7] Bartnicki J., Pater Z., Gontarz A.: *Theoretical analysis of rolling-extrusion process of axi-symmetrical parts*. "Archives of Civil and Mechanical Engineering", 2008, vol. 8, no 2, s. 5–11.
- [8] Bartnicki J., Pater Z., Samolýk G.: *The distributions of wall-thickness of hollowed parts in rolling extrusion process*. "Archives of Metallurgy and Materials", 2009, vol. 54, no 3, s. 659–663.
- [9] Bartnicki J., Pater Z.: *Sposób kształtowania wyrobów drążonych metodą przepychania obrotowego*. Patent RP nr PL219463, 2015.
- [10] Bartnicki J., Pater Z.: *The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts*. Journal of Materials Processing Technology, 2004, vol. 155–156, s.1867–1873.
- [11] Bartnicki J., Pater Z.: *Walcowanie poprzeczno – klinowe wyrobów drążonych*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
- [12] Bartnicki J., Tomczak J., Pater Z.: *Numerical analysis of the cross-wedge rolling process by means of three tools of stepped shafts from aluminum alloy 7075*. "Archives of Metallurgy and Materials", 2015, vol. 60, s. 433–435.
- [13] Bartnicki J.: *Analiza zakresu zastosowań przepychania obrotowego*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2009, nr 11, s.802–805.
- [14] Bartnicki J.: *Analysis of rolling - extrusion process of hydrokinetic joint part*. "Steel Research International", 2012, no Spec. Ed., s. 1407–1410.
- [15] Bartnicki J.: *Badania teoretyczno – doświadczalne procesu walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów drążonych*. Rozprawa doktorska (niepublikowana), Politechnika Lubelska 2005.

- [16] Bartnicki J.: *FEM analysis of hollow hub forming in rolling extrusion process*, „Metalurgija”, 2014, vol. 53, no 4, s. 641–644.
- [17] Bartnicki J.: *Numerical analysis of feed rate influence on hollow hub shape during rolling extrusion process*. „Key Engineering Materials”, 2014, vol. 572, s. 323–326.
- [18] Bartnicki J.: *Proces przepychania obrotowego wałka stopniowanego ze stopu Ti6Al4V*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2009, nr 8, s. 557–558.
- [19] Bartnicki J.: *Studium procesu przepychania obrotowego*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016.
- [20] Bartnicki J.: *The theoretical and experimental research of rolling-extrusion process*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [21] Bartnicki, J., Pater, Z.: *Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft*. „Journal of Materials Processing Technology”, 2005, vol. 164, s. 1154–1159.
- [22] Behrens B. A., Doege E., Reinsch S., Telkamp K., Daehndel H., Specker A.: *Precision forging processes for high-duty automotive components*. „Journal of Materials Processing Technology”, 2007, vol. 185 s. 139–146.
- [23] Behúlová M., Mašek M., Meyer L. W.: *Thermal analysis of in ternally cooled spike for the process of rotary spin extrusion*. „13th International Scientific Conference CO-MAT-TECH 2005”. TRNAVA, 20–21 October 2005. s. 1–11.
- [24] Behúlová M.: *Simulačný model indukčného ohreву pre proces rotačného spätného pretláčania*. „Vedecké práce, Materiálovotechnologickej fakulty v Trnave”, 2003, vol. 15.
- [25] Böhm A., Hartl Ch., Abbey T.: *Process and tool technology for hydroforming: case study and technical and economic considerations*. „Proceedings of the International Conference on Tube Hydroforming, Columbus”, USA, 13–14 June, 2000, s. 123–128.
- [26] Celikov A. I.: *Poperečno – klinovaja prokatka v mašinostreni*. Wydawnictwo Mašinostroenie, Moskva, 1982.
- [27] Chałupczak J., Pacanowski J., Miłek T.: *Badanie możliwości i dobór parametrów technologicznych przy walcowaniu wewnętrznym rur oraz zwężeń rurowych na mimośrodowej walcarce WPM-120*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2000, vol. 45, nr 10–11, s. 552–555.
