



Jarosław Bartnicki

Studium procesu przepychania obrotowego

The Study of Rolling-Extrusion Process

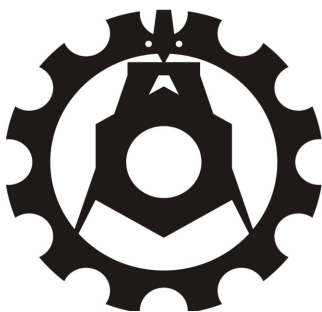
M
O
N
O
G
R
A
F
I
E



Studium procesu przepychania obrotowego

The Study of Rolling-Extrusion Process

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Jarosław Bartnicki

Studium procesu przepychania obrotowego

The Study of Rolling-Extrusion Process



Politechnika Lubelska
Lublin 2014

Recenzent:
prof. dr hab. inż. Jan Kazanecki

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2014

ISBN: 978-83-7947-086-0

Wydawca: Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin
Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej
Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej
ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl
www.biblioteka.pollub.pl
Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak
www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl
Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	6
Streszczenie	7
Abstract	8
1. Wprowadzenie	9
2. Analiza stanu zagadnienia	13
3. Analiza numeryczna procesu przepychania obrotowego.....	37
4. Konstrukcja, budowa i certyfikacja prototypowego agregatu do przepychania obrotowego PO-1 oraz PO-2.....	61
5. Badania procesu kształtowania w agregacie PO-1	81
6. Poszerzony zakres zastosowania technologii przepychania obrotowego – agregat PO-2	101
7. Podsumowanie.....	137
Literatura.....	141
Dodatek.....	147

Wykaz wybranych oznaczeń

- α – kąt kształtujący rolek
 δ – stopień redukcji przekroju
 Δ – owalizacja (trójkątowanie)
 v – prędkość liniowa popychacza
 ω – prędkość obrotowa rolek
 μ – współczynnik tarcia
 D – średnica wyrobu
 D_F – zredukowana średnica wyrobu
 D_{max} – maksymalna średnica wyrobu
 D_{min} – minimalna średnica wyrobu
 D_{nom} – nominalna średnica wyrobu
 d_0 – średnica wsadu
 D_R – średnica rolek
 D_W – średnica wsadu
 g – grubość ścianki wsadu
 L – długość strefy kalibrowania
 m – czynnik tarcia
 p – posuw na obrót
 Q_C – siła osiowa
 q_c – nacisk popychacza
 r – promień zredukowanego stopnia wyrobu
 R_a – chropowatość
 S_{RZ} – pole powierzchni kontaktu materiału z rolkami roboczymi

STUDIUM PROCESU PRZEPYCHANIA OBROTOWEGO

Jarosław Bartnicki

Streszczenie: Jedną z nowych technologii kształtowania stopniowanych wyrobów pełnych i drążonych, obok walcowania poprzeczno-klinowego, jest przepychanie obrotowe. W procesie tym materiał jest kształtowany za pośrednictwem trzech obracających się narzędzi rolkowych. Wsad wprowadzany jest do przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami za pomocą popychacza wykonującego równocześnie ruch postępowy i obrotowy. W przedstawionych w pracy badaniach numerycznych określono wpływ kształtu narzędzi oraz podstawowych parametrów kinematycznych procesu na jego przebieg. W obliczeniach stosowano komercyjny pakiet oprogramowania MSC.SuperForm 2005 oraz Deform – 3D oparty na metodzie elementów skończonych. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych stwierdzono, że stabilność procesu przepychania obrotowego jest uzależniona od doboru właściwego kształtu i prędkości obrotowej rolek profilowych oraz ustawienia prędkości liniowej popychacza wprowadzającego materiał do przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami. Wyniki badań numerycznych stały się podstawą do opracowania założeń agregatu do przepychania obrotowego. Na podstawie obliczeń numerycznych przebiegu procesu przepychania obrotowego oraz analiz wytrzymałościowych z zakresu sztywności konstrukcji zaprojektowano i wykonano prototypowe agregaty do przepychania obrotowego PO-1 oraz PO-2. Maszyny te umożliwiły przeprowadzenie badań doświadczalnych o charakterze weryfikacyjnym w stosunku do wcześniejszego etapu symulacji numerycznych kształtowania wyrobów pełnych i drążonych. Uwzględnienie płynących z tych badań wniosków pozwoliło na zaprojektowanie procesów technologicznych przepychania obrotowego. Pomyślne rezultaty prób doświadczalnych pozwoliły sprawdzić w praktyce wnioski płynące z badań opisanych we wcześniejszych rozdziałach pracy. Innym efektem prowadzonych analiz było ustalenie dalszego kierunku rozwoju technologii przepychania obrotowego, do czego konieczna będzie dalsza modernizacja agregatu.

THE STUDY OF ROLLING-EXTRUSION PROCESS

Jarosław Bartnicki

Abstract: One of the newest technologies of forming of stepped full and hollowed products, apart from cross-wedge rolling, is rolling extrusion. In this process material is formed by means of three rotating tools rolls. Billet is put into workspace between rolls by means of a pusher, which moves in translational motion and rotates at the same time. Influence of tools shape and basic kinematics parameters of the process on its course is presented in numerical research discussed in this work. Commercial software MSC.SuperForm 2005 and Deform 3D, based on finite element method, were used in calculations. On the basis of conducted numerical research, it was stated that rolling extrusion process stability depends on choice of proper shape and rotary velocity of profiled rolls and on linear velocity of the pusher placing the material into workspace between rolls. Results of numerical research were the basis for working out assumptions of aggregate for rolling extrusion. Numerical calculations of rolling extrusion process course and strength analyses within the range of construction stiffness allowed for designing and manufacturing of a prototype aggregates for rolling extrusion, called PO-1 and PO-2. These machines allow conducting experimental research of verifying character in comparison with the former stage of numerical simulations of full and hollowed products. Considering results of this research, it was possible to design technological processes of rolling extrusion. Satisfactory results of experimental tests allowed to check in practice conclusions drawn from works described in earlier chapters. Another effect of conducted analyses was determining further direction of rolling extrusion technology development, in which modernization of aggregate will be needed.

1. Wprowadzenie

Ostatni wiek przyniósł bardzo dynamiczny rozwój wszelkich dziedzin życia. Wraz z nim powstały nowe gałęzie nauki, a globalny wyścig technologiczny doprowadził do bardzo szybkiego rozwoju różnorodnych technik wytwarzania. Światowe koncerny wytwórcze, po etapie wielkich, niekiedy nie do końca przeanalizowanych ekonomicznie, inwestycji, zaczęły redukować ponoszone koszty własne. Tendencje te zostały dodatkowo zaostrzone chwilowo słabszą koniunkturą gospodarczą oraz koniecznością wzajemnej rywalizacji w celu utrzymania się na rynkach. Ofiarami tego cięcia kosztów wytwarzania stały się na początku małe, niemające dostatecznej siły przebicia firmy, które nie były w stanie sprostać konkurencji. Z tego względu, w krajach UE, pojawił się szereg programów dotacji mających na celu aktywizację tego typu przedsiębiorstw celem utrzymania ich pozycji rynkowej oraz zachowania oferowanych miejsc pracy. Warunkami uzyskania środków finansowych stało się m.in. wdrożenie innowacyjnych technologii oraz parku maszynowego gwarantującego możliwie wysoką jakość produktu oraz usługi. W kolejnych programach unijnych rozwiązania te połączono z działalnością badawczo-rozwojową tworząc możliwość bezpośredniej współpracy świata przemysłu i nauki. W ten sposób silnie uwypuklono rolę opracowywania nowych technologii oraz udoskonalania istniejących rozwiązań w rozwoju gospodarki.

W zakresie mechaniki i budowy maszyn gwałtowny rozwój technologii wytwórczych mamy już za sobą. Obecnie prowadzone prace badawcze zmierzają raczej do optymalizacji parametrów prowadzonych procesów, ich pełnej automatyzacji oraz uzyskania możliwie wysokich parametrów eksploatacyjnych wyrobów gotowych przy możliwie najniższych nakładach finansowych. I tak, w przypadku produkcji jednostkowej i małoseryjnej metalowych części mechanicznych dominującą rolę, ze względu na koszty oraz elastyczność produkcji, odgrywają technologie związane z obróbką skrawaniem. Skupiając się na wyrobach wytwarzanych w większych partiach tradycyjnym wyborem pozostawało do niedawna odlewnictwo oraz różnorodne metody plastycznego kształtowania. Aktualnie, ze względu na ekologię oraz na niezadawalające charakterystyki mechaniczne wyrobów odlewanych tradycyjnie, w coraz szerszym stopniu technologia ta jest wycofywana. Alternatywą pozostają tu stale rozwijane technologie plastycznego kształtowania, zapewniające ciągłą strukturę włókien metalu oraz relatywnie najwyższe własności mechaniczne wyrobów.

Obecnie jednym z głównych celów nowoczesnych technik obróbki plastycznej metali jest ograniczenie kosztów wytwarzania, w których bardzo istotną rolę odgrywa wytworzenie oprzyrządowania specjalistycznego. Pozycja

ta w kosztorysie znacząco podnosi jednostkowe nakłady finansowe oraz przesuwają próg opłacalności produkcji na partie wyrobów rzędu kilku-kilkunastu tysięcy sztuk. Marginalnym wyjątkiem pozostaje tu produkcja lotnicza, w której, ze względu na bardzo restrykcyjne przepisy, metodami kucia matrycowego wykonywane są czasami pojedyncze odkuwki noszące status części krytycznych.

Elementy takie jak stopniowane wałki i osie występują w przemyśle w bardzo szerokim zakresie aplikacyjnym. Najbardziej reprezentatywną grupą odbiorców tego typu wyrobów są koncerny motoryzacyjne stosujące te elementy w układach silnikowych oraz przeniesienia napędu. W tym sektorze możemy mówić o produkcji masowej tych wyrobów. W krótszych seriach produkcyjnych stopniowane osie i wały trafiają do sektora maszynowego, lotniczego, rolniczego itp. Przy ograniczaniu długości serii produkcyjnych lub przy wariantowości stosowanych rozwiązań mechanicznych koszty stosowania obróbki plastycznej zaczynają znacząco wzrastać. Ta prosta zależność zmniejsza niestety zainteresowanie przemysłu stosowaniem technologii plastycznego kształtowania kosztem rosnącego udziału obróbki skrawaniem oraz najnowszych technologii wytwórczych związanych m.in. z drukowaniem 3D.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono jedną z alternatywnych możliwości poszerzenia zakresu stosowania technologii obróbki plastycznej na krótkie serie stopniowanych wyrobów osiowosymetrycznych typu osie, wały oraz piasty. Wyroby te mogą posiadać dodatkowo uzębienie lub być kształtowane z zastosowaniem trzpieni wewnętrznych o zróżnicowanym zarzysie.

Przedstawiona metoda przepychania obrotowego wywodzi się wprost z poprzedzających ją badań walcowania poprzeczno – klinowego (WPK) prowadzonych w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zbigniewa Patera. Analizy teoretyczne oraz badania doświadczalne procesów walcowania poprzecznego dały podstawę do prowadzenia dalszych prac nad doskonaleniem technologii obróbki plastycznej wykorzystujących podobny schemat kształtowania. Badania nad technologią przepychania obrotowego zrealizowano przy pomocy środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach dwóch udzielonych projektów badawczych.

W założeniach technologia przepychania obrotowego umożliwia kształtowanie stopniowanych wałów, osi i piast w wersjach pełnych i drażonych bez ograniczenia ich długości, co w technologiach WPK wynika wprost z szerokości narzędzi klinowych. Ponadto, możliwość zmiany rozstawu stosowanych w procesie przepychania obrotowego trzech narzędzi roboczych rolek pozwala na ustalone programem regulowanie średnic wyrobów kształtowanych. Oczywiście, oprócz komplikacji konstrukcyjnych z przeniesieniem napędu na trzy narzędzia rolkowe oraz popychacz wprowadzający wsad do przestrzeni roboczej i trzpień ograniczający jego płynięcie wzdłużne, technologia ta wymaga ściśle osiowego prowadzenia wsadu. Badania laboratoryjne wskazują, że zadanie to nie jest proste, a błędy pozycjonowania przekładają się wprost na toleran-

cje wymiarowe wyrobów gotowych. Stąd też przepychanie obrotowe oprócz oferowanych zalet (w stosunku do WPK) posiada także pewne ograniczenia, z których najpoważniejszym wydaje się być zapewnienie możliwie wysokiej powtarzalności produkcji. Odrębnym zagadnieniem pozostaje także wydajność związana bezpośrednio ze stosowanymi parametrami technologicznymi oraz długością kształtowanych wyrobów.

Na chwilę obecną przeprowadzone badania wskazują na możliwość wdrożenia nowej technologii kształtowania w warunkach zakładu przemysłowego. Jednym z potencjalnie analizowanych zastosowań jest produkcja wałków do maszyn rolniczych. Z uwagi na łatwość regulacji średnicy stopni wyrobów kształtowanych możliwe jest wykorzystywanie tego rozwiązania w regeneracji maszyn, gdzie stosowane są wałki, osie i piasty o często zróżnicowanych wymiarach. Wprowadzenie obróbki plastycznej umożliwia tu podniesienie trwałości i wytrzymałości tych elementów. Ewentualne wprowadzenie w konstrukcji agregatu do przepychania obrotowego zintegrowanego nagrzewu indukcyjnego umożliwi ograniczenie zużycia energii do nagrzewania wyłącznie strefy kształtowanej oraz minimalizuje zasięg obszaru zmian strukturalnych w wyrobie.

Opracowanie części teoretycznej z badaniami numerycznymi oraz części doświadczalnej, realizowanej w laboratorium, wymagało oparcia na szerokich doświadczeniach całego zespołu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej, któremu w tym miejscu składam serdeczne podziękowania za pomoc i wsparcie. Specjalne wyrazy wdzięczności za stałą inspirację do prowadzenia badań kieruję na ręce prof. dr hab. inż. Zbigniewa Patera oraz prof. dr hab. inż. Jana Kazaneckiego, który, jako recenzent wniósł do opracowania cenne uwagi i spostrzeżenia.

Autor

2. Analiza stanu zagadnienia

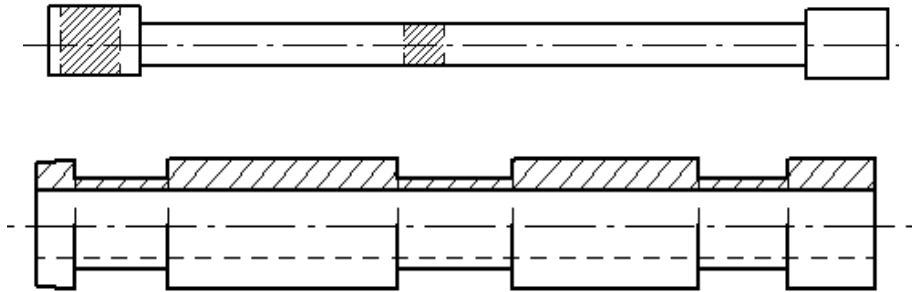
2.1. Stopniowane wyroby osiowosymetryczne – rodzaje i zastosowania

Stopniowane elementy osiowosymetryczne typu osie i wały stosowane są w różnych gałęziach przemysłu już od powstania pierwszych maszyn czy narzędzi do obecnie produkowanych najbardziej zaawansowanych technicznie konstrukcji branży lotniczej. Z biegiem lat technologie wytwórcze tych wyrobów ulegały sukcesywnemu udoskonalaniu, przechodząc bardzo gwałtowny rozwój w ubiegłym stuleciu. Jak wspomniano w rozdziale poprzednim, stopniowane osie i wały wytwarzane są różnymi metodami, w zależności od uwarunkowań wewnętrznych producenta, wielkości produkcji, stabilności rynków zbytu, czy też jednostkowych kosztów wytworzenia, stanowiących obecnie jeden z głównych czynników decydujących w tym zakresie.

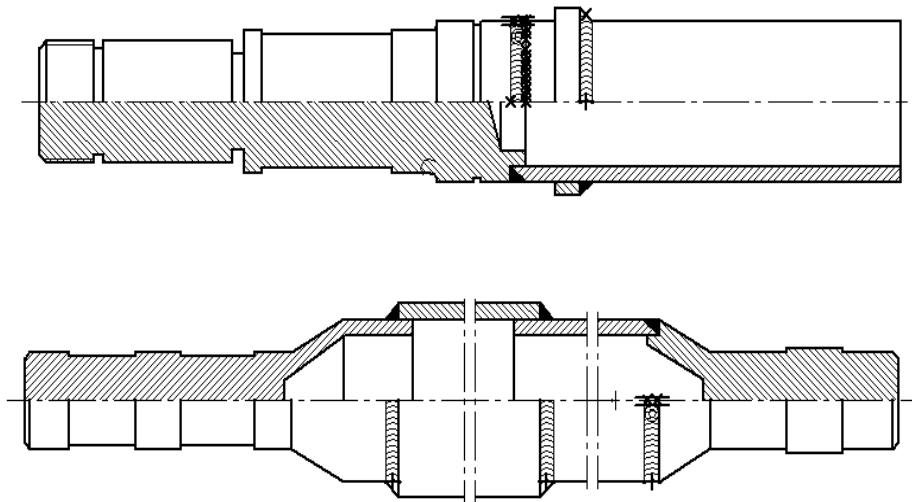
Aby zobrazować o jak wielkim rynku zbytu mówimy, wystarczy podać dane z GKN Automotive A.G z Niemiec, który podaje, że produkcja samochodów w skali globalnej wynosiła w roku 2007 około 60 milionów, natomiast w roku 2010 już 77 milionów sztuk [30]. Biorąc pod uwagę fakt, iż każdy samochód osobowy posiada minimum dwie półosie napędowe, a cieszące się ostatnio dużą popularnością samochody z napędem na cztery koła – cztery półosie, to zapotrzebowanie tylko rynku samochodów osobowych wynosi około 130 milionów elementów tego typu. Dodatkowo w samochodach z napędem na cztery koła konieczne jest przekazanie napędu do drugiej osi za pośrednictwem wału napędowego, co dodatkowo zwiększa zapotrzebowanie na takie wyroby. Przykład napędu na cztery koła występujący w samochodach osobowych przedstawiono na rys. 2.1, zaś wyroby osiowosymetryczne znajdujące zastosowania w różnych gałęziach przemysłu zestawiono na rys. 2.2.