- [28] Chałupczak J., Pacanowski J., Miłek T.: *Ocena możliwości wykonania zwężeń rurowych metodą obciskania oraz walcowania na walcarce profilowej mimośrodowej WPM-120*. „Rudy i Metale Nieżelazne”. 1998, vol. 43, nr 10, s. 486–490.
- [29] Cieśla M., Junak G., Tomczak J., Findziński R., Kawała T.: *Durability of X10CrMoVNb9-1 steel tubes under low-cycle fatigue and creep conditions after bending with local induction heating*. „Archives of Metallurgy and Materials”, 2015, vol. 60, no 3, s. 1839–1845.
- [30] Davidson J., Balasubramanian M., Tagore K.: *An experimental study on the quality of flow-formed A6061 tubes*. „Journal of Materials Processing Technology”, 2008, vol. 203, s. 321–325 .
- [31] DIN8582 – Manufacturing processes forming – Classification; subdivision, terms and definitions, alphabetical index.

- [32] DIN8583 – Manufacturing processes forming under compressive conditions – Part 1: General; classification, subdivision, terms and definitions.
- [33] DIN8584 – Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions – Part 1: General; classification, subdivision, terms and definitions.
- [34] Dohmann F., Hartl C.: *Hydroforming-applications of coherent FE Simulations to the development of product and processes*. "Journal of Materials and Technology", 2004, vol. 150, s. 18–24.
- [35] Dretkiewicz – Więch J.: *Technologia mechaniczna*. „Techniki wytwarzania”, WSiP, Warszawa 2000.
- [36] Fann K. J., Hsiao P. Y.: *Optimization of loading conditions for tube hydroforming*. "Journal of Materials Processing Technology", 2003, vol. 140, s. 520–524.
- [37] Flehmig T., Schwarz S.: *Hydroforming complex hollow sections*. "Steel Grips", 2003 vol. 6, s. 408–412.
- [38] *Forging machine*. GFM Holding Aktiengesellschaft, Steyr, Austria, US Patent no 5,894,755,1999.
- [39] *Forming and Forging*. "ASM International Handbook", vol. 14, 1996.
- [40] Frąckowiak S.: *Projektowanie procesów technologicznych wytłoczek osiowosymetrycznych na wyoblarkach CNC*. „Obróbka Plastyczna Metali”, 2011, t. 22, nr 1, s. 45–56.
- [41] Groche P., et al.: *Modelling of Incremental Forming Processes*. Tagungsband: NAFEMS World Congress, Como 2001.
- [42] Groche P., Fritsche D., Tekkaya E. A., Allwood J. M., Hirt G., Neugebauer R.: *Incremental Bulk Metal Forming*. "Annals of the CIRP", 2007, vol. 56/2, s. 635–656.
- [43] Groche P., Fritsche D.: *Application and modelling of flow forming manufacturing processes for internally geared wheels*. "International Journal of Machine Tools & Manufacture", 2006, vol. 46, s. 1261–1265.
- [44] Hong C. H., Seo S. H.: *Numerical Analysis on Performance Improvement for Wind Blade by the Groove*. "Journal of the Korean Society of Marine Engineering", 2011, vol. 35, no. 4, s. 475–482.
- [45] Huang X. H., Wang G. C., Zhao G. Q.: *Manufacturing process and die design of a large support shaft*. "Forging Stamping Machines", 2000, vol. 35, no 4, s. 31–37.
- [46] Ji H., Liu J., Wang B., Zheng Z., Huang J., Hu Z.: *Cross-wedge rolling of a 4Cr9Si2 hollow valve: explorative experiment and finite element simulation*. "International Journals Advanced Manufacturing Technology", 2015, vol. 77, s. 15–26.
- [47] Karavelioglu K.: *Computer aided design for tube upsetting*. M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, February 1987.