W przemyśle motoryzacyjnym najpowszechniej stosowane do niedawna półosie o przekroju pełnym zastępowane są obecnie wyrobami drążonymi, wykonywanymi przy wykorzystaniu różnych technologii wytwórczych i montażowych [1,2]. Najprostszą z nich jest przelotowe wiercenie wałków pełnych, dokonywane w celu obniżenia ich masy i momentu bezwładności, co przedstawiono na rys. 2.3. Następną możliwą do zastosowania technologią jest wytwarzanie wałków drążonych z dwóch lub trzech półfabrykatów łączonych później w jedną całość [32,45,46].

Części składowe mogą być w tym wypadku wykonywane głównie na drodze obróbki mechanicznej i wyciskania przeciwbieżnego. Schematyczne oraz rzeczywiste przykłady takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 2.4 oraz rys. 2.5.



Rys. 2.3. *Walek pełny i walek wiercony przelotowo: walek pełny (powyżej)
walek wiercony przelotowo (poniżej)*



Rys. 2.4. *Przykładowe konstrukcje wałków drążonych wykonywanych z półfabrykatów: walek drążony spawany z częścią pełną (powyżej), stopniowany walek drążony – połączenia spawane (poniżej)*



Rys. 2.5. Wybrane model wałków drążonych jednolitych oraz łączonych z półfabrykatów [90, 91]

2.2 Metody wytwarzania

2.2.1 Obróbka skrawaniem

Wciąż najpopularniejszą metodą wytwarzania wałków czy osi jest ich obróbka mechaniczna, polegająca na zdejmowaniu wierzchnich warstw materiału z pręta okrągłego, stanowiącego materiał wsadowy do kolejnych operacji skrawania. Technologia ta jest z powodzeniem stosowana nawet w warunkach najmniejszych firm i warsztatów, gdzie tokarka uniwersalna jest jednak coraz częściej wypierana przez urządzenia sterowane numerycznie CNC, pozwalające na znaczne poszerzenie zakresu możliwych do wykonania operacji obróbkowych. Rozwiązanie to umożliwia także osiągnięcie wysokiego poziomu dokładności i powtarzalności produkcji. Należy jednak pamiętać, że podczas wyboru obróbki skrawaniem konieczne jest uwzględnienie strat materiału na naddatki technologiczne w poszczególnych etapach produkcji, jak również na obróbkę wykańczającą w celu uzyskania wymaganych wymiarów wyrobu. Na przykład dla toczenia zgrubnego wielkość naddatków mieści się w granicach od 2 mm do ok. 6 mm, natomiast naddatki na obróbkę kształtującą zawierają się w przedziale 0,7÷1,5 mm. Naddatki te podano w takich granicach ze względu na to, że są one dobierane dla określonych przedziałów średnic oraz długości półfabrykatu [46,77,78].

2.2.2 Obróbka plastyczna

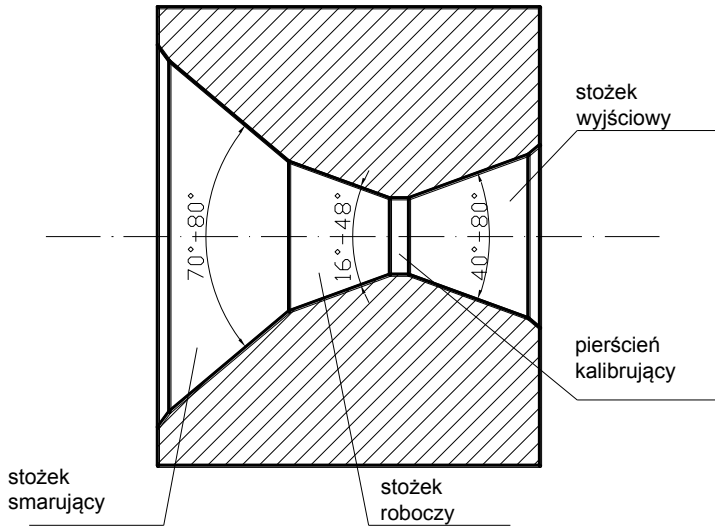
Szukając nowatorskich rozwiązań w procesie kształtowania części maszyn, szczególną uwagę obejmujemy dział obróbki plastycznej, gdyż elementy wytworzone w tej technologii posiadają ciągły układ włókien. Ponadto, porównując materiał poddany obróbce plastycznej z materiałem po obróbce skrawaniem łatwo zauważyć, że struktura zewnętrznych warstw materiału zostaje umocniona poprzez zgmiot. Umocnienie to również przekłada się na większą wytrzymałość materiału szczególnie u podstawy kształtowanego profilu.

Pośród metod wytwarzania elementów osiowosymetrycznych, bazujących na kształtowaniu plastycznym, na uwagę zasługują:

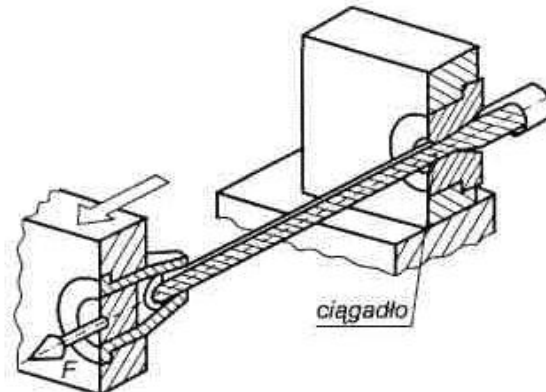
- ciągnięcie;
- przepychanie;
- kucie tradycyjne, na kowarkach, obrotowe;
- wyciskanie na zimno;
- kształtowanie materiałów spiekanych.

Dobór wybranych technologii wytwórczych do konkretnych potrzeb podyktowany jest oczywiście względami ekonomicznymi związanymi z wielkością i stabilnością zamówień. Każda z wyżej wymienionych metod wytwarzania posiada pewne ograniczenia oraz zalety predysponujące ją do ściśle określonych zastosowań. Decydujące znaczenie odgrywają tu jednostkowe koszty wytworzenia, w których uwzględnia się wszystkie ponoszone przez potencjalnego producenta nakłady finansowe. Innym, bardzo ważnym aspektem, który należy wziąć pod uwagę, jest powtarzalność produkcji. Dopuszczalne tolerancje grubości ścianek cienkich rur wraz z wąskimi tolerancjami wymiarowymi kształtu są niezmiernie trudne do zachowania. Jeżeli wytwarzany element pełny lub drażony ma spełniać rolę wysokoobrotowego wałka maszynowego, to zakładanej (wysokiej) dopuszczalnej prędkości obrotowej, odpowiada bardzo niewielkie pole tolerancji wymiarowej wyrobu gotowego. Części spełniające takie wymagania można uzyskiwać np. technologią ciągnięcia, którą cechuje bardzo wysoka jakość powierzchni zewnętrznej, porównywalna z powierzchniami polerowanymi oraz bardzo wąskie tolerancje wymiarowe [64]. Ponadto, poprzez odpowiednią obróbkę cieplną metalu przed procesem ciągnięcia istnieje możliwość uzyskania wyrobów cechujących się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi i zmęczeniowymi, przy zachowaniu dobrych własności plastycznych [43,46]. Proces polega na wydłużeniu przedmiotu przy użyciu ciągadeł (rys. 2.6 i rys. 2.7), jednak siła działa na nieodkształconą część materiału. Zmiana wymiarów lub kształtów następuje na części długości obrabianego przedmiotu. Materiał wsadowy

w trakcie tego procesu jest ściskany, przez co proces ten posiada znaczne ograniczenia, co do wartości działającej siły, która nie może być większa od siły potrzebnej do uplastycznienia nieodkształconego odcinka półfabrykatu, gdyż po przekroczeniu tej wartości może zostać zniekształcony.



Rys. 2.6. Schemat ciągadła [31]

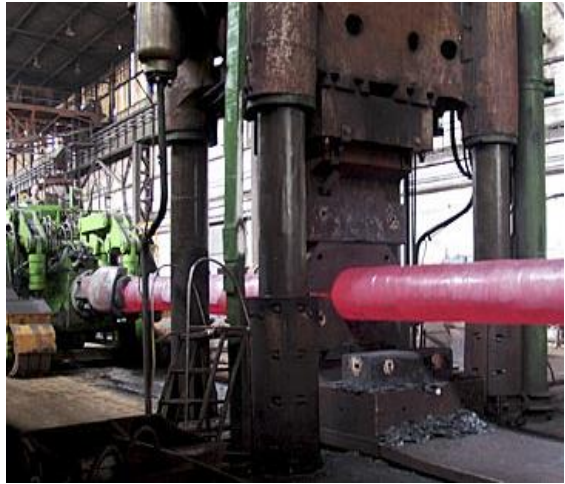
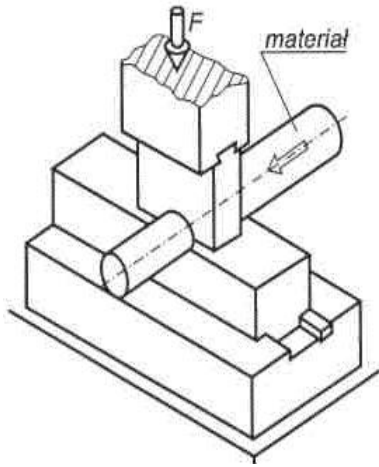


Rys. 2.7. Schemat ciągnięcia [31]

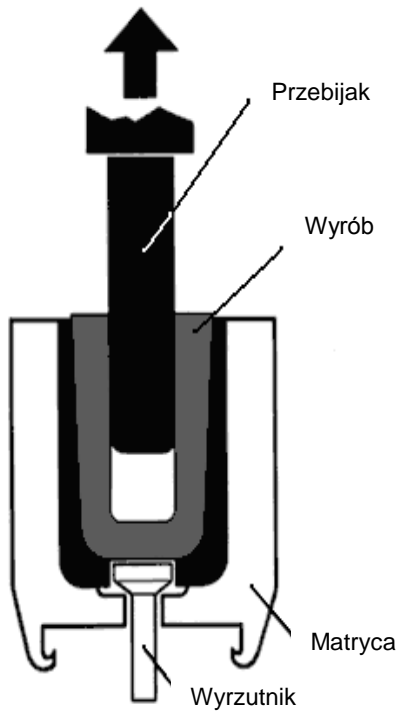
Niewątpliwymi ograniczeniami technologii ciągnięcia są niewielkie, związane z charakterystyką procesu, możliwości produkcyjne w zakresie kształtu wytwarzanych wyrobów. Elementy uzyskiwane w procesie ciągnięcia muszą posiadać niezbyt skomplikowany kształt, ograniczający się do ewentualnie jednego kołnierza w skrajnej części wyrobu. W połączeniu z zachowaniem stałej średnicy oraz grubości ścianki (elementy drażone) kształtowanych wyrobów, bardziej celowym wydaje się zastosowanie tak otrzymywanych półwyrobów do łączenia z innymi elementami. Kolejnym przeznaczeniem otrzymywanych ciągnięciem półwyrobów może być dalsza ich obróbka innymi metodami kształtowania plastycznego, celem nadania finalnego kształtu wytwarzanej części. Tak, więc metoda ciągnięcia pozwala na wytwarzanie na gotowo elementów drażonych w stosunkowo wąskim zakresie, jednakże półwyroby uzyskiwane tą technologią często są dalej przetwarzane innymi metodami. Do wad tego procesu należy zaliczyć zanieczyszczenia niemetaliczne, łuszczenie spowodowane zawalcowaniem i pęcherzami oraz pozostałości jamy skurczowej. Wynikiem złego przeprowadzenia procesu mogą być także pęknięcia materiału spowodowane wytworzeniem nadmiernych naprężeń. Kolejną wadą może być wystąpienie kruchości materiału wywołane nadmiernym gniotem na zimno oraz powierzchniowe rysy, które powstają na skutek uszkodzenia ciągnadła.

Technologia kucia tradycyjnego (rys. 2.8) znajduje zastosowanie tylko w przypadku kształtowania wałów dla najcięższych maszyn i pojazdów. Metoda ta ze względu na konieczność stosowania stosunkowo wysokich naddatków technologicznych na obróbkę końcową wypierana jest przez nowocześniejsze i znacznie korzystniejsze, zarówno z ekonomicznego, jak i jakościowego punktu widzenia, technologie kucia na kowarkach i kucia obrotowego. W przypadku grubościennych i stosunkowo krótkich wyrobów często stosuje się również technologię przebijania, jako znacznie efektywniejszą od kucia [47]. Schemat procesu przebijania tulei grubościennej pokazano na rys. 2.9.

Metoda przebijania pozwala uzyskać bardzo korzystną strukturę materiału. Niestety, tolerancje grubości ścianki (zarówno w przekroju poprzecznym, jak i wzdłużnym) wyrobu są stosunkowo szerokie. Wraz ze wzrostem wielkości siły kształtującej rośnie skłonność do wyboczenia przebijaka. W miarę jego wgłębiania się w metal zwiększają się nierównomierności rozkładu grubości ścianki wyrobu. W celu ułatwienia usuwania wyrobu z matrycy, zewnętrzna powierzchnia kształtowanego elementu może posiadać pewną zbieżność technologiczną umożliwiającą bezproblemowe wypchnięcie gotowego wyrobu poprzez wyrzutnik. Podnosi to zdecydowanie wielkość naddatków na dalszą obróbkę elementu, chyba że rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na zastosowanie tak wykonanej części.



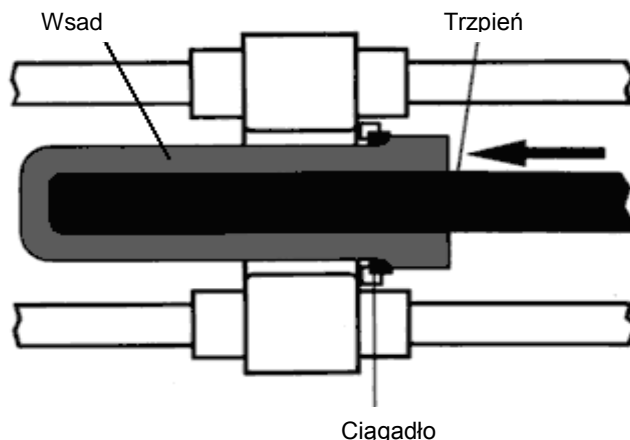
Rys. 2.8. Schemat kucia oraz proces realizowany w kuźni HSW [31,89]



Rys. 2.9. Schemat procesu przebijania tulei grubościenniej [74]

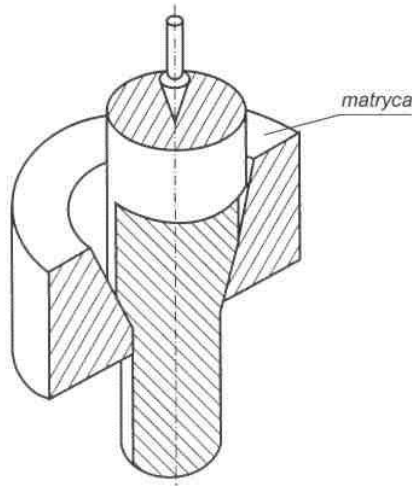
Aby nadać finalny, walcowy kształt wytwarzanego elementu, konieczne jest w tym wypadku zastosowanie obróbki mechanicznej lub dalszej przeróbki plastycznej np. w skośnej walcarce wydłużającej, tzw. alongatorze [39,41]. Zmniejszenie nierównomierności grubości ścianki będące celem takiej operacji można połączyć z uzyskaniem pożądanej średnicy wyrobu. Problem zmieniającej się grubości ścianki w przekroju wzdłużnym eliminowany jest także przez zastosowanie technologii przepychania tulei systemem Ehrhardta [39]. Pozwala to na likwidację konstrukcyjnej zbieżności narzędzi i prowadzi do uzyskania wyrobu o docelowym, cylindrycznym kształcie. Schemat procesu przepychania tulei systemem Ehrhardta przedstawiono na rys. 2.10.

Przepychanie obecnie stosuje się także do produkcji śrub lub sworzni, ponieważ najczęściej tej operacji poddaje się część długości wyrobu w celu zestopniowania średnic (rys. 2.11). Element po przeprowadzonej operacji przepychania posiada znacznie większą wytrzymałość na odcinku odkształcanym niż na pozostałej części. Wadą procesu jest niemożność uzyskania długich elementów stopniowanych, przez co nie znajduje on szerszego zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym.

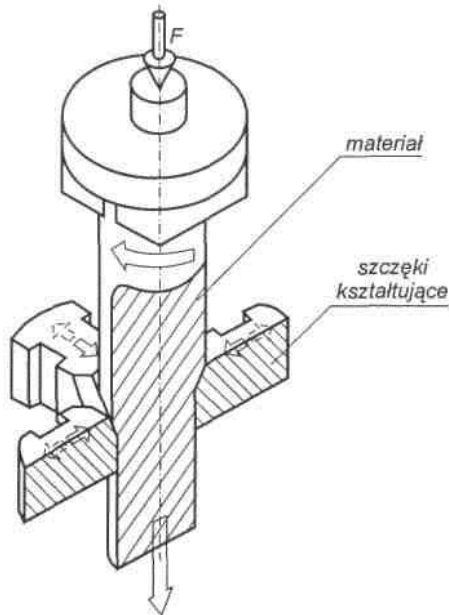


Rys. 2.10. Schemat procesu przepychania tulei systemem Ehrhardta [74]

Kucie na kowarkach pozwala na redukcję średnic rur i prętów, a także uzyskanie dużych wartości pochyłeń. Dzięki obróbce na zimno zachować można bardzo ściśle tolerancje wymiarowe oraz korzystne płynięcie warstw materiału. Sprzyja to podniesieniu właściwości mechanicznych materiału przez utwardzenie się jego wierzchniej warstwy. Możliwe jest ponadto prowadzenie wewnętrznego profilowania przedmiotu w zakresie bardzo dokładnych otworów cylindrycznych i stożkowych [67]. Proces wykonywany jest w warunkach obróbki plastycznej na zimno lub na gorąco – rys. 2.12.