- [48] Karpiński T.: *Inżynieria produkcji*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [49] Kawai K., Yang L. N., Kudo H.: *A flexible shear spinning of truncated conical shells with a general – purpose mandrel*. "Journal of Materials Processing Technology", 2001, vol. 113, s. 28–33.

- [50] Kettner P., Schmieder F.: *Manufacturing of hollow transmission shafts via bulk – metal forging*. “Journal of Material Processing Technology”, 1997, vol. 71, s. 113–118.
- [51] Koc M., Altan T.: *An overall review of the tube hydroforming (THF) technology*. “Journal of Materials Processing Technology”. 2001, vol. 108, s. 384–393.
- [52] Kocańda, A., Sadłowska H.: *Automotive component development by means of hydroforming: a review*. “Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2008, vol. 8, no 3, s. 55–72.
- [53] KUBOTA IRON WORKS CO., LTD. *Double-acting hydraulic press*. Europejskie zgłoszenie patentowe nr EP 1 420 169, 2003 r.
- [54] KUBOTA IRON WORKS CO., LTD., *Hollow stepped shaft and method Of forming the same*, Patent Application Publication US 2005/0016246 A1.
- [55] Kudo H., Shinozaki K.: *Extrusion of Hollow Component with Additional tension*. “CIRP”, 1970, s. 327–333.
- [56] Kudo H., Takahashi A.: *Extrusion Technology in the Japanese Automotive Industry*. “VDI Bericht”, 1990 no 810, s. 19–35.
- [57] Kuvin B. F.: *Hydroformer evolves into complete source for prototype and short-run sheet*. “Metalforming”, 2002, vol. 12, s. 26–29.
- [58] Lee H. W.: *A Study on Design Optimization of Wind Turbine Rotor Shaft*. “International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering”, 2015, vol. 5, no 11, s. 180–183.
- [59] Lim S. J, Choi H. J., Lee C. H.: *Forming characteristics of tubular product through the rotary swaging process*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2009 vol. 209, s. 283–288.
- [60] Lipski T.: *Kucie na kowarkach*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1979.
- [61] Ma Y., Qin Y., Balendra R.: *Forming of hollow gear-shafts with pressure-assisted injection forging (PAIF)*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2005, vol. 167, s. 294–301.
- [62] Ma Y., Qin Y., Balendra R.: *Upper-bound analysis of the pressure-assisted injection forging of thick-walled tubular components with hollow flanges*. “International Journal of Mechanical Sciences”. 2006, vol. 48, s. 1172–1185.
- [63] Magryta J. *Analiza numeryczna rozkładu grubości ścianek w wyrobach kształtowanych metodą obciskania obrotowego*. W: „Wybrane zagadnienia badawcze obróbki plastycznej i cieplnej metali oraz przetwórstwa tworzyw”. Monografia pod red. Jachowicza T. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2009, s. 51–58.
- [64] Magryta J. *Analiza teoretyczna i doświadczalna procesu kształtowania wyrobów drążonych metodą obciskania obrotowego*. Rozprawa doktorska (niepublikowana) Politechnika Lubelska 2010.
- [65] Magryta J., Pater Z.: *Obciskanie obrotowe wyrobów drążonych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011.
- [66] Maki T., Walter C.: *Liquid curves – Sheet hydroforming helps the sports solstice stand out*. “Stamping Journal”, 2007, vol. 8, s. 32–37.

- [67] Marciniak Z., Kopacz Z.: *WPM and WPMR transverse cold rolling processes*. 1-st International Conference on "Rotary Metal-Working Processes" – London, 1979.
- [68] Mašek B., Meye, L. W., Nový Z.: *Improving of Mechanical Properties of 38MnSiVS5 Steel by Multiple Deformation*. International Conference PEDD 6, Ain Shams University, Dar Elhakim Press, Cairo, 2002, vol. 12, 14.02.2002, Egypt.