Rys. 2.11. Schemat przepychania [31]



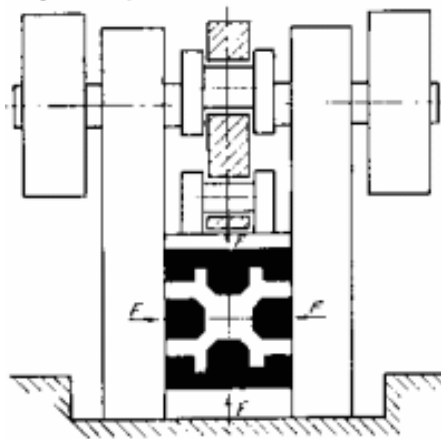
Rys. 2.12. Schemat kucia na kowarkach [31]

Kucie obrotowe polega na kształtowaniu wyrobów osiowosymetrycznych za pomocą dwóch narzędzi – rys. 2.13. Stosowane jest do wytwarzania elementów pierścieniowych (najczęściej stalowych obręczy kół samochodowych i kolejowych). Zasadniczą różnicą między kuciem na kowarkach a kuciem ob-

rotowym jest fakt, że w pierwszym przypadku obraca się materiał obrabiany, a nie narzędzia. Tolerancje wymiarów tak kształtowanych wyrobów liczone są w dziesiątych częściach milimetra. Ponadto, bardzo istotną zaletą tej metody jest możliwość przystosowania do niej większości pras korbowych dostępnych na rynku [69,75].

Wyciskanie na zimno to proces, w którym następuje wypływanie materiału z matrycy w wyniku działania siły nacisku stempla – rys. 2.14. Podczas procesu można uzyskać duże przyrosty długości (nawet 1000% dla aluminium). Można wyróżnić kilka typów wyciskania w zależności od kierunku płynięcia materiału w stosunku do ruchu stempla, między innymi: wyciskanie współbieżne, przeciwbieżne, dwukierunkowe i poprzeczne. Metoda ta znalazła zastosowanie w produkcji zarówno materiałów pełnych jak i drążonych – rys. 2.15.

W celu zmniejszenia ubytku materiału wały pełne zastępowane są przez wały drążone wykonane wybraną metodą, połączoną ze zgrzewaniem tarciowym, co zwiększa koszty wykonania. Zmniejszenie kosztów można uzyskać przez połączenie z głębokim wierceniem.

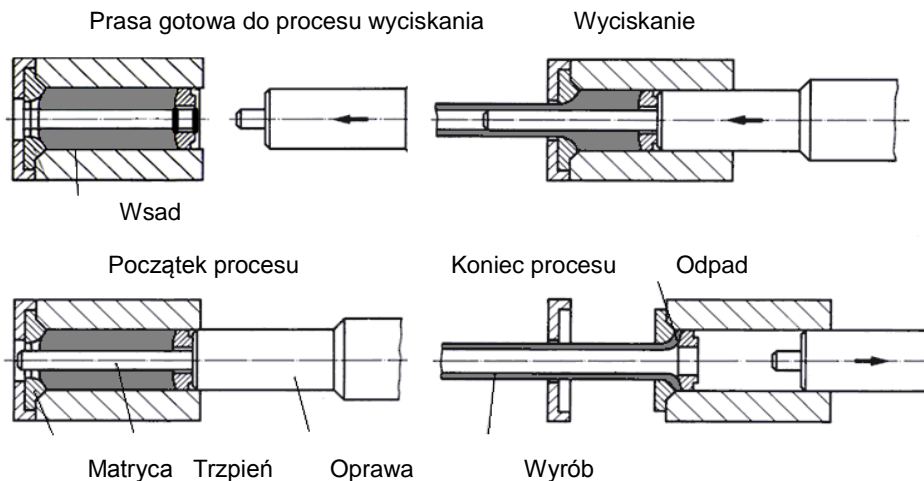


Rys. 2.13. Schemat ideowy procesu kucia obrotowego [31]

Kolejną metodą uzyskiwania elementów osiowo-symetrycznych jest technologia wykorzystująca procesy metalurgii proszków w połączeniu z procesami przeróbki plastycznej (np. kucie matrycowe dokładne) czy wyciskanie. Metody metalurgii proszków umożliwiają wytwarzanie nowych tworzyw odkształcalnych plastycznie z materiałów posiadających określone własności fizyczne.

Kształtowanie na gorąco spieków stało się alternatywną techniką wytwarzania odkuwek dla przemysłu motoryzacyjnego w USA i Japonii, do procesów kucia z półwyrobów walcowanych. Przez wprowadzenie fazy umacniającej podczas przygotowania mieszanki proszków możliwe jest otrzymanie materiałów

o dodatkowo określonych własnościach użytkowych np. przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach w silnikach spalinowych i o zwiększonej odporności na zużycie ścierne.



Rys. 2.14. Schemat ideowy wyciskania na zimno wyrobu rurowego [74]



Rys. 2.15. Przykładowe elementy wykonywane metodą wyciskania na zimno [72,76]

Podczas odkształcania materiałów porowatych następuje zmiana gęstości tworzywa, co odróżnia ten proces od procesów kształtowania półwyrobów walcowanych, kiedy objętość materiału nie ulega zmianie. Nadawanie kształtu materiałom spiekany, w procesach przeróbki plastycznej, odbywa się przede wszystkim przez kucie w matrycach zamkniętych lub wyciskanie.

Kuciem spiekanych materiałów nazywa się zagęszczanie na gorąco, z udziałem lub bez znacznego udziału plastycznego odkształcenia, porowatych wyprasek z tworzyw metalicznych, kompozytów metalicznych umocnionych cząstkami lub włóknami ceramicznymi. Proces ten łączy w sobie cechy procesów metalurgii proszków i kucia matrycowego dokładnego. Ograniczona podatność proszków do zagęszczania powoduje, że uzyskanie małej porowatości wyrobów przez prasowanie na zimno jest z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego nieosiągalne.

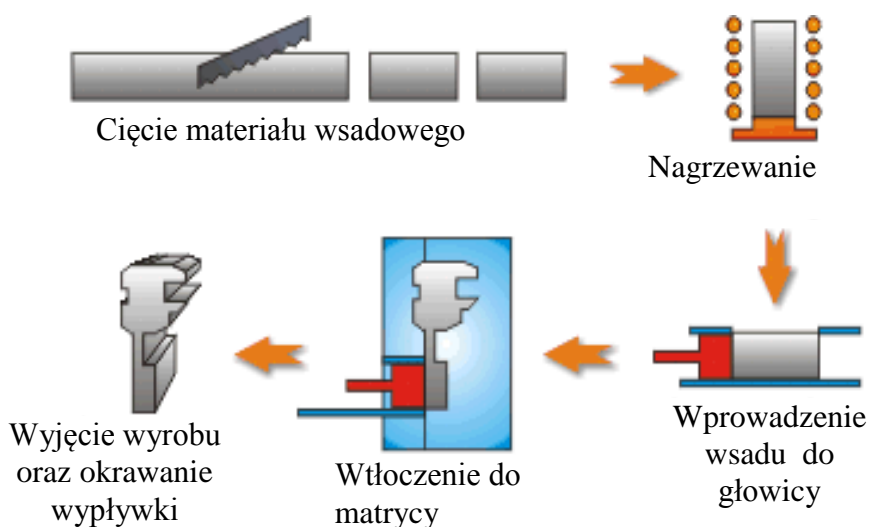
Stopniowe odejście od tradycyjnych technologii odlewniczych, jako metody wytwarzania, zostało podyktowane drastycznym podniesieniem wymogów ekologicznych związanych z koniecznością ponoszenia znacznych nakładów finansowych celem ich spełnienia. Obecnie, w zakresie produkcji wyrobów dla przemysłu maszynowego, czy motoryzacyjnego, technologia ta jest silnie wypierana przez thixoforming, czyli połączenie odlewnictwa z kształtowaniem plastycznym metalu w stanie półciekłym. Początki tej metody sięgają lat siedemdziesiątych i raczej wąskiego zakresu zastosowań do szczególnie trudnych odkuwek o złożonym kształcie, które ze względów jakościowych nie mogły być wykonywane techniką odlewania ciśnieniowego. Obecny rozwój technologii thixoformingu pozwala na uzyskiwanie wyrobów o strukturze sferoidalnej i własnościach izotropowych w całej objętości odkuwki.

W porównaniu z metodami kucia matrycowego, żywotność stosowanych w tej technologii matryc jest znacznie wyższa, gdyż nie występują w tym przypadku tak duże obciążenia dynamiczne. Metoda jest coraz szerzej wykorzystywana w kształtowaniu metali i stopów trudno- odkształcalnych, gdzie żywotność matryc do kucia tradycyjnego jest najbardziej ograniczona.

Dokładności uzyskiwane w technologii thixoformingu pozwalają na wyeliminowanie obróbki mechanicznej (czasami konieczne szlifowanie), co jest jednym z celów stosowania tej metody wytwarzania. Podstawowym problemem technicznym, warunkującym poprawną implementację metody thixoformingu w przemyśle, jest konieczność stosowania wysokich ciśnień wprowadzania wsadu do matryc oraz związane z tym problemy zamkowania oraz ich uszczelniania. Przykładowy schemat procesu thixoformingu przedstawiono na rys. 2.16.

Zagadnienia zapewnienia odpowiedniego poziomu jakości wyrobów wytwarzanych stanowią najważniejszy, obok stałych kosztów produkcji, problem z jakim spotykają się producenci wszystkich wyrobów. Stosowanie kompleksowych rozwiązań w dziedzinie jakości obejmujących wprowadzenie systemów zapewnienia jakości oraz bieżące kontrole dostaw i szkolenia personelu pozwalają znacznie ograniczyć w produkcji odsetek wyrobów wadliwych oraz podnieść poziom jakości wyrobów. Dotyczy to zarówno poprawy własności mechanicznych jak i ograniczenia pola tolerancji wymiarowych prowadzącego do zmniejszenia roli (lub całkowitego wyeliminowania) finalnej obróbki mechanicznej, co jest szczególnie pożądane. Wygląd zewnętrznej powierzchni kształtowanego elementu jest ściśle związany jest z jej

jakością, determinowaną później przez czynniki takie jak: chropowatość powierzchni, rozkład twardości, zmiany strukturalne czy naprężenia wewnętrzne. Wśród powyższych parametrów rozkład naprężeń wewnętrznych jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o wytrzymałości zmęczeniowej danego elementu oraz jego stabilności wymiarowej [45]. Naprężenia rozciągające na powierzchni zewnętrznej mogą przyczynić się do zarodkowania pęknięć i dalszej szybkiej ich propagacji, prowadzącej w efekcie do zniszczenia wyrobu. W sytuacji odwrotnej, występowanie na powierzchni naprężeń ściskających przy jednoczesnym pojawieniu się mikropęknięć otwiera drogę dla korozji [94,94].



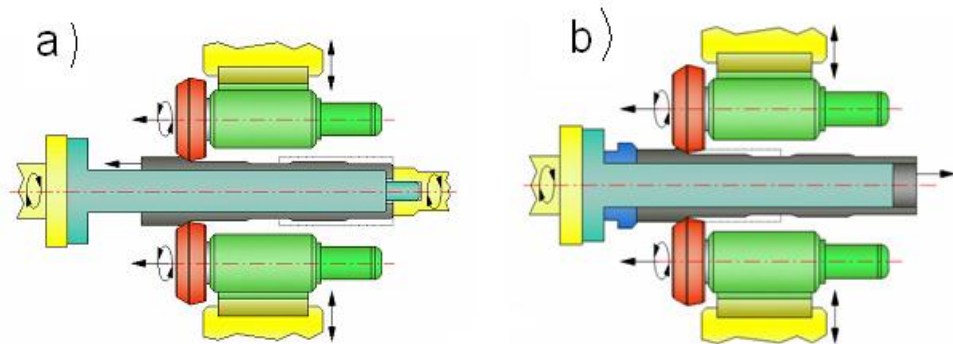
Rys. 2.16. Schemat procesu thixoformingu [69]

W wytwarzaniu wałków i osi jako części maszyn, a w szczególności elementów drążonych spełniających funkcję przeniesienia napędu, wytrzymałość zmęczeniowa elementów ma bardzo duże znaczenie. Części te, pozostające jako krytyczne dla funkcjonowania maszyn i pojazdów, muszą spełniać swoje zadanie równie dobrze jak elementy tradycyjne, czyli o przekroju pełnym. W tym zakresie bardzo wysoko ocenić należy proces wyciskania na zimno, w wyniku którego uzyskujemy finalny kształt wytwarzanego wyrobu często bez przeprowadzania dodatkowych operacji. Wyciskanie z zastosowaniem trzpienia wewnętrznego pozwala na uzyskanie wyrobów o bardzo wysokiej jakości powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej. Dodatkowo dokładność wymiarowa tak

otrzymanych wyrobów finalnych lub przedkuwek rurowych, przeznaczonych do dalszego kształtowania, jest bardzo wysoka.

Kolejną metodą otrzymywania wyrobów osiowo-symetrycznych o złożonym kształcie jest zgniatanie obrotowe. Obróbka ta polega na umieszczeniu na trzpieniu kształtującym rury, tulei bądź krążka. Następnie materiał (umieszczony na obracającym się trzpieniu) zostaje poddany naciskom wywieranym przez rolki kształtujące, które wykonują ruch obrotowy, przeciwny do ruchu trzpienia. Rys. 2.17. przedstawia ideowy schemat procesu zgniatania obrotowego. Ten rodzaj obróbki plastycznej jest szeroko stosowany przez koncerny motoryzacyjne do produkcji felg samochodowych rys 2.18.

Dzięki temu, że rolki kształtujące wykonują zarówno ruch obrotowy jak i poosiowy oraz w kierunku prostopadłym do osi kształtowanego materiału realne jest uzyskiwanie bardzo złożonych kształtów. Za pomocą tej metody można kształtować materiały trudno obrabialne takie jak stal kwasoodporna lub tytan. Odształcenia względne w proponowanej metodzie mogą osiągać nawet 80%.



Rys.2.17. Schemat procesu zgniatania obrotowego: a - współbieżne, b – przeciwbieżne [73]

Na rysunku 2.17 przedstawiono dwa rodzaje procesu zgniatania obrotowego. Na schemacie po stronie lewej pokazany jest proces zgniatania współbieżnego. Charakteryzuje się on tym, iż narzędzia robocze w postaci rolek kształtujących wykonują ruch prostoliniowy zgodny z ruchem trzpienia, na którym znajduje się obrabiany materiał. Natomiast na schemacie po stronie prawej podano schemat zgniatania przeciwbieżnego. W tym wypadku rolki kształtujące wykonują ruch przeciwny do ruchu trzpienia, na którym osadzony jest materiał obrabiany. Przy pomocy tej metody obróbki plastycznej można także kształtować elementy o dużych rozmiarach takie jak części rakiet i pocisków balistycznych, części wahadłowców kosmicznych.

Nowymi rozwiązaniami w zakresie kształtowania stopniowanych wyrobów osiowosymetrycznych są, rozwijane w Katedrze Komputerowego Modelowania

i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, technologie walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) oraz walcowania klinowo-rolkowego (WKR) [5,19,48,50,57].



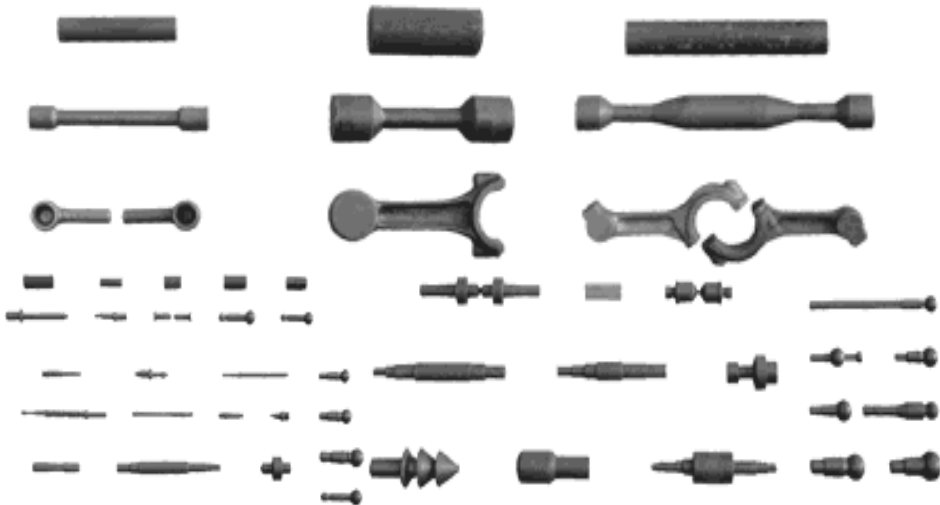
Rys.2.18. Kolejne etapy procesu produkcyjnego felgi samochodowej za pomocą zgniatania obrotowego [78]

Walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) jest technologią, która znalazła już swoją stałą, ugruntowaną pozycję w przemyśle światowym [3,25,51]. W ten sposób wykonywane są obecnie przedkukki osiowo-symetryczne różnego typu (półwyroby do kucia korbowodów, panewek, kluczy maszynowych, widełek, dźwigni itp.) [24, 26], wyroby gotowe (rdzenie izolatorów, sworznie, wałki) oraz odkuwki przeznaczone do dalszej obróbki mechanicznej (stopniowane osie, elementy zawiesznień samochodowych i układów kierowniczych) [34-36]. Technologia WPK pozwala na uzyskiwanie wysokiej jakości i dokładności kształtowanych wyrobów. Przy dopuszczalnych tolerancjach odchyłki średnicy wyrobu, mierzonych w dziesiątych częściach milimetra i chropowości powierzchni rzędu $R_a = 5\mu\text{m}$, uzyskuje się wzrost wytrzymałości zmęczeniowej o 1,5 do 2 razy, natomiast odporność wyrobu na zużycie ściernie podnosi się o 20 do 40 % [44]. Zastosowanie metody WPK w miejsce innych technologii wytwórczych m.in. kucia matrycowego, walcowania wzdłużnego czy obróbki skrawaniem, pozwala na osiągnięcie oszczędności materiałowych sięgających od 20 do 60% (w zależności od zastępowanej metody) [44]. Przykłady zastosowań technologii WPK podano na rys. 2.19 prezentującym gamę wyrobów oferowanych przez białoruską firmę Beltechnologia & M, specjalizującą się w tej dziedzinie kształtowania plastycznego.

Technologia WPK po zautomatyzowaniu została wykorzystana w produkcji seryjnej i masowej, znajdując odbiorców głównie w sektorze motoryzacyjnym. Stało się tak ze względu na stosunkowo wysokie koszty ponoszone wstępnie przy zakupie niezbędnego parku maszynowego oraz związane z wykonawstwem narzędzi klinowych [49, 51-55, 65, 66]. Przegląd metod kształtowania WPK podano na rys. 2.20.

Rozwój technik numerycznych i specjalistycznego oprogramowania komputerowego umożliwił rozszerzenie wąskiego kręgu odbiorców tej metody walcowania na nowych użytkowników.

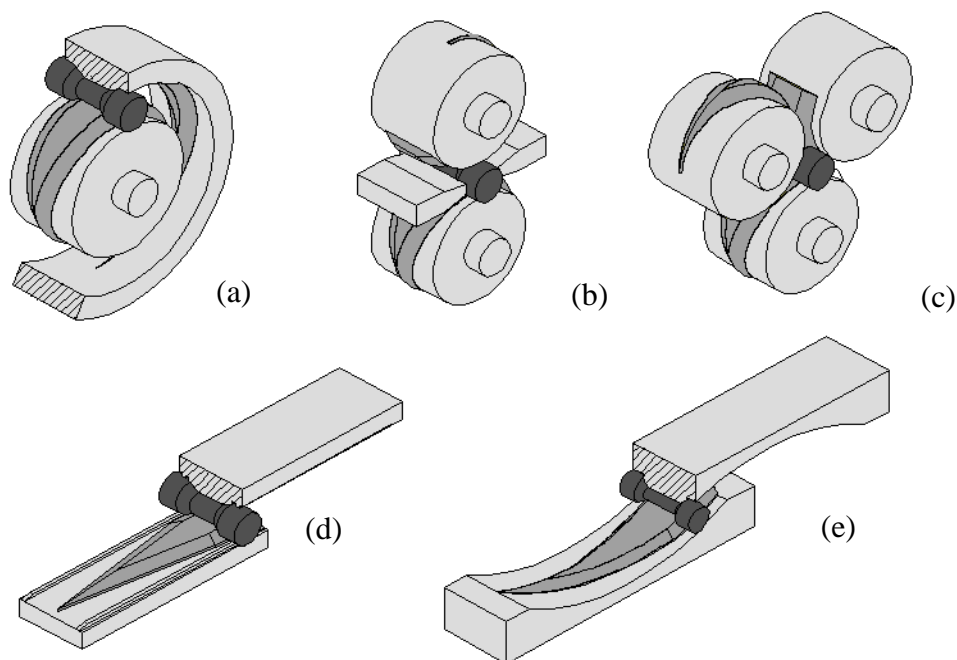
Nowoczesne pakiety oprogramowania przeznaczone do projektowania narzędzi i numerycznego modelowania procesów pozwoliły bowiem na znaczne obniżenie kosztów wdrożenia tej technologii wytwórczej. Obecnie, stosując MES, można już nawet na komputerach osobistych symulować procesy walcowania poprzeczno-klinowego. W efekcie tych obliczeń użytkownik może zweryfikować poprawność zaprojektowanych narzędzi i przyjętych parametrów procesu. Tym samym rekompensowany jest brak doświadczenia u technologów, którzy mają zajmować się tym trudnym procesem kształtowania. Nie bez znaczenia dla tych osób jest również dostępność opracowań, w których przedstawiono różne aspekty techniczne tej technologii [12,13,19,27-29,48-51,65,66].



Rys. 2.19. *Przykłady wyrobów wykonywanych w technologii WPK przez firmę Beltechnologia & M [70]*

Wśród najbliższych geograficznie ośrodków zajmujących się produkcją walcarek i wdrożeniami technologii WPK należy wymienić firmy: Beltechnologia & M (Białoruś) i Šmeral (Czechy). W zakładzie Beltechnologia & M produkowane są walcarki płaskoklinowe, z których jedną przedstawiono na rys. 2.21. Agregat ten zestawiono wraz ze współpracującym indukcyjnym urządzeniem nagrzewającym i podajnikiem [58]. Ta kompletna linia produkcyjna przy uruchomieniu wymaga jedynie uzbrojenia suwaków walcarki w narzędzia klinowe, ustalenia wielkości wsadów oraz zakresu temperatur, do

jakich będą one nagrzewane. Rozwiązanie takie z uwagi na zwartość budowy i relatywnie najniższy (z przedstawionych metod WPK) koszt wykonania oprzyrządowania przedstawia się jako jedna z najkorzystniejszych ekonomicznie ofert. Wadą metody płaskoklinowej jest niska efektywność pracy, spowodowana występowaniem jałowego ruchu powrotnego narzędzi.



Rys. 2.20. Klasyfikacja metod WPK ze względu na konstrukcję narzędzi: a) walcowanie poprzeczne w układzie segment-walec; b) walcowanie poprzeczne w układzie dwóch walców; c) walcowanie poprzeczne trzema walcami; d) walcowanie poprzeczne klinowymi narzędziami płaskimi; e) walcowanie poprzeczne w układzie dwóch wklęsłych segmentów narzędziowych [33]

Czeska firma Šmeral produkuje walcarki z dwoma walcami roboczymi, o średnicach wynoszących 700 lub 1000 mm - rys. 2.22. Urządzenia te z uwagi na trudniejszy i bardziej złożony proces projektowania i wykonania narzędzi są droższe w fazie uruchomienia produkcji. Ich niewątpliwą zaletą jest jednak brak ruchu jałowego narzędzi, skutkujący wzrostem wydajności produkcyjnej maszyny oraz możliwość walcowania w sposób ciągły z pręta (o długości do 6 m).

Fotografia klatki walcowniczej walcarki dwuwalcowej, w trakcie procesu kształtowania wyrobu pokazano na rys. 2.23.



Rys. 2.21. *Walcarka płaskoklinowa firmy Beltechnologia & M (Białoruś) [70]*

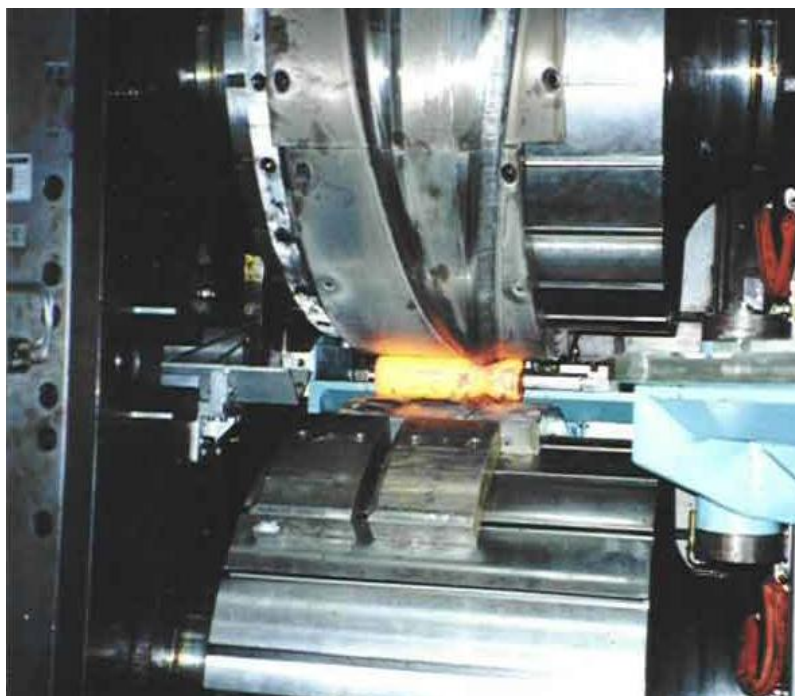


Rys. 2.22. *Dwuwalcowa walcarki poprzeczno – klinowe firmy (Šmeral – Czechy) [85]*

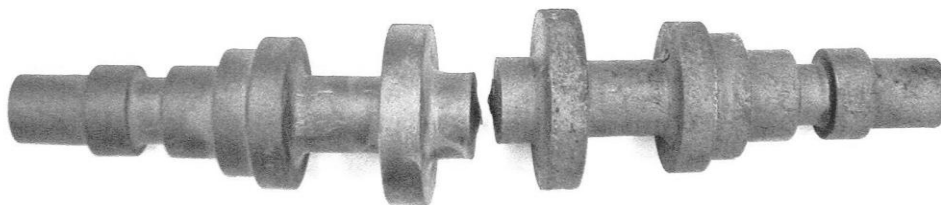
Metodą pozwalającą na dodatkową poprawę wydajności WPK jest zastosowanie kształtowania w układzie podwójnym, w którym w jednym cyklu roboczym narzędzi kształtowane są dwa wyroby. Ograniczeniem pozostaje tu jedynie maksymalna szerokość zabudowy narzędzi klinowych, określająca maksymalną długość wyrobów kształtowanych. Dużą zaletą tego układu jest występowanie bardzo korzystnego, z uwagi na stabilność prowadzonego procesu, symetrycznego rozkładu sił osiowych działających na odkuwki. Przykład wyrobów walcowanych w układzie podwójnym podano na rys. 2.24.

Procesom WPK towarzyszy intensywne powierzchniowe płynięcie materiału. Wzrasta ono proporcjonalnie do stopnia przerobu plastycznego kształtowanego wsadu. W efekcie silnego poosiowego płynięcia wierzchnich

warstw materiału powstają na końcach kształtowanej odkuwki charakterystyczne leje. Stwarza to konieczność stosowania noży bocznych lub wprowadzenia po kształtowaniu dodatkowej operacji cięcia. Noże montowane w segmentach narzędziowych mogą służyć również do rozdzielenia wyrobów wykonywanych w układzie podwójnym.



Rys 2.23. Kształtowanie wyrobu w dwuwalcowej walcarce ULS (Śmeral – Czechy) [85]



Rys 2.24. Wyroby wykonywane w układzie podwójnym (WPK) [85]

Przykład wyrobu kształtowanego w technologii WPK z odcinaniem odpadów czołowych, z charakterystycznymi lejami, pokazano na rys. 2.25.



Rys. 2.25. Odkuwka wałka pośredniego wraz z odpadami końcowymi odcinanymi w trakcie procesu WPK [50]

Bardzo istotnym ograniczeniem zastosowania technologii WPK w kształtowaniu wyrobów drążonych są problemy zaburzeń kształtu przejawiające się owalizacją przekroju poprzecznego wyrobów walcowanych [1]. Rozwiązaniem umożliwiającym zmniejszenie owalizacji występującej w przypadku procesów WPK dwoma klinami, jest walcowanie wyrobów drążonych trzema narzędziami. Ze względu na fakt, że badania doświadczalne tych procesów wymagają kosztownej budowy nowych stanowisk badawczych, w analizie prowadzonej w warunkach KKMiTOP [5] ograniczono się wyłącznie do obliczeń numerycznych, prowadzonych w oparciu o MES.

W praktyce przemysłowej metodą WPK za pomocą trzech walców, na których nawinięte są kliny [26-28, 41, 42, 52, 53] wykonywana jest marginalna część produkcji. Zaletami tej metody są: eliminacja listew podtrzymujących odkuwkę między walcami w trakcie kształtowania oraz zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia pęknięć wewnętrznych w kształtowanych wyrobach pełnych [29]. Podstawową wadą tej metody jest zaś ograniczenie długości klinów kształtujących, wynikające z następującego warunku [50]:

$$R_w < \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} r, \quad (2.1)$$

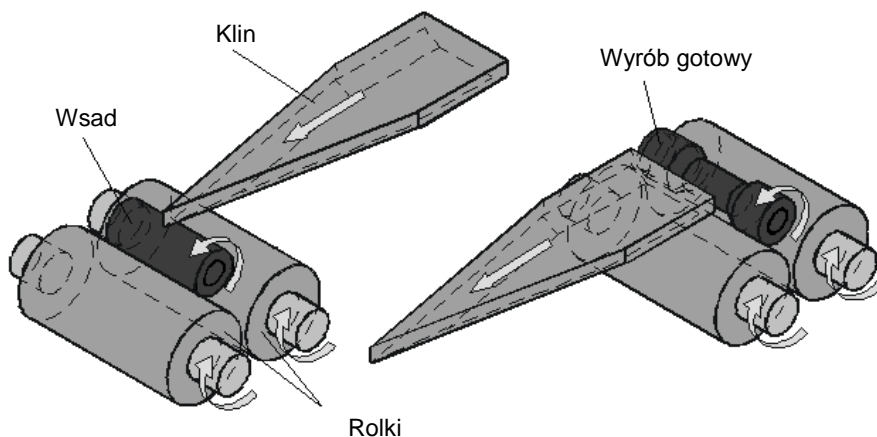
określającego graniczną wartość promienia walca R_w , w zależności od promienia r walcowanego stopnia odkuwki.

Wysokie koszty wykonawstwa trzech walców klinowych oraz ograniczenia długości klinów wynikające z warunku (2.1) upoważniają do poszukiwania alternatywnych metod kształtowania charakteryzowanych zbliżonym schematem naprężeń. Za taką obiecującą metodę kształtowania można uznać metodę walcowania klinowo-rolkowego (WKR), której koncepcję opracowano w KKMiTOP Politechniki Lubelskiej.

Metoda WKR polega na kształtowaniu osiowo-symetrycznych wyrobów, przy użyciu jednego klina kształtującego oraz dwóch rolek podtrzymujących – kierujących (rys. 2.26). Walcowany wyrób umieszcza się na rolkach, które są napędzane i obracają się z jednakową prędkością przeciwnie do kierunku przemieszczenia klina. Rolki te mogą być wykonane jako gładkie lub profilowe. Klin przemieszczając się ruchem posuwistym wcina się w materiał i kształtuje na jego obwodzie przewężenie o zakładanych wymiarach.

W porównaniu do dotychczas stosowanych metod WPK, walcowanie klinowo-rolkowe odznacza się szeregiem zalet, do których przede wszystkim zalicza się:

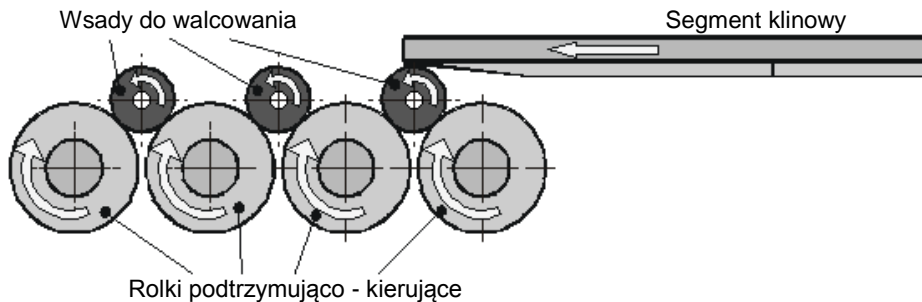
- niższe koszty wdrożeniowe, wynikające ze stosowania tylko jednego klina płaskiego;
- zmniejszenie prawdopodobieństwa pęknięcia osiowego materiału, tak charakterystycznego dla dwunarzędziowych procesów WPK;
- zwiększenie wydajności poprzez zastosowanie schematu WKR (rys. 2.27) umożliwiającego jednoczesne kształtowanie kilku, a nawet więcej wyrobów.



Rys. 2.26. Schemat ideowy ilustrujący metodę walcowania klinowo-rolkowego (WKR) [5]

Należy zauważyć, że proces WKR nie jest jeszcze dostatecznie zbadany, a jego poznanie wymaga m.in. przeprowadzenia szeregu prac doświadczalnych (również z zastosowaniem wsadów drążonych). Dopiero po tych badaniach będzie można przedstawić wytyczne do ewentualnego zastosowania tej technologii kształtowania do wytwarzania wyrobów osiowo-symetrycznych. Analiza procesów kształtowania wyrobów typu osie lub wały pełne i drążone oraz określenie

ekonomiczno – technologicznych aspektów uzasadniających dobór właściwej technologii wytwórczej było przedmiotem wielu prac, zarówno o charakterze teoretycznym, jak i doświadczalnym, popartym praktyką przemysłową. Prezentowane w literaturze rozwiązania z zakresu wytwarzania tego typu elementów konstrukcyjnych pokazują możliwości wykonawstwa coraz to nowszych rozwiązań, dzięki którym osiągnęte są również znaczne oszczędności materiałowe. Nie bez znaczenia jest także fakt, że nowe technologie są proekologiczne, a poprzez zmniejszenie kosztów wytwarzania, także bardziej rentowne.



Rys. 2.27. Schemat walcowania klinowo-rolkowego kilku wyrobów [5]

Zastosowanie nowatorskich części drążonych w układach maszyn i pojazdów wymagało wprowadzenia dodatkowych zabiegów technologicznych pozwalających na uzyskanie złożonych kształtów zewnętrznych (stopniowane wałki, elementy wytłaczane hydrostatycznie) oraz zróżnicowania grubości ścianek wytwarzanych wyrobów. Wymagania te spełniają przedstawione w niniejszym rozdziale technologie wytwórcze. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na występowanie licznych ograniczeń w stosowalności tych technologii, głównie natury technologicznej i konstrukcyjnej. Związane jest to przede wszystkim z wysokimi kryteriami jakościowymi stawianymi obecnie produkowanym wyrobom oraz wąskim zakresem tolerancji wytwórczych akceptowanych przez potencjalnych odbiorców części tego typu. Za najkorzystniejsze techniki wytwarzania stopniowanych wałków drążonych uznawane są: kucie na kowarkach oraz metody wyciskania na zimno, łączone ze zgrzewaniem tarciovym lub głębokim wierceniem [1, 2, 40].

Na tle prezentowanych metod wytwarzania bardzo korzystnie prezentuje się technologia walcowania poprzeczno – klinowego. Podstawowe zalety tej metody to bardzo wysoka wydajność produkcji i powtarzalność serii. Zamiast kilku niezbędnych do wytworzenia elementu drążonego operacji (jak ma to miejsce przy kuciu na kowarkach, wyciskaniu na zimno i spajaniu) w metodzie WPK stosuje się jedno przejście segmentów klinowych. Ponadto, walcując

w układzie podwójnym nie tylko podnosi się wydajność procesu, ale również uzyskuje się bardzo korzystny dla jego stabilności symetryczny rozkład sił osiowych działających na odkuwkę. Niestety, jak wykazano w opracowaniach [5, 46, 47], nie można stosować reguł projektowych, wykorzystywanych przy projektowaniu technologii walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów pełnych, bezpośrednio w trakcie opracowywania procesów WPK wyrobów drążonych.