- [69] Mašek B., Staňková H., Meyer L. W., Nový Z., Klíber J.: *Structure Refinement in TRIP Steel by Means of Intensive Incremental Deformation for Rotary Spin Extrusion*. "Asia Steel International Conference 2006", Fukuoka, Japan s. 656–661.
- [70] Mašek, B., Neugebauer, R., Mahn, U., Meyer, L. W.: *Integration of a Thermomechanical Treatment into the Spin Extrusion Process*. "Stahl und Eisen", 2004, vol. 124, no 9, s.77–82.
- [71] *Metal Forming Handbook*, Schuler Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1998.
- [72] Meusel J.: Innovative solutions for the cylinder head in modern gasoline engines. www.fh-zwickau.de (luty 2016).
- [73] Michel R., Kreißig R., Ansorge H.: *Thermomechanical finite element analysis (FEA) of spin extrusion*. "Forschung im Ingenieurwesen", 2003, vol. 68, no 1, s. 19–24.
- [74] Mílek T., Kopacz Z.: *Evaluation of the possibility of diameter reduction in MT 1020 steel tubes by rolling on the wpm-120 cold profile eccentric rolling machine*. Międzynarodowa konferencja naukowa METAL 2015, Jun 3rd – 5th 2015, Brno, Czech Republic.
- [75] Mílek T.: *Experimental investigations into one-sided and two-sided bulge forming of steel reducing tubes*. "Steel Research International", special edition: 14th International Conference Metal Forming 2012, s. 543–546.
- [76] Morishita H.: *Innovation of Automobile Parts*. 18th International Forging Conference 2005, s. 210–219.
- [77] Morphy G., Neelwarne A.: *Weight reduction opportunities through innovative hydroforming*. One piece frame rails & hollow camshafts. National Conference on Sheet Metal Forming, "SMF 2007", December 12–13, 2007 Pune, India.
- [78] Music O., Allwood J. M., Kawai K.: *A review of the mechanics of metal spinning*, "Journal of Materials Processing Technology", 2010, vol. 210, s. 3–23.
- [79] Neugebauer R., Glass R., Hoffmann M., Putz M.: *Spin Extrusion - A New Partial Forming Technology based on 7 NC-Axes Machining*. "CIRP Annals Manufacturing Technology", 2005, vol. 54, no.1, s. 241–244.
- [80] Neugebauer R., Glaß R., Meinel S., Popp M.: *Characterization of contact tensions during incremental forming of metal composites*. "International Journal of Material Forming", 2010, vol. 3, s. 667–670.
- [81] Neugebauer R., Glass R., Kolbe M.: *Optimisation of processing routes for cross rolling and spin extrusion*. "Journal of Material of Materials Processing Technology", 2002, vol. 125–126, s. 856–862.
- [82] Neugebauer R., Kolbe M., Glass R.: *New process chains to fabricate hollow shafts by partial forming*. "Production Engineering. Research and Development", 2001, vol. 8, no 2, s. 29–34.
- [83] Neugebauer R., Kolbe M., Glass R.: *New warm forming processes to produce hollow shaft*. "Journal of Material Processing Technology", 2001, vol. 117, s. 277–282.

- [84] Neugebauer R.: *Chosen Research and development activities at the Fraunhofer-IWU Chemnitz*. Overview International Symposium – Advancing the Cross-wedge Rolling. June 22, 2010.
- [85] Neugebauer, R., Glass, R., Hoffmann, M., Putz, M.: *Incremental forming of hollow shapes*. “Steel Research International”, 2005, vol. 76, s. 171–176.
- [86] Ogura A., Murai E.: *Piercing extrusion of long hollow component with subsidiary tension*, Proceedings of the 47th ICFG Plenary Meeting (ICFG2014) Ankara, Turkey, September 21-24, 2014.
- [87] Pater Z., Bartnicki A., Gontarz A., Weroński W. S.: *Numerical Modeling of Cross – Wedge Rolling of Hollowed Shafts*. “Materials Processing and Design, Simulation and Applications”, NUMIFORM 2004, s. 672–677.