3. Wstępna analiza numeryczna procesu przepychania obrotowego

Próbą częściowego rozwiązania problemu ograniczenia szerokości strefy roboczej walcowania poprzecznego oraz ustalenia maksymalnej długości wyrobu kształtowanego, są opisywane badania nad nową technologią obróbki plastycznej, jaką jest przepychanie obrotowe [21-23].

Wprowadzenie tej nowej technologii nie posiada, w założeniu, ograniczenia długości wyrobu i pozwala na dowolne ustawienie cyklu kształtowania, w zakresie skojarzenia ruchu obrotowego rolek i ruchu liniowego popychacza przesuwanego kształtowany materiał. Zatem, w zależności od wielkości podajnika wsadu, możliwe jest kształtowanie wyrobów o większym stosunku długości do średnicy, co występuje na przykład w półosiach i wałach napędowych oraz elementach przekładniowych, takich jak wałek atakujący czy wałki pośrednie.

Rozwiązanie to łączy w sobie zalety walcowania poprzeczno-klinowego za pomocą trzech narzędzi roboczych z dodatkowymi możliwościami, jakie daje zastosowanie popychacza wprowadzającego wsad do przestrzeni roboczej. W ten sposób długość uzyskiwanego w tej metodzie wyrobu ograniczona jest roboczym skokiem popychacza oraz sztywnością obracającego się wsadu, który może ulec wyboczeniu. Dla ustalenia praktycznego zakresu zastosowań technologii przepychania obrotowego, przeprowadzono szereg badań numerycznych oraz prób doświadczalnych zmieniając wybrane parametry kinematyczne i badając ich wpływ na kształtowanie wyrobu.

Ze względu na bardzo złożony charakter płynięcia metalu w trakcie kształtowania oraz stale zmieniające się powierzchnie kontaktu pomiędzy wyrobem kształtowanym a obracającymi się narzędziami przewidziano, że dokładna analiza procesu za pomocą metody elementów skończonych będzie wymagała długotrwałych i żmudnych symulacji. Dla ograniczenia czasochłonności tych analiz zdecydowano się na wykonanie obliczeń inżynierskich, których celem było ukierunkowanie dalszych badań. Stąd też badania teoretyczne nad procesem przepychania obrotowego podzielono na dwie fazy:

- obliczenia szacunkowe z zastosowaniem wybranych metod analizy inżynierskiej;
- badania numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES);

3.1 Obliczenia szacunkowe

Wspomniany, długi czas obliczeń dla pojedynczego przypadku kształtowania, przełożył się na konieczność stworzenia specjalistycznego programu do szybkiego szacowania wartości sił i momentów występujących w procesie. W celu jego opracowania przeanalizowano schemat nacisków występujących w przestrzeni roboczej – rys. 3.1. Siła działająca od rolek narzędziowych, generująca naciski p_c , powoduje odkształcenie wyrobu. Natomiast siła poosiowa Q_c pochodząca od popychacza, wywołująca naciski q_c , jest uznawana za podstawowy parametr siłowy procesu przepychania obrotowego [56].

Do wyznaczenia nacisków jednostkowych, przy założeniu, że powierzchnia styku materiału z rolkami kształtującymi ma kształt pierścienia, zastosowano trzy metody obliczeń inżynierskich:

- bilans pracy narzędzia,
- bilans pracy tarcia odkształcenia plastycznego,
- uproszczonej analizy.

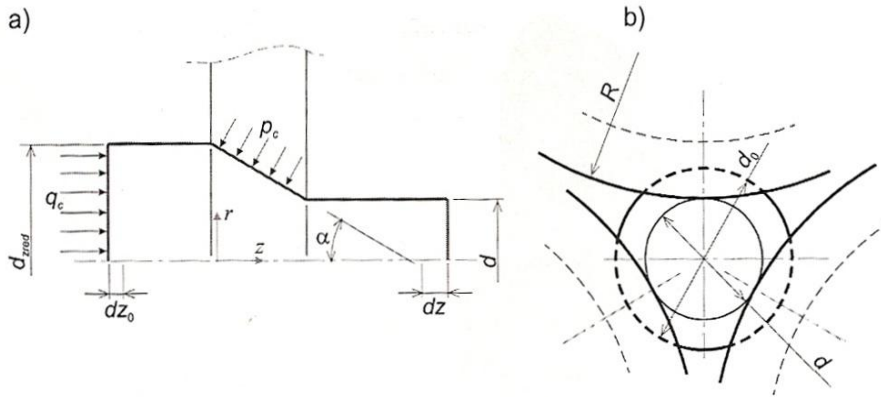
Głównym celem przeprowadzenia procesu przepychania jest otrzymanie wyrobu o mniejszej średnicy w stosunku do wymiarów wsadu. W tym celu został wyprowadzony wzór na średnicę zredukowaną, uwzględniający w sobie pole powierzchni styku materiału z rolkami kształtującymi.

Przyjmując, że ta powierzchnia ma kształt pierścienia wzór przyjmuje postać:

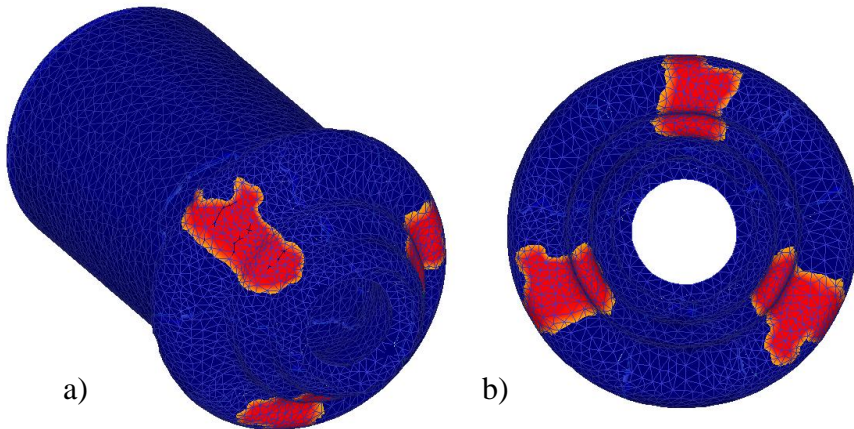
$$d_{zred} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{RZ}}{\pi} + d^2} \quad (3.1)$$

Do wyznaczenia średnicy zredukowanej niezbędne jest poznanie pola powierzchni styku materiału z rolkami. Po przeprowadzeniu analiz numerycznych wykazano, że powierzchnia styku materiału z narzędziami ma kształt taki jak przedstawiono na rysunku 3.2.

Możliwe do realizacji są dwie metody wyznaczenia pola powierzchni styku tych elementów. Rysunek 3.3 przedstawia interesujące nas pole powierzchni. Jednakże należy wziąć pod uwagę, że w procesie występują trzy narzędzia kształtujące, więc w celu wyznaczenia całkowitego pola styku konieczne jest ich uwzględnienie.



Rys. 3.1. Schemat procesu przepychania obrotowego: a) model uproszczony procesu przepychania, b) proces rzeczywisty (rzut na płaszczyznę normalną do osi z); gdzie: d_0 – średnica wsadu, d_{zred} – średnica zastępcza, d – średnica wyrobu, R – promień rolki, α – kąt pochylenia powierzchni roboczej rolki, dz_0 , dz – elementarne zmiany długości wsadu i wyrobu, q_c , p_c – naciski jednostkowe, $\{r, z\}$ – układ współrzędnych [56]



Rys. 3.2. Wyniki analizy obliczeń numerycznych procesu przepychania obrotowego pokazujące powierzchnię kontaktu materiału z rolkami kształtującymi; a) widok ogólny, b) rzut na płaszczyznę normalną do kierunku osiowego

Drugą znacznie dokładniejszą metodą ustalenia pola powierzchni kontaktu materiału z narzędziami roboczymi jest wyznaczenie go poprzez całkowanie

skończone obszaru ABCD rys. 3.4. Podczas obliczeń ważne jest aby obszar x_p mieścił się w wyznaczonych granicach, a mianowicie:

$$0 \leq x_p \leq \frac{D}{4} \cdot \sin \gamma_1 \quad (3.2)$$

gdzie:

D – średnica narzędzia roboczego

γ_1 – kąt pokazany na rys. 3.3.

Następnym krokiem niezbędnym do prawidłowego przeprowadzenia procesu przepychania obrotowego jest wyznaczenie nacisku jednostkowego p_c (rys. 3.1) pomiędzy rolkami a tuleją. Wyznaczono go z zależności:

$$p_c = q_c \cdot \frac{\pi \cdot (d_0^2 - d_w^2)}{12 \cdot S_{RZ} \cdot \sin \alpha} \quad (3.3)$$

gdzie:

q_c – nacisk popychacza

d_0 – średnica wsadu

d_w – średnica elementu gotowego

S_{RZ} – pole powierzchni kontaktu materiału ze wszystkimi rolkami roboczymi

α – kąt pochylenia powierzchni roboczej rolki

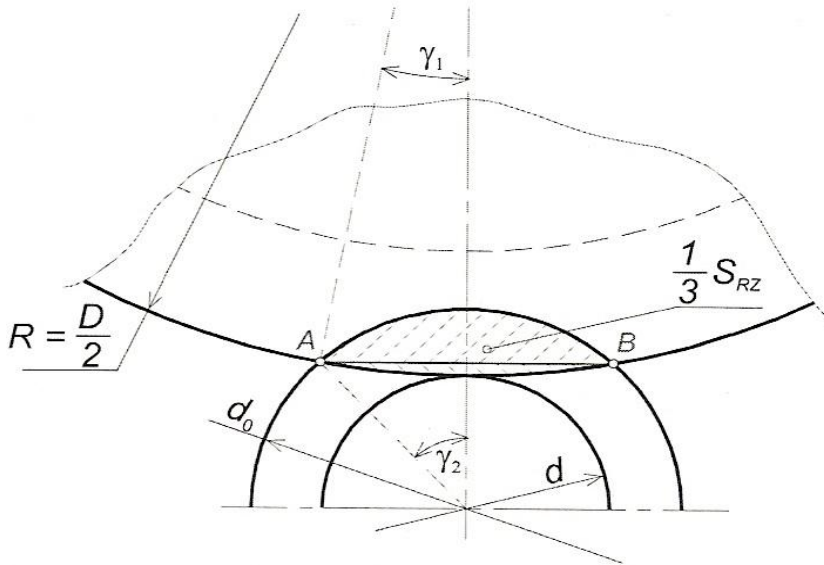
Kolejnym krokiem jest rozłożenie nacisku całkowitego p_c na siły składowe widoczne na rys. 3.1. Jest to niezbędne do prawidłowego opisanie procesu. Tak więc siła promieniowa P_R zostaje wyznaczona z zależności:

$$P_R = p_c \cdot S_{RZ} \cdot \frac{\cos^2 \alpha}{3 \cdot \sin \alpha} \quad (3.4)$$

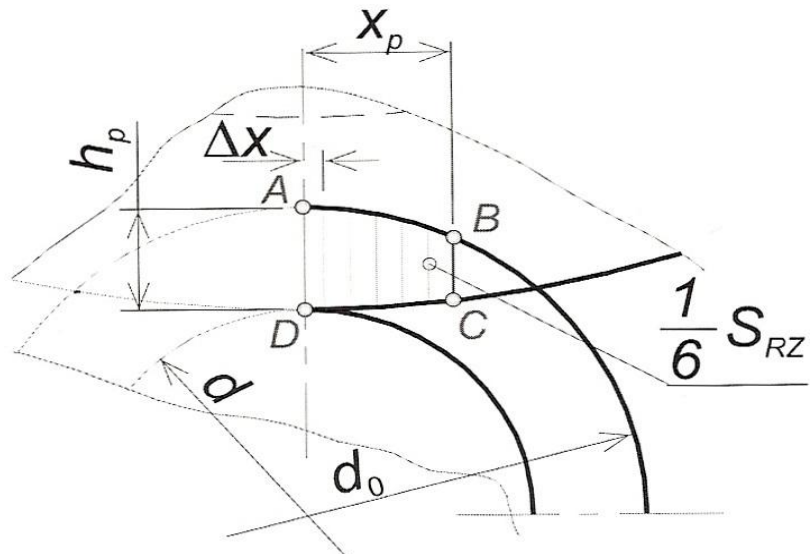
We wzorze tym uwzględniono nacisk całkowity p_c .

Kolejną wartością jest siła osiowa P_z opisana wzorem:

$$P_z = p_c \cdot \frac{S_{RZ}}{3 \cdot \sin \alpha} \quad (3.5)$$



Rys.3.3. Rzut powierzchni kontaktu materiału z narzędziem na płaszczyznę normalną do kierunku osiowego[56]



Rys.3.4. Rzut powierzchni kontaktu na płaszczyznę normalną do kierunku osiowego [56]

Ostatnią wartością, którą należy ustalić jest siła obwodowa T . Wyznaczyć ją można w oparciu o dwa modele tarcia:

- model tarcia stałego

$$T = \frac{\sqrt{3}}{9 \cdot \sin \alpha} \cdot m \cdot \sigma_0 \cdot S_{RZ} \quad (3.6)$$

gdzie:

m – czynnik tarcia na powierzchni styku materiału z rolką kształtującą
 σ_0 – granica plastyczności materiału

- model tarcia Amontonsa

$$T = \frac{\mu}{3 \cdot \sin \alpha} \cdot p_c \cdot S_{RZ} \quad (3.7)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia na powierzchni styku materiału z narzędziem

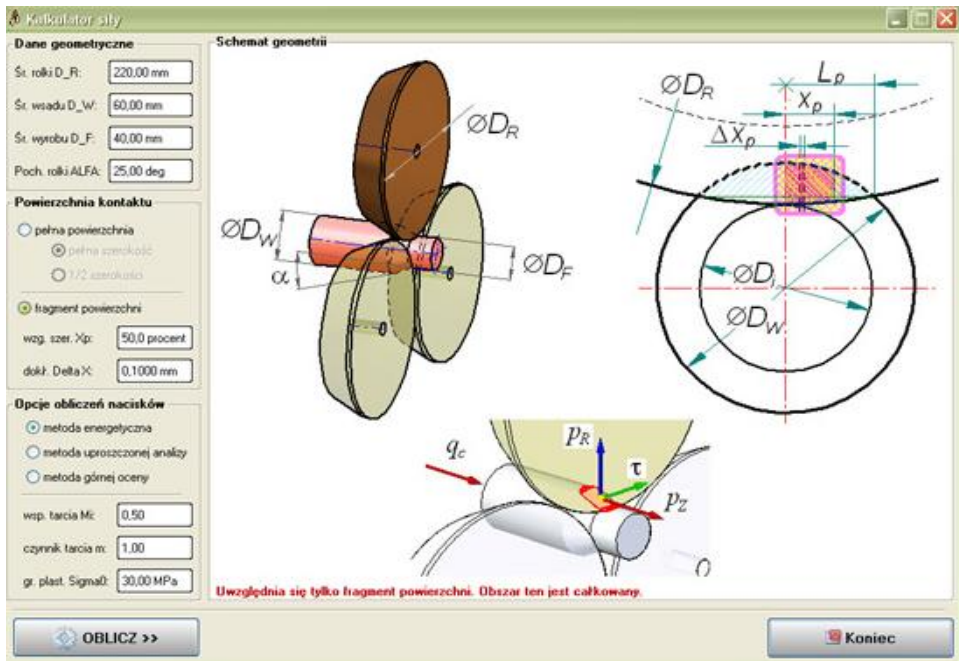
Ekran startowy programu „Kalkulator siły” [11] oraz wyniki przykładowych, szacunkowych analiz realizowanych za pomocą tego oprogramowania pokazano na rys. 3.5 i 3.6. Po podaniu podstawowych parametrów technologicznych procesu oraz wpisaniu wielkości charakteryzujących kształt narzędzi, program, za pomocą jednej z wybranych metod analizy inżynierskiej (energetyczna, równań różniczkowych równowagi, górnej oceny), wykonuje obliczenia szacunkowe – wg schematu nacisków zamieszczonego na rys. 3.1. Ze względu na możliwość zmian powierzchni kontaktu w zależności od kształtu zastosowanych narzędzi (kąta kształtującego α), w programie przewidziano opcję procentowej korekty tej wielkości.

W obliczeniach szacunkowych wartości kąta α zmieniano co 5° uzyskując wyniki obliczeniowe wartości parametrów siłowych podane na rys. 3.7. Zamieszczone tam zestawienie wartości sił wskazuje, iż wraz ze zwiększaniem się kąta kształtującego rolek roboczych α stopniowo spada wartość sił rozporowych P_r , działających na narzędzia rolkowe. Równolegle obserwowany jest spadek wartości koniecznych do zastosowania sił wciskających Q_c . Jednakże dzieje się tak podczas zwiększania wartości kąta α do osiągnięcia wartości $\alpha = 45^\circ$. Po osiągnięciu minimum dalsze zwiększanie pochylenia powierzchni roboczych rolek prowadzi do stopniowego wzrostu wartości siły wciskającej dochodząc do maksimum przy $\alpha = 90^\circ$.

Uzyskane w wyniku obliczeń za pomocą programu „Kalkulator siły” wyniki pozwoliły na wstępne ustalenie ograniczenia procesu w postaci wartości

kąta kształtującego α . Stwierdzono, że powyżej $\alpha = 45^\circ$ dochodzi do wzrostu wartości sił kształtujących (rys. 3.7), co skutkuje intensywnym spęczaniem wsadu przed strefą kształtującą pomiędzy rolkami oraz zmniejszeniem, pożądanego w procesie, osiowego płynięcia metalu.

Z tego też względu do założeń planu badań numerycznych MES wprowadzono powyższe ograniczenie. Napisany na potrzeby badawcze program pozwolił także na określenie wartości sił i nacisków w zależności od współczynnika redukcji przekroju δ określanego stosunkiem średnicy materiału wsadowego do średnicy ukształtowanego stopnia wyrobu ($\delta = D_W/D_F$ – rys. 3.5). Do dalszych obliczeń teoretycznych przyjęto wartość średnią $\delta = 1,5$ (przy założonej wartości maksymalnej $\delta = 2,0$).



Rys. 3.5. Zrzut ekranu startowego programu „Kalkulator siły”

Stosowanie w badaniach rolek posiadających kąt kształtujący α o wartości mniejszej niż $\alpha = 20^\circ$ uznano za niecelowe i nie posiadające uzasadnienia technologicznego dla przyszłych zastosowań tej metody kształtowania wyrobów. W ten sposób zakres prowadzonych analiz ograniczono do kątów kształtujących rolek roboczych mieszczących się w zakresie $\alpha = (20 \div 45)^\circ$.

3.2 Obliczenia numeryczne Metodą Elementów Skończonych (MES)

W zakresie przewidzianych badań numerycznych MES prowadzono symulacje procesu przepychania obrotowego wyrobów pełnych i drażonych. W badaniach wpływu parametrów geometrycznych narzędzi obrotowych na przebieg procesu przepychania obrotowego przeanalizowano przypadek kształtowania centralnego przewężenia przekroju poprzecznego wsadu w zakresie parametrów geometrycznych i technologicznych przedstawionych na rys. 3.8.

Opis (część wstępna)

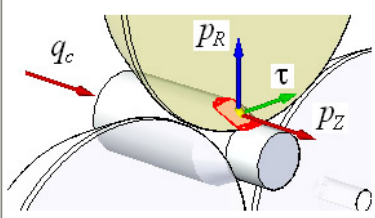
DANE GEOMETRYCZNE:

- » Średnica wsadu: 60 mm,
- » Średnica wyrobu: 40 mm,
- » Średnica rolki: 220 mm,
- » Kąt pochylenia rolki: 25 deg,

Obliczenia powierzchni kontaktu:

- » opcja: 'FRAGMENT POWIERZCHNI (całkowanie)'
- » szerokość L_p : 20,4787377107294 mm,
- » szerokość odcinka x_p : 10,23936888553647 mm,
- » dokładność całkowania Δx_p : 0,1 mm,
- » Pole kontaktu: 285,130797541126 mm²,
- » Średnica ZASTĘPCZA dz: 44,3062085209071 mm,

Schemat nacisków



Opis (naciski ...)

DANE do obliczeń:

- » współczynnik tarcia: 0,5,
- » czynnik tarcia: 1,
- » granica plast.: 30 MPa,

Obliczenia nacisku:

- » metoda: 'ENERGETYCZNA'
- » nacisk $q_c/s_0 = 0,51488366733862$,
- » nacisk $q_c = 15,4465100201586$ N/mm²,
- » siła $Q_c = 43673,9412728071$ N,

» SIŁY DLA JEDNEJ ROLKI:

- » nacisk $pr/s_0 = 1,21658473460653$,
- » nacisk $pz/s_0 = 1,70190669800342$,
- » nacisk $\tau/s_0 = 0,671176251007795$,
- » siła $Pr = 3468,85775654718$ N,
- » siła $Pz = 4852,66014142301$ N,
- » siła $T(mi) = 1913,73019740516$ N,
- » siła $T(m) = 1646,20342714622$ N,

Zapisz wyniki

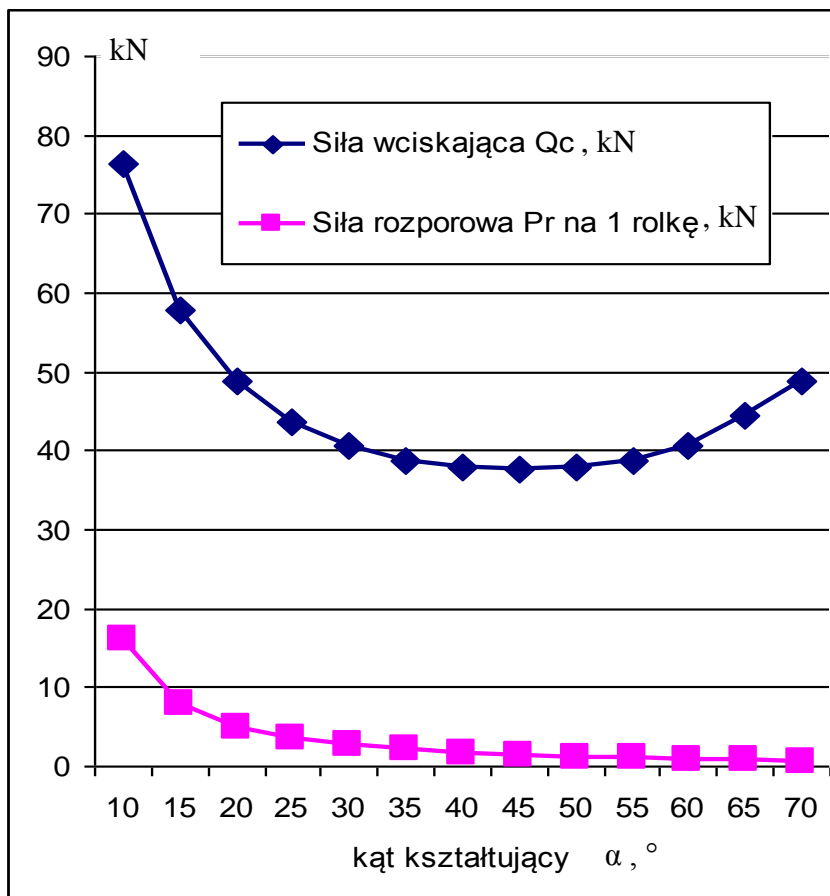
Zamknij okno

Rys. 3.6. Zrzut ekranu wynikowego programu „Kalkulator siły”

Dla zapewnienia prawidłowego prowadzenia wsadu w przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami kształtowymi zamodelowano popychacz poruszający się ruchem prostoliniowym. Narzędzie to posiadało możliwość swobodnego obrotu

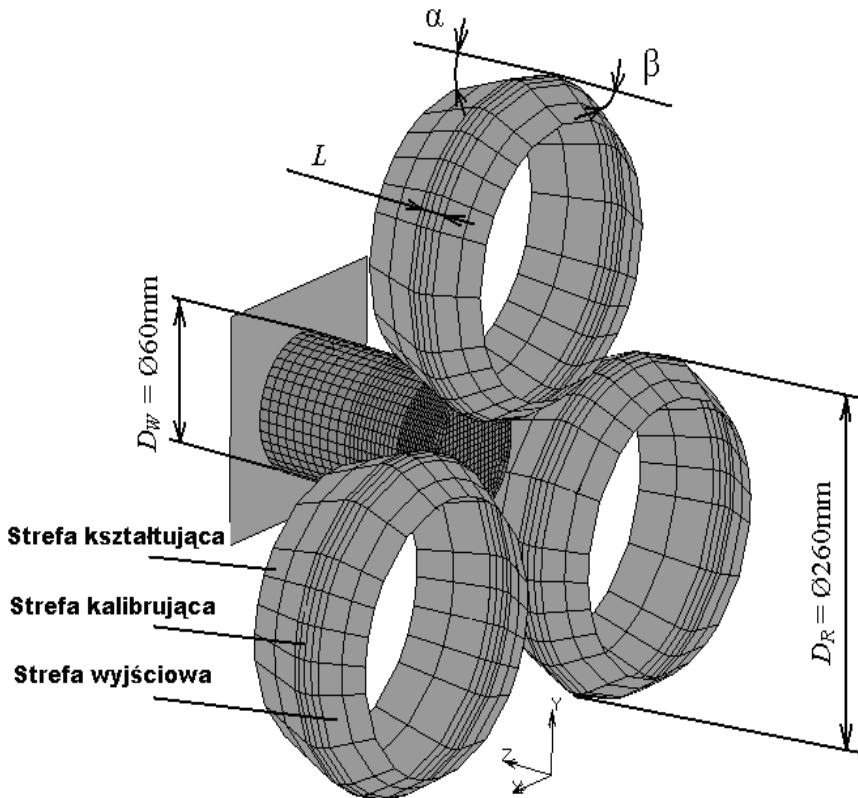
wymuszanego ruchem kształtowanego wsadu. Ze względu na złożony charakter płynięcia metalu, w trakcie modelowania numerycznego procesu przepychania obrotowego, obliczenia prowadzone były wyłącznie w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia.

Stosowano specjalistyczny pakiet komercyjnego oprogramowania MSC.SuperForm 2005 oraz Deform3D. Realizowane obliczenia w pełni uwzględniały zjawiska cieplne występujące podczas kształtowania – we wszystkich prowadzonych symulacjach przyjęto temperaturę wsadu 1150°C oraz temperaturę narzędzi 50°C dla rolek profilowych i popychacza. Ponadto, założono wartość współczynnika wymiany ciepła pomiędzy narzędziami a wsadem 5000 W/m²K, oraz pomiędzy wsadem a otoczeniem 200 W/m²K.



Rys. 3.7. Zestawienie wartości siły wciskającej oraz rozporowej działającej na 1 rolkę przy zastosowaniu różnych wartości kąta kształtującego ($D_w = 60$ mm zredukowana do $D_F = 40$ mm) [56]

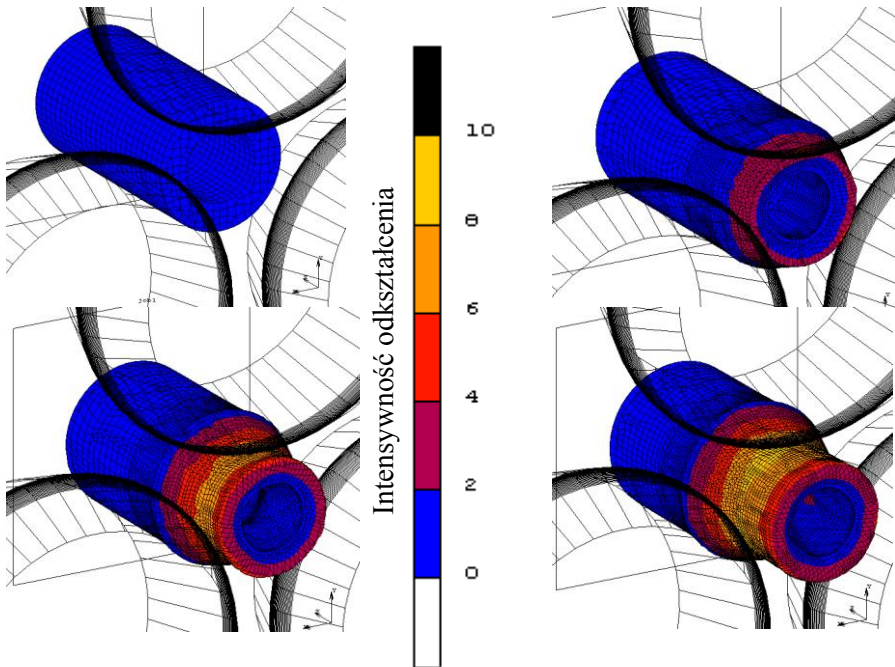
Relatywnie długi czas symulacji (około 7÷10 dni) powodowany był głównie trudnościami przebudowy siatki elementów skończonych (remeshing) oraz problemami natury numerycznej związanymi z ciągle zmieniającymi się powierzchniami kontaktu [6–9]. W kolejnych symulacjach zmieniano kąt kształtowania α w zakresie $\alpha = (20\div 45)^\circ$, natomiast prędkość obrotowa rolek profilowych ω wynosiła $\omega = 2$ lub 3 obr/s. Wartości te skojarzono z prędkością liniową popychacza v mieszczącą się w zakresie $v = (2,5\div 15)$ mm/s uzyskując zmienne wartości posuwu na obrót $p = (0,83\div 7,50)$ mm/obr.



Rys. 3.8. Wykonany na potrzeby obliczeń model procesu przepychania obrotowego z opisem podstawowych parametrów i stref narzędziowych [6]

Wsad do procesu w postaci prętów pełnych lub rur grubościennych, wykonanych ze stali C45, posiadał średnicę zewnętrzną $D_W = 60$ mm i wewnętrzną $D_F = 40$ mm dla wsadów drążonych. Średnica zewnętrzna wsadów $D_W = 60$ mm w trakcie symulacji procesu przepychania obrotowego była redukowana do wartości $D_F = 40$ mm, pozwalając na uzyskanie współczynnika redukcji średnicy $\delta = 1,5$. Przykładowy przebieg procesu przepychania obrotowego wyrobu drążonego wraz z rozkładem intensywności odkształcenia pokazano na rys. 3.9.

W początkowej fazie przepychania obrotowego dochodziło do fazowania krawędzi wsadu wchodzącego w kontakt z rolkami kształtującymi. Ponieważ ten etap procesu nie wnosił do badań zbyt wiele, dostarczając za to dodatkowych trudności, zdecydowano się na modelowanie wsadów z ukształtowanym już wstępnie fazowaniem. Jego kąt odpowiadał ściśle kątowi kształtującemu wybranego zestawu rolek profilowych. Zagwarantowało to, w fazie wejścia w kontakt rolek i wsadu, styk na większej powierzchni.

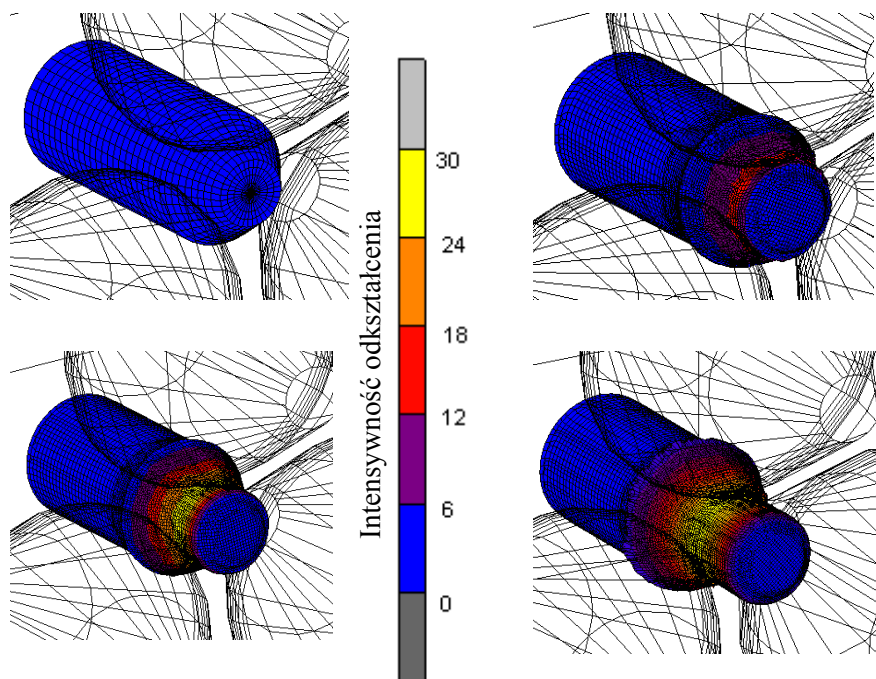


Rys. 3.9. Progresja kształtu wyrobu drążonego oraz rozkłady intensywności odkształcenia w procesie przepychania obrotowego przy kącie pochylenia powierzchni kształtującej $\alpha=30^\circ$ (rys. 3.4) oraz prędkości popychacza $v_p=15$ mm/s [9]

Biorąc pod uwagę wysoką czasochłonność obliczeń (MSC.SuperForm 2005), rozwiązanie to wyraźnie skróciło czas ich prowadzenia. Przykładowa progresja kształtu wyrobu pełnego z wsadu z zamodelowanym wcześniej fazowaniem została przedstawiona na rys. 3.10. Porównując intensywność odkształcenia wyrobu drążonego (rys. 3.9) oraz pełnego (rys. 3.10) uwagę zwraca znaczna dysproporcja wartości tego parametru w końcowym stadium procesu. Różnice te są prawdopodobnie spowodowane znacznie większym, dla kształtowania wsadu pełnego, udziałem odkształceń zbędnych niewpływających na zmianę kształtu uzyskiwanego wyrobu.

3.3 Błędy kształtu

Podczas wytwarzania elementów zarówno pełnych jak i drążonych nieuniknione jest wystąpienie błędów dokładności kształtu tzn. takich, które w jakimś stopniu deformują otrzymywany element w porównaniu z jego zakładanym zarysem teoretycznym.

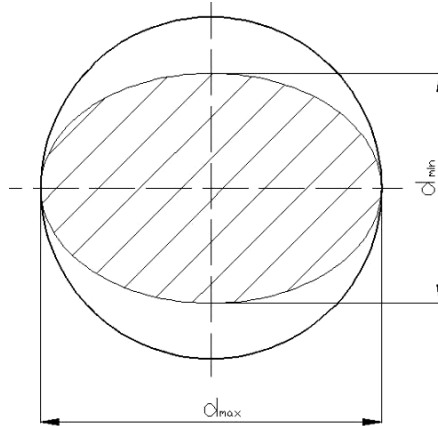


Rys. 3.10. *Progresja kształtu wyrobu pełnego oraz rozkłady intensywności odkształcenia w procesie przepychania obrotowego przy kącie pochylenia $\alpha = 30^\circ$ (rys. 3.4) oraz prędkości popychacza $v_p = 15$ mm/s [9]*

Jednym z najczęściej występujących błędów kształtu w profilach okrągłych jest błąd okrągłości, który występuje zarówno w elementach drążonych jak i w elementach pełnych. Cechą charakterystyczną tego błędu jest niejednorodność wymiarowa w przekroju poprzecznym oraz jest on miarą niezgodności rzeczywistego zarysu przedmiotu z kształtem geometrycznym okręgu. Jest to największa odległość zarysu rzeczywistego od okręgu przylegającego do tego zarysu, mierzona wzdłuż promienia tego okręgu. Najczęściej spotykanymi odchyłkami okrągłości są owalność i graniastość.

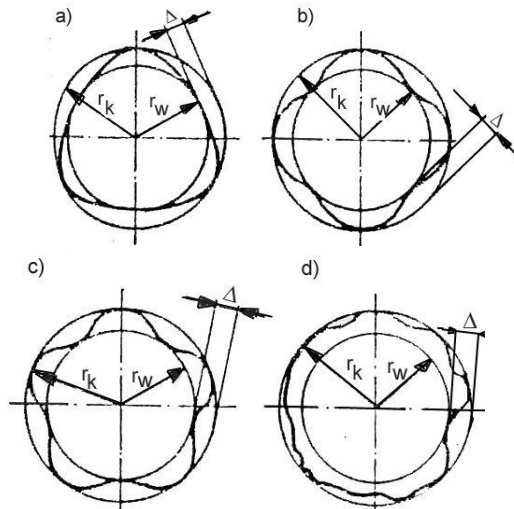
OWALNOŚĆ (rys. 3.11.) – jest to odchyłka kołowości Γ , której wartość zmienia się w ten sposób, że zarys rzeczywisty tworzy figurę zbliżoną do elipsy, której średnice – największa i najmniejsza – występują w kierunkach wzajemnie prostopadłych [38].

$$\Gamma = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \quad (3.8)$$



Rys. 3.11. Owalność [38]

GRANIASTOŚĆ (rys. 3.12) – jest to odchyłka kołowości Δ , której wartości zmieniają się w ten sposób, że zarys rzeczywisty tworzy figurę zbliżoną do wielokąta foremnego z zaokrąglonymi bokami i wierzchołkami. Graniastość różniana jest w zależności od liczby wierzchołków zarysu rzeczywistego.