- [88] Pater Z., Gontarz A., Samolyk G., Bartnicki J.: *Analysis of cross rolling process of toothed titanium shafts*. “Archives of Metallurgy and Materials”, 2009, vol. 54, no 3, s. 617–626.
- [89] Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., Bulzak T.: *Producing hollow drive shafts by rotary compression*. “Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2015, vol. 15, no 4, s. 917–924.
- [90] Pater Z., Gontarz A., Weroński W. S.: *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno – klinowego*, Polskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2001.
- [91] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: *Cross-wedge rolling of balls*. “Steel Research International”, Special edition: Metal Forming 2008, 2008, vol. 1, s. 369–374.
- [92] Pater Z., Tofil A., Tomczak J.: *Steel balls forming by cross rolling with upsetting*. “Metalurgija”, 2013, no 1, s. 103–106.
- [93] Pater Z., Tofil A.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe wałka ze zgrubieniem końcowym*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2011, nr 8, s. 650–654.
- [94] Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M. R., Pradeep M.: *Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls*. “International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 2013, vol. 67, s. 1–7.
- [95] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Analiza numeryczna procesu obciskania obrotowego drążonego sworznia kulistego*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2015, nr 8, s. 563–568.
- [96] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Forming of hollow shaft forging from titanium alloy Ti6Al4V by means of rotary compression*. “Archives of Metallurgy and Materials”, 2015, vol. 60, nr 1, s. 419–425.
- [97] Pater Z., Tomczak J., Pater P.: *Sposób redukcji średnicy zewnętrznej półfabrykatów rurowych*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.414306, 2015.
- [98] Pater Z., Tomczak J.: *Analiza numeryczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek drążonych ze stopu tytanu Ti6Al4V*. „Obróbka Plastyczna Metali”, 2010, t. XXI, nr. 4, s. 239–247.
- [99] Pater Z., Tomczak J.: *Method for plastic forming of toothed shafts*. Patent europejski nr: EP2422898, 2013.
- [100] Pater Z., Tomczak J.: *Rotary Compression of Hollow Parts by Cross Rolling*. Patent europejski nr: EP2422896, 2013.

- [101] Pater Z., Tomczak J.: *Sposób kształtowania odkuwek drążonych*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.402213, 2012.
- [102] Pater Z., Tomczak J.: *Sposób kształtowania plastycznego wałków z wieńcami zębatym*. Patent polski nr PL 216309, 2013.
- [103] Pater Z., Tomczak J.: *Sposób obciskania obrotowego wyrobów drążonych metodą walcowania poprzecznego*. Patent polski nr PL 216310, 2013.
- [104] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts*. "Metalurgija", 2015, vol. 54, no 4, s. 627–630.
- [105] Pater Z.: *Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a long stepped shaft*. "Key Engineering Materials", 2014, vol. 622-623, s. 893–898.
- [106] Pater Z.: *Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a work holding bolt*. "Metalurgija", 2014, vol. 53, nr 4, s. 653–656.
- [107] Pater Z.: *Finite element analysis of cross wedge rolling*. "Journal of Materials Processing Technology", 2006, vol. 173, s. 201–208.
- [108] Pater Z.: *Numerical modelling of cross wedge – rolling of rotary cutter body*. "Acta Mechanica Slovaca", 2008, no 3A, s. 361–366.
- [109] Pater Z.: *Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting*. "Journal of Materials Processing Technology", 1999, vol. 92–92, s. 468–473.
- [110] Pater Z.: *Podstawy teoretyczne i badania eksperymentalne procesu walcowania klinowo – rolkowego*. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 2007.
- [111] Pater Z.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [112] Pomankin W., Bobuch I., Gribinik W.: *Pole linii skolženija pri prokatkes nerazriwnym polem skorostej*. "Černaja Metalurgija", 1975 nr 7.
- [113] Qin Y., Ma Y., Balendra R.: *Pressurising materials and process design considerations of the pressure-assisted injection forging of thick-walled tubular components*. "Journal of Materials Processing Technology", 2004, vol. 150 s. 30–39.