Rys. 3.12. Graniastość: a) trzykątna ($n=3$), b) czterokątna ($n=4$), c) pięciokątna ($n=5$), d) nieregularna wielokąta foremnego z zaokrąglonymi bokami i wierzchołkami [38]

W szczególnym przypadku zarysu o nieparzystej liczbie wierzchołków charakteryzuje się tym, że średnice określone w różnych kierunkach przyjmują wartości stałe [38].

Innymi rodzajami błędów występujących w obróbce elementów osiowo-symetrycznych są m.in. błędy walcowości, które można podzielić na:

- stożkowość;
- baryłkowość;
- siodłowość;
- prostoliniowość.

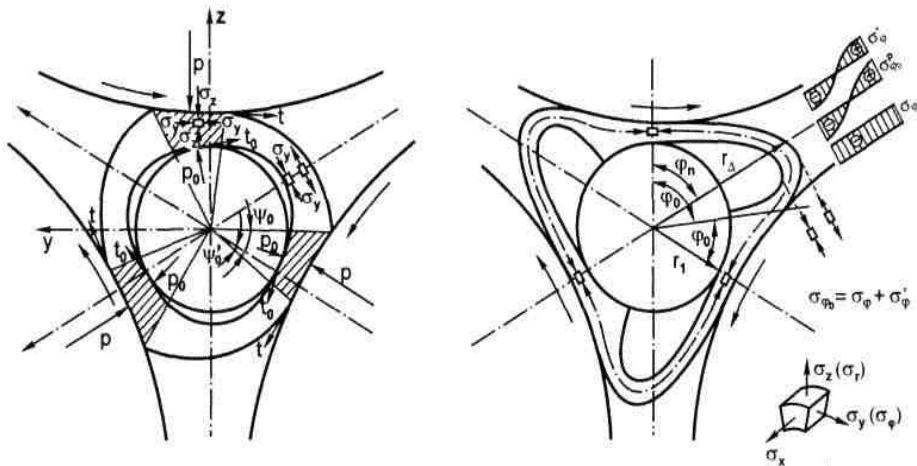
Są to błędy mierzone wzdłuż osi obrotu danego elementu. Parametrem, który zmienia się w kolejnych przekrojach poprzecznych jest średnica wyrobu, mogąca zmieniać się liniowo (proporcjonalnie), jak w przypadku stożkowości, lub nieregularnie np. w baryłkowości lub siodłowości.

Według różnych źródeł błędami, które występują podczas obróbki materiałów osiowo-symetrycznych, szczególnie podczas obróbki plastycznej są błędy *trójkątowania*, opisane przez J. Kazaneckiego [39]. Autor opisuje ten przypadek odkształcenia na przykładzie obróbki rur w walcarkach Assela. Przykładowymi parametrami decydującymi o występowaniu tego zjawiska są: kąt zukosowania, wielkość odkształcenia (gniot na średnicy i grubości ścianki) oraz prędkość walcowania. Jednym ze sposobów, pozwalającym zapobiec występowaniu tego rodzaju błędu jest zmniejszenie kąta zukosowania, lecz wiąże się to również ze zmniejszeniem wydajności walcowania. Jednakże stosowanie dostatecznie małych kątów zukosowania przyczynia się w dużej mierze do występowania złożonego schematu odkształcenia. Zwiększając średnicę i stosunek d/g półfabrykatu i gotowego elementu, wzrasta również wartość odkształcenia poprzecznego. Intensywne odkształcenie poprzeczne powoduje zwiększenie odległości styku metalu z walcem, co narusza warunki obrotu, a przekrój poprzeczny rury pod działaniem sił ściskających traci stateczność i przyjmuje na końcu rury kształt kielicha w postaci trójscianu, co pokazano na rys. 3.13 [39]. Utrudnia to wyrowadzenie wyrobu z walcarki wykluczając jednocześnie jego kalibrowanie.

Wśród dość znacznej ilości zaburzeń kształtu, jakie jesteśmy w stanie zaobserwować, badając różne rodzaje wyrobów, szczególnie należy zwrócić uwagę na te, które są odpowiedzialne za dokładność wymiarową danego przedmiotu. Są to głównie odchyłki prostoliniowości, okrągłości, walcowości oraz współosiowości.

Odrębną grupą zaburzeń kształtu są nierównomierności rozkładów grubości ścianek wyrobów drażonych. Z punktu widzenia przyszłych zastosowań w technice, osiowosymetryczne wyroby drażone typu stopniowane wały i osie, nie posiadające możliwości wyrównoważenia mas, posiadają ograniczony zakres zastosowań. Potencjalny rynek zbytu stanowi w tym przypadku sektor rolniczy z maszynami wyposażonymi w wolnoobrotowe mechanizmy przeniesienia

napędu. W typowych zastosowaniach motoryzacyjnych, a więc przy wyższych zakładanych zakresach prędkości roboczych, konieczne jest uzyskiwanie równomiernych rozkładów grubości ścianek, zwłaszcza w przekrojach poprzecznych wyrobów kształtowanych. Wcześniejsze badania w tym zakresie dla technologii walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów drążonych podano w pracach [4,5,51,52].

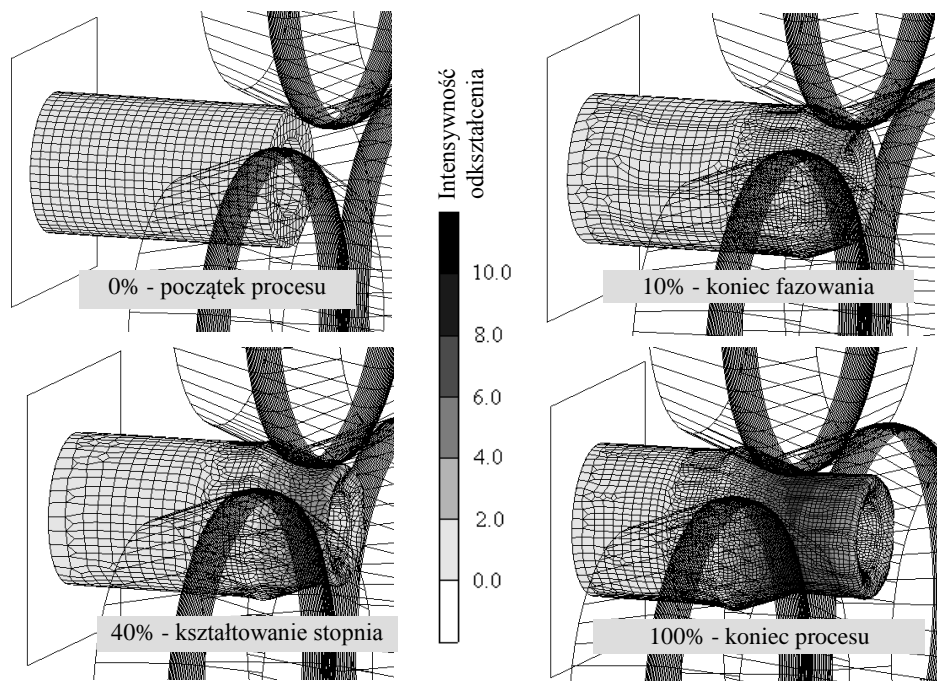


Rys. 3.13. Przekrój poprzeczny trójścianu powstającego na końcu rury wraz ze schematem stanu naprężeń [39]: a) etap początkowy; b) etap końcowy

3.4 Wyniki obliczeń

W celu ograniczenia powstawania opisanych wyżej zaburzeń kształtu wyrobów pełnych i drążonych należy w sposób optymalny dobierać parametry kształtowania, takie jak m.in. prędkości ruchu oraz kształt narzędzi, temperatury procesu. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań nad zaburzeniami kształtu wyrobów przepychanych obrotowo. W prowadzonej analizie doszukiwano się także analogii ze wspomnianymi wyżej pracami nad rozwojem technologii WPK.

W kolejnych symulacjach stosowano kąt kształtowania $\alpha = 30^\circ$ oraz $\alpha = 35^\circ$, gwarantujący pewien stan równowagi pomiędzy osiowym i promieniowym płynięciem materiału w trakcie procesu. Prędkość obrotowa rolek profilowych ω wynosiła $\omega = 2$ lub 3 obr./s. Wartości te skojarzono z prędkością liniową popychacza v mieszczącą się w zakresie $v = (2,5 \div 15)$ mm/s uzyskując zmienne wartości posuwu na obrót $p = (0,83 \div 7,50)$ mm/obr. Przykładowe wyniki symulacji numerycznej procesu przepychania obrotowego wyrobu drążonego pokazano na rys. 3.14.



Rys. 3.14. *Progresja kształtu wyrobu drążonego podczas procesu przepychania obrotowego przy : $\alpha=30^\circ$ oraz $p=5\text{mm/obr.}$ [8]*

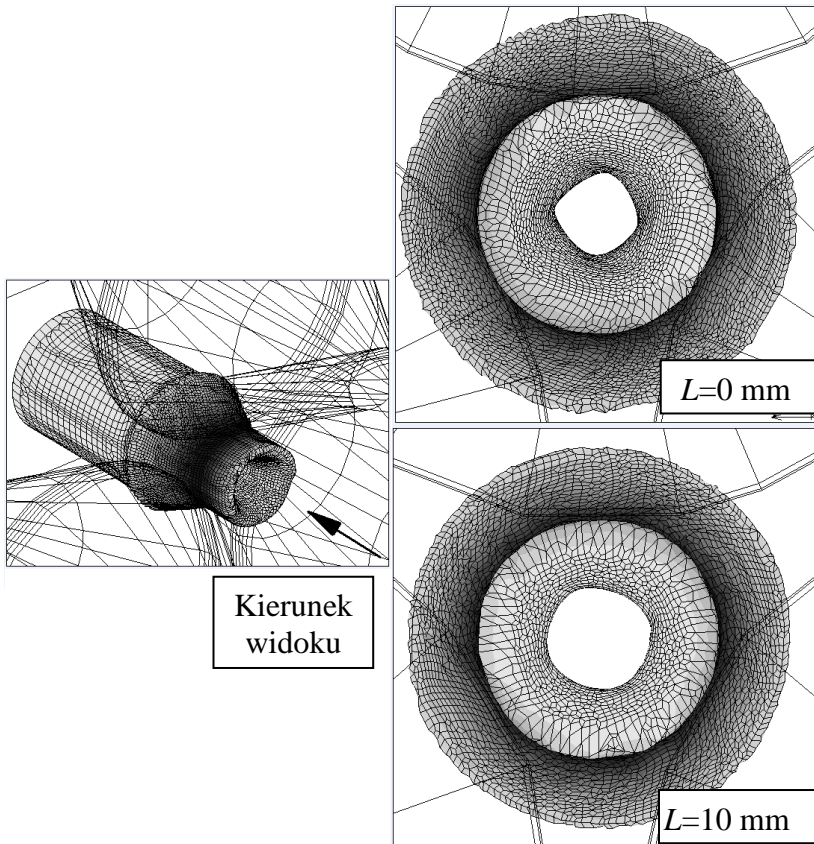
Założono, że strefa kształtująca narzędzia przechodzi w strefę wyjściową płynnie, z uwzględnieniem relatywnie dużego promienia przejścia. Jednakże, w wyniku dalej prowadzonych badań ustalono, że przy posuwie wynoszącym $p = 5 \text{ mm/obr.}$, brak wyodrębnionej strefy kalibrowania przekłada się na zaburzenia profilu kształtowanego wyrobów drążonych. Po wprowadzeniu w narzędziach wyodrębnionej strefy kalibrowania o długości $L = 10 \text{ mm}$ stwierdzono znaczną poprawę stabilności wymiarowej wyrobów, co przedstawiono na rys. 3.15 oraz opisano szerzej w pracach [7, 8].

Wsad do procesu w postaci rur grubościennych, wykonanych ze stali C45, posiadał średnicę zewnętrzną $D_W = 60 \text{ mm}$ i wewnętrzną $D_F = 40 \text{ mm}$. Średnica zewnętrzna wsadów $D_W = 60 \text{ mm}$ w trakcie symulacji procesu przepychania obrotowego była redukowana do wartości $D_F = 40 \text{ mm}$, pozwalając na uzyskanie współczynnika redukcji średnicy $\delta = 1,5$.

Jednakże w wyniku redukowania średnicy wsadu dochodziło do spiętrzania wsadu przed strefą kształtującą rolek roboczych. Zjawisko to nasilało się wraz ze wzrostem prędkości liniowej popychacza, odpowiadającego za podawanie wsadu do przestrzeni roboczej pomiędzy narzędziami. Ponieważ tworzący się w trakcie tego procesu charakterystyczny stożek znacząco zwiększał średnicę

wsadu pełnego w przypadku skrajnym (przy wartości posuwu $p = 7,5$ mm/obr), zdecydowano się na przeprowadzenie dodatkowych analiz numerycznych z zastosowaniem narzędzi o zmodyfikowanym kształcie.

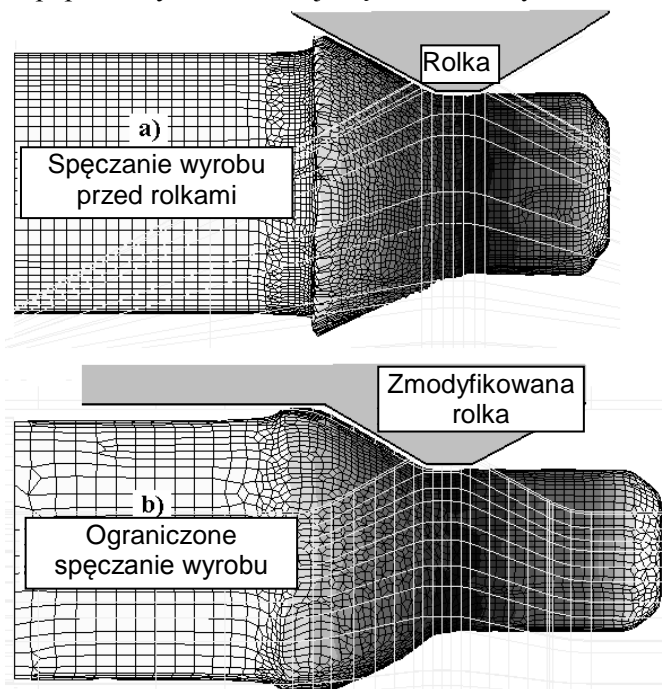
Wyniki przykładowego porównania procesu kształtowania wyrobów pełnych narzędziami zaprojektowanymi pierwotnie oraz po modyfikacji podano na rys. 3.16.



Rys. 3.15. Porównanie wyrobów drążonych przepychanych obrotowo przy zastosowaniu narzędzi nie posiadających wyróżnionej strefy kalibrowania oraz narzędziami wyposażonymi w tę strefę o długości $L=10$ mm ($p=5$ mm/obr.) [8]

Dla podanego na rys. 3.16 przypadku kształtowania wyrobu pełnego z zastosowaniem rolek o zmodyfikowanym kształcie, na rys. 3.17 przedstawiono progresję kształtu oraz rozkład intensywności odkształcenia przepychanego obrotowo wałka.

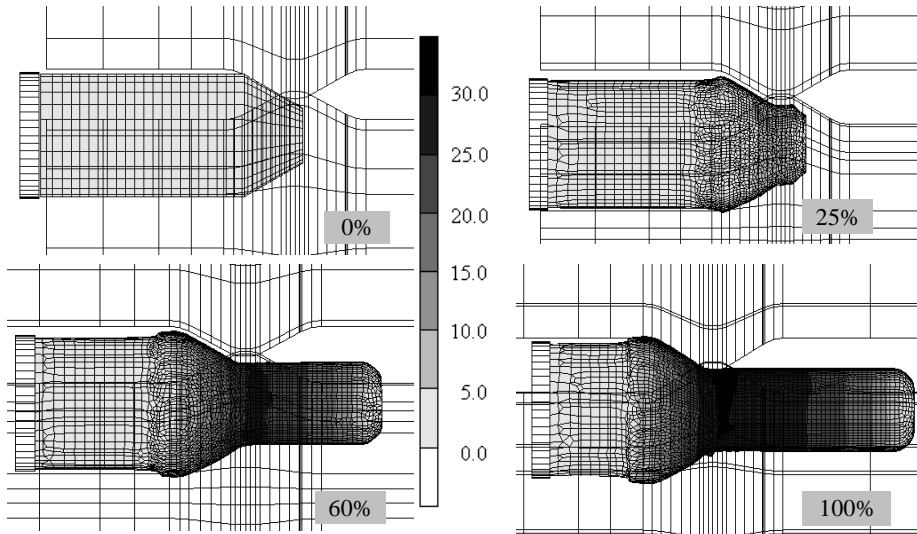
Uzyskanie bardzo korzystnego, z punktu widzenia dalszej obróbki mechanicznej np. uzębień stożkowych, zarysu stopnia zredukowanej średnicy wyrobu pełnego, wiązało się jednak z radykalnym wzrostem odchyłek graniastości w przekrojach poprzecznych stożkowej części wałka – rys. 3.18.



Rys. 3.16. Porównanie spiętrzenia materiału w wyrobie kształtowanym rolkami o pierwotnie założonym zarysie (a) oraz o zmodyfikowanym kształcie ograniczającym promieniowe płynięcie materiału (b) [8]

Tak więc ograniczenie promieniowego płynięcia materiału przed strefą kształtowania rolek roboczych, wywołującego spęczenie wsadu, skutkowało gromadzeniem się jego nadmiaru w przestrzeniach pomiędzy powierzchniami roboczymi rolek. Dalszym efektem tego zjawiska były niestabilności obliczeniowe natury numerycznej, które powodowały częste zatrzymywanie się procedury obliczeniowej, pomimo stosowania opcji częstej przebudowy siatki elementów – remeshing’u. W dalszej części realizowanego programu badań tj. w próbach doświadczalnych stwierdzono, że wszelkie nierównomierności rozkładów grubości ścianek w przekrojach poprzecznych (na zredukowanej średnicy wyrobu) wpływają bezpośrednio na wprowadzenie drgań układu popychacza. Skutkiem tego dochodzi do pojawiania się bicia promieniowego obrotowej głowicy popychacza, a wyrób uzyskuje charakterystyczną, falistą powierzchnię zewnętrzną. Stąd też problemy stabilności w prowadzonych

symulacjach numerycznych tego wariantu kształtowania znajdują swoje potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych.