- [114] Quigley E., Monaghan J.: *Metal forming: an analysis of spinning processes*. "Journal of Materials Processing Technology", 2000, vol. 103, s. 114–119.
- [115] Rajanish P., Singhal R. P.: *Shear spinning of technology for the manufacture of long thin wall tubes of small bore*. "Journal of Materials Processing Technology", 1995, vol. 54, s. 186–192.
- [116] Razani N. A., Jalali A. A., Mollaei D. B.: *Experimental study on flow forming process of AISI 21 steel tube using Taguchi method*. "Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", Part B: J. Eng. Manuf. 2011, vol. 225, no 11, s. 2024–2031.
- [117] Recker D., Franzke M., Hirt G.: *Forged hollow shafts for wind power drives*. 1 Conference for Wind Power Drives, Aachen 2013, s. 199–214.
- [118] Rosenstock D., Recker D., Franzke M., Hirt G., Sommler D., Steingießer K. J., Tewes A., Rech R., Gehrman B., Kirchhof S., Lamm R.: *Online – Visualisation during Open Die Forging and Optimisation of Pass Schedules*, "Steel Research International", 2013, vol. 85, no. 9, s. 1348–1354.

- [119] Roy, M. J., Majjer D. M., Klassen R. J., Wood J. T., Schost E.: *Analytical solution of the tooling / workpiece contact interface shape during a flow forming operation*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2010, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.07.011.
- [120] Ruszaj A., *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*. Wydawnictwo IOS, Kraków 1999.
- [121] Schuster A., Raedt H. W., Tekkaya A. E.: *The Fibre Flow in Steel before and after Cold Upsetting*. In: Proc. of 43rd Plenary Meeting of the International Cold Forging Group ICFG. 12–15 Sept. 2010, Darmstadt, Germany.
- [122] Simufact.material 2012. 0.0.14871, simufact engineering gmbh, Hamburg.
- [123] Skubisz P., Lisiecki Ł., Sińczak J.: *Studies of the quality and cost-effectiveness of a novel concept of open-die forged powerplant main shaft*. “Metalurgija”, 2015, vol. 54 no. 2, s. 339–342.
- [124] Sun B., Zeng X., Shu X., Peng W., Sun P.: *Feasibility Study on Forming Hollow Axle with Multi-wedge Synchrostep by Cross Wedge Rolling*. “Applied Mechanics and Materials”, 2012, vol. 201–202, s. 673–677.
- [125] Tofil A., Tomczak J., Bulzak T.: *Numerical and experimental study on producing aluminum alloy 6061 shafts by cross wedge rolling using a universal rolling mill*. “Archives of Metallurgy and Materials”, 2015, vol. 60, no 2, s. 801–807.
- [126] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J.: *Symulacje numeryczne procesu obciskania obrotowego wielostopniowego wałka drążonego*. „Przegląd Mechaniczny”, 2012, nr 2 s. 37–41.
- [127] Tomczak J., Bulzak T., Pater Z.: *A method for producing hollow shafts by rotary compression using a specially designed forging machine*. “Archives of Metallurgy and Materials”, 2015, vol. 60, no 3, s. 1745–1753.
- [128] Tomczak J., Bulzak T., Pater Z.: *The effect of billet wall thickness on the rotary compression process for hollow parts*. “Strojniski Vestnik - Journal of Mechanical Engineering”, 2015, vol. 61, no 3, s. 149–156.
- [129] Tomczak J., Pater Z. Sprawozdanie z prac wykonanych w ramach projektu badawczego nr 6234/B/T02/2011/40 *Badania procesu obciskania obrotowego wyrobów drążonych*. Politechnika Lubelska, Lublin 2014.
- [130] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J.: *Analiza numeryczna procesu walcowania wałków drążonych z uzębieniami*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2011, nr 8, s. 678–681.
- [131] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J.: *Skrew rolling of balls in multiple helical impressions*. “Archives of Metallurgy and Materials”, 2013, vol. 58, no 4, s. 1072–1076.
- [132] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Designing of screw impressions in the helical rolling of balls*. “Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2014, vol. 14, no 1, s. 104–113.
- [133] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T., *Sposób kształtowania plastycznego wałków ze ślimakami*. Polskie zgłoszenie patentowe nr. P.216309, 2015.
- [134] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Analiza numeryczna kształtowania drążonych odkuwek z uzwojeniami ślimaka*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2015, nr 11, s. 582–586.

- [135] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Effect of technological parameters on the rotary compression process*. "Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability", 2013, vol. 15, no 3, s. 279–283.
- [136] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Kształtowanie odkuwki drążonego wałka uzębionego w procesie obciskania obrotowego*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2014, nr 2, s. 76–81.
- [137] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Obciskanie obrotowe osiowosymetrycznych odkuwek drążonych*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2014, nr 7, s. 416–420.
- [138] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Obciskanie obrotowe walcami mimośrodowymi odkuwek pierścieni*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2014, nr 2, s. 92–98.
- [139] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Sposób obciskania odkuwek drążonych*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.405864, 2013.
- [140] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *The influence of hollow billet thickness in rotary compression*. "International Journal of Advanced Manufacturing Technology", 2016, vol. 82, no 5, s. 1281–1291.
- [141] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Wpływ parametrów technologicznych na przebieg procesu obciskania obrotowego wielostopniowego wałka drążonego*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2013, nr 8, s. 602–606.
- [142] Tomczak J., Pater Z., Gontarz A., Hadasik E., Cieśla M., Mutwil K., Rzepka W., Kawała T.: *Geometrical phenomena in tube bending with local induction heating*. "Key Engineering Materials", 2014, vol. 622-623, s. 717–724.
- [143] Tomczak J., Pater Z.: *Analysis of metal forming process of a hollowed gear shaft*. "Metalurgija", 2012, vol. 51, no 4, s. 497–500.
- [144] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J.: *Modelowanie numeryczne procesu walcowania wielostopniowego uzębionego wałka drążonego*. „Mechanik”, 2011, vol. 84, nr 11, s. 894–899.
- [145] Tomczak J., Pater Z.: *Apparatus for Rotary Compression of Hollow Parts*. Patent europejski nr: EP2422897, 2013.
- [146] Tomczak J., Pater Z.: *Sposób obciskania obrotowego uzębień wewnętrznych*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398591, 2012.
- [147] Tomczak J., Pater Z.: *Sposób obciskania obrotowego wyrobów z gwintami wewnętrznymi*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398592, 2012.
- [148] Tomczak J., Pater Z.: *Symulacje numeryczne procesu obciskania obrotowego wielostopniowego wałka drążonego*. „Przegląd Mechaniczny”, 2012, nr 2 s. 37–41.
- [149] Tomczak J., Pater Z.: *Urządzenie do obciskania obrotowego wyrobów drążonych*. Patent polski nr PL 216312, 2013.
- [150] Tomczak J.: *Rotary compression process for producing toothed hollow shafts*. "Metalurgija", 2014, vol. 53, nr 4, s. 649–652.
- [151] Tschaetsch H.: *Metal Forming Practise*. "Processes – Machines – Tools". Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [152] U.S. Manufacturing Corporation, *Engineered Extruded Tubular Products*, COMPANY PROFILE (2009). www.usmfg.com.

- [153] Urankar S., Lovell M., Morrow C, Li Q., Kawada K.: *Establishment of failure conditions for the cross-wedge rolling of hollow shafts*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2006, vol. 177, s. 545–549.
- [154] Vasim A. S., Lokesh A., B.: *A Review of Cold Forging*. “Engineering”, 2015, vol. 4, s. 2277–8179.
- [155] Vollertsen F.: *Accuracy in process chains using hydroforming*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2000, vol. 103, s. 424–433.
- [156] Wang G. C., Zhao G. Q., Huang X. H, Jia Y. X.: *Analysis and design of a new manufacturing process for a support shaft using the finite element method*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2002, vol. 121, s. 259–264.
- [157] Wang L., Long H.: *A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning*. “Journal of Materials Processing Technology”, 2011, vol. 211, s. 2140–2151.
- [158] Wasiunyk P.: *Kucie matrycowe*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1968.
- [159] Wasiunyk P.: *Kucie na kuźniarkach*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1973.
- [160] Weidel S., Raedt H., W., Linder G.: *Intelligent lightweight design by forged transmission components*. Hirschvogel Umformtechnik GmbH, Germany, www.massiverleichtbau.de, (luty 2016).
- [161] Winiarski G., Gontarz A, Pater Z.: *A new process for the forming of a triangular flange in hollow shafts from Ti6Al4V alloy*. “Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2015, vol. 15, no 4, s. 911–916.
- [162] Wolfgarten M., Rosenstock D., Schaeffer L., Hirt G.: *Implementation of an open-die forging process for large hollow shafts for wind power plants with respect to an optimized microstructure*. “La Metallurgia Italiana”, 2015, vol. 4, s. 43–49.
- [163] Wong C.C., Dean T.A., Lin J.: *A review of spinning, shear forming and flow forming processes*. “International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 2003, vol. 43, s. 1419–1435.
- [164] www.agfm.com (wrzesień 2015).
- [165] www.bar-us.com (lipiec 2015).
- [166] www.brooksforgings.co (luty 2016).
- [167] www.firearmsid.com (luty 2016).
- [168] www.gfu-forming.de (styczeń 2016).
- [169] www.glyne.com (maj 2016).
- [170] www.hirschvogel.com (maj 2016).
- [171] www.hmp.de (maj 2016).
- [172] www.iwu.fraunhofer.de (sierpień 2015).
- [173] www.kubota-iron-works.com (kwiecień 2016).
- [174] www.lasco.de (maj 2016).
- [175] www.learnersbook.com (marzec 2016).

- [176] www.metalltechnik-menges.de (maj 2016).
- [177] www.mjcengineering.com (luty 2016).
- [178] www.repkon.com.tr (marzec 2016).
- [179] www.scotforge.com (marzec 2016).
- [180] www.slideplayer.com, *Forging of Metals*. 14.1 Introduction Forging: a Process in which the work- piece is shaped by compressive forces applied through various dies (lipiec 2015).
- [181] www.smeral.cz (maj 2016).
- [182] www.sms-meer.com (kwiecień 2016).
- [183] www.steel-forge.com (marzec 2016).
- [184] www.thefabricator.com (wrzesień 2015).
- [185] Yang C., Hu Z.: *Research on the ovality of hollow shafts in cross wedge rolling with mandrel*. "International Journal Advanced Manufacture Technology", 2016 vol. 83, s.67–76.
- [186] Yang Y., Chen J., Cheng F., ZhaoJ.: *Study on the forming mechanism for second step on hollow rotor shaft by 4-roll cross wedge rolling*. "Applied Mechanics and Materials", 2013, vol. 288, s. 271–275.
- [187] Yoshimura H., Wang C. C.: *Manufacturing of Dies for Precision Forging*, Proc. 1st JSTP Int. Seminar on Precision Forging, 1997, vol. 15, s. 1–7.
- [188] Zawora J.: *Podstawy technologii maszyn*. WSiP, Warszawa 2000.
- [189] Zhang Q., Wu C., Zhao S.: *Less Loading Tube-Hydroforming Technology on Eccentric Shaft Part by Using Movable Die*. "Materials Transactions", 2012, vol. 53, no 5 s. 820–825.
- [190] Ziółkiewicz S., Czartoryska I., Gronowski W.: *Badania procesu redukowania średnicy końca rury metodą obciskania*. Obróbka plastyczna metali, 2008, tom XIX, nr 1, s. 21–27.