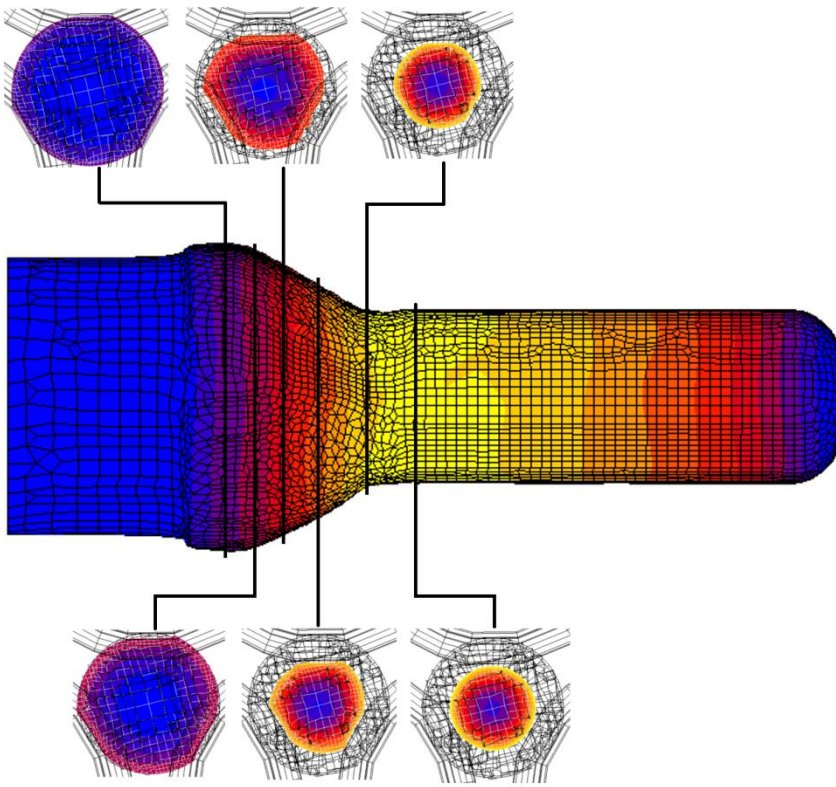


Rys. 3.17. *Progresja kształtu oraz rozkład intensywności odkształcenia wyrobu pełnego przepychanego obrotowo za pomocą narzędzi o zmodyfikowanym kształcie ($\alpha = 30^\circ$, $p = 7,5 \text{ mm/obr.}$) [8]*

W procesie przepychania obrotowego wyrobów drążonych nie stwierdzono występowania tak silnego spiętrzania materiału przed strefą kalibrowania. Naturalnym wyjaśnieniem tego faktu była możliwość płynięcia metalu w kierunku promieniowym także w kierunku osi kształtowanego wyrobu. Dla pełnego poznania tego zjawiska przeprowadzono obliczenia numeryczne dla przypadków kształtowania wsadów drążonych w analogicznym, jak dla kształtowania wsadów pełnych, zakresie posuwów. Na rys. 3.19 przedstawiono zbiorcze zestawienie wyników badań.

Zgodnie z oczekiwaniami stwierdzono, że wraz ze wzrostem wartości posuwu zwiększają się także średnice kołnierzy wyrobów, przy czym zależność ta, dla kształtowania z wsadów pełnych, przyjmuje charakter bliski liniowemu.

Dla badanych przypadków przepychania obrotowego z wsadów drążonych, stwierdzono występowanie tendencji do miejscowego spiętrzania wsadu przy wyższych wartościach posuwów, co uznano za zjawisko szczególnie korzystne dla dalszych zastosowań wytwarzanych w ten sposób stopniowanych wałków drążonych. Niższe wartości posuwu powodowały występowanie wzrostu średnicy wyrobu już w pewnej odległości przed przestrzenią roboczą pomiędzy rolkami – rys. 3.19.

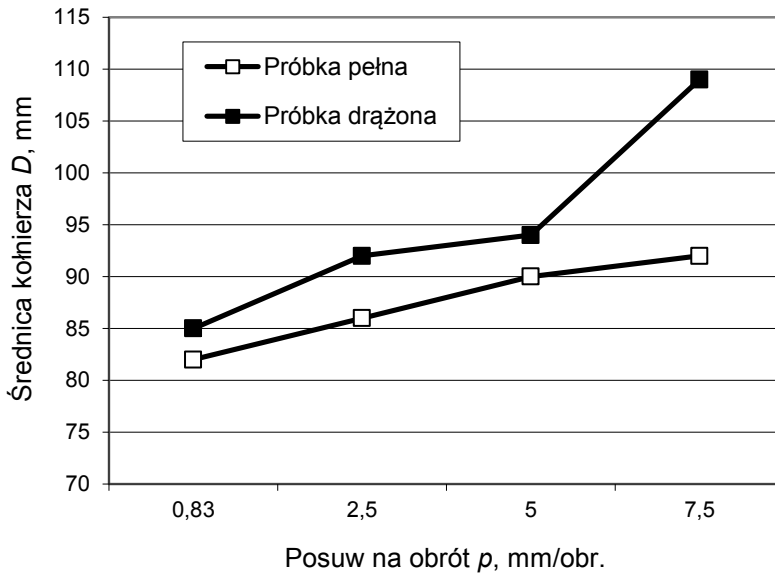


Rys. 3.18. Zaburzenia kształtu w wybranych przekrojach poprzecznych wyrobu pełnego przepychanego obrotowo z zastosowaniem narzędzi o zmodyfikowanym kształcie (rys. 3.16 i rys. 3.17) [8]

Z podanych wyżej przyczyn, do analiz rozkładów grubości ścianek wyrobów drążonych, ze względu na miejscowe spiętrzanie średnicy, wytypowano wyroby kształtowane przy posuwie $p = 5$ oraz $7,5$ mm/obr. Jednakże, biorąc pod uwagę zaburzenia kształtu przekrojów poprzecznych wyrobów pełnych przeanalizowano także analogiczną problematykę dla przepychania obrotowego wyrobów drążonych. Na rys. 3.20 i 3.21 przedstawiono wyniki badań prowadzonych w celu ustalenia zależności pomiędzy posuwem a odchyłkami owalizacji Δ . Wyniki tych symulacji przyniosły rezultaty zbieżne z wcześniejszymi spostrzeżeniami poczynionymi w zakresie spiętrzania kołnierzy.

Widoczne na rys. 3.20, zwłaszcza w przekroju oznaczonym numerem 3, wyraźne zaburzenie przekroju należy uznać za zjawisko szczególnie niepożądane. Dodatkowo, zmiany kształtu powierzchni wewnętrznej wyrobu uwidocznione w przekrojach numer 4 i 5 wskazują na prawdopodobieństwo zastosowania

w prowadzonej symulacji narzędzi o zbyt krótkiej strefie kalibrującej. Na szczęście, zgodnie z wykresem zamieszczonym na rys. 3.19, podniesienie wartości posuwu w znaczący sposób redukuje powstawanie zaburzeń kształtu przekroju poprzecznego ograniczając wielkości naddatków technologicznych koniecznych do przyjmowania w projektowaniu tej technologii.



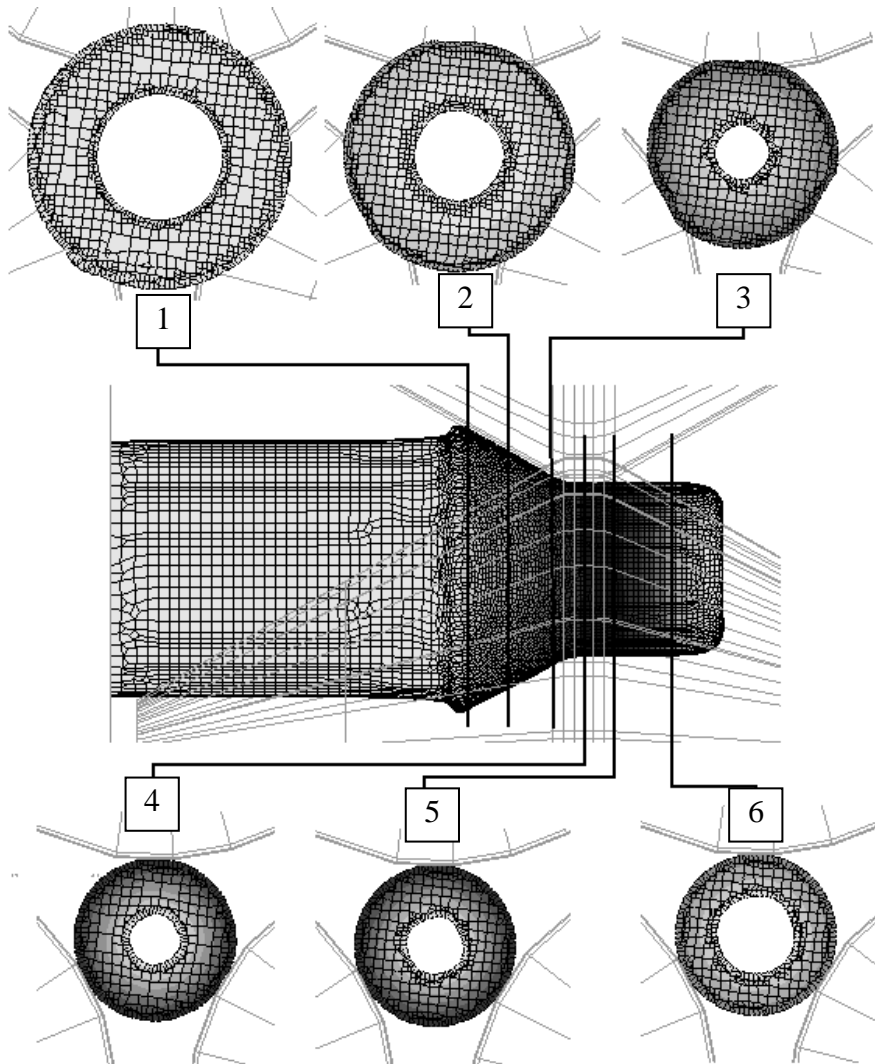
Rys. 3.19. Zestawienie zmian średnic kołnierzy wyrobów pełnych i drążonych przepychanych obrotowo przy podanych wartościach posuwu na obrót [8]

Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych dla posuwu $p = 5$ mm oraz 7,5 mm przedstawiono na rys. 3.22. Oprócz zauważalnych, na zamieszczonym na rysunku wykresie, mniejszych oscylacji grubości ścianki dla wyrobu kształtowanego przy posuwie $p = 5$ mm, stwierdzono także wystąpienie większego spiętrzenia materiału przed strefą kształtowania (stożkowa).

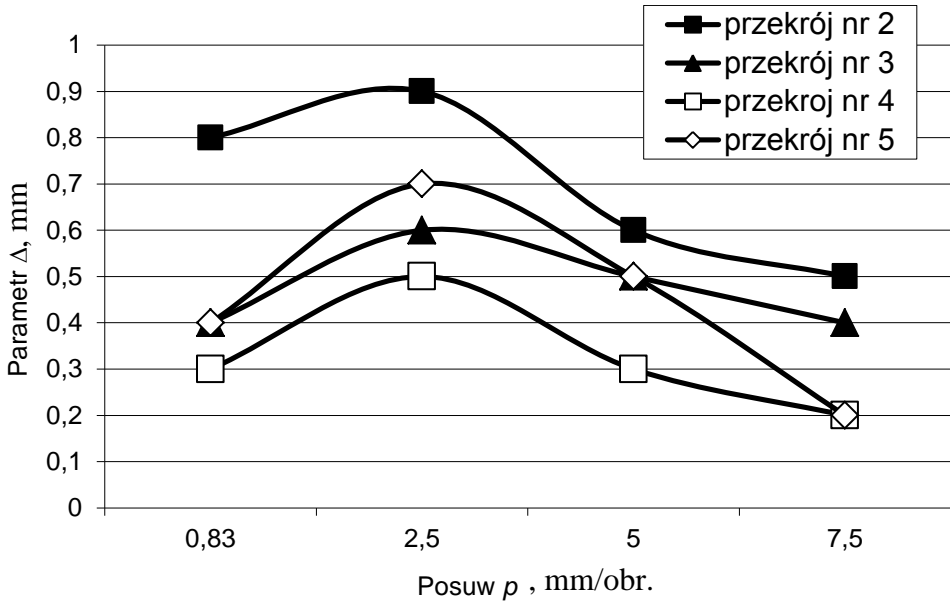
Obszar wystąpienia tego zjawiska rozciągnął się w tym przypadku także szerzej niż w przypadku przepychania z wyższą wartością posuwu. Możliwym wyjaśnieniem tego zjawiska było szybsze, niż w przypadku kształtowania z wsadów pełnych wychładzanie się materiału prowadzące do wzrostu oporów odkształcenia w obszarze redukcji średnicy wyrobu.

Ze względu na pojawianie się spęczania wyrobu przed rolkami (szczególnie podczas kształtowania z wsadów pełnych i przy wyższych wartościach posuwu) zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji ze zmodyfikowanym kształtem rolek – rys. 3.23. Dodanie w konstrukcji rolek cylindrycznej strefy prowadzącej

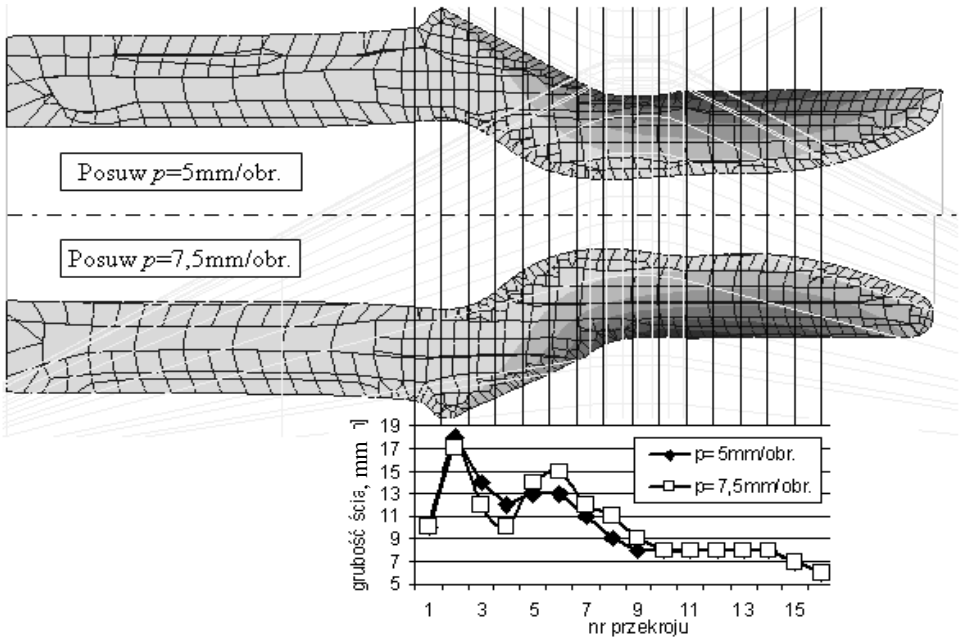
przed wejściem materiału do właściwej strefy kształtującej, miało na celu ograniczenie promieniowego płynięcia metalu na zewnątrz. Przeprowadzone badania numeryczne potwierdziły skuteczność tego rozwiązania (rys. 3.23b), które, ze względu na uzyskiwany kształt wyrobu, naturalnie predysponuje rozwiązanie do kształtowania półwyrobów przeznaczonych do późniejszego nacinania np. uzębień stożkowych.



Rys. 3.20. Zaburzenia kształtu w wybranych przekrojach poprzecznych wyrobu drążonego przepychanego obrotowo przy posuwie $p = 2,5 \text{ mm}$ [9]



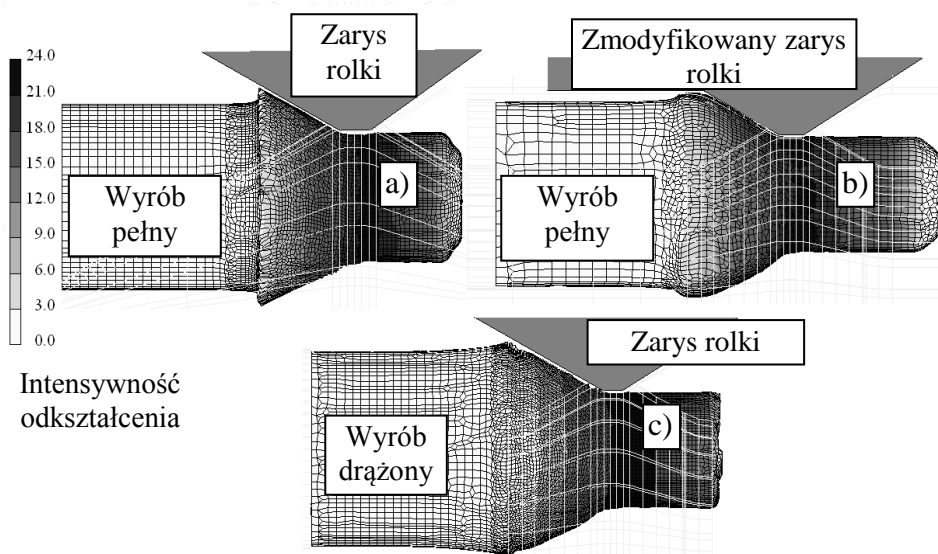
Rys. 3.21. Rozkłady parametru Δ w zależności od wartości posuwu p w wybranych przekrojach wyrobów drążonego (położenie przekrojów na rys. 3.16) [9]



Rys. 3.22. Rozkłady grubości ścianek wyrobów drążonych przepychanych obrotowo przy podanych wartościach posuwu p [9]

Przedstawiona dla porównania analiza kształtowania z wsadu drążonego (rys. 3.23c) pokazuje, iż spęczanie takiego wyrobu podczas przepychania obrotowego jest znoszone płynięciem metalu do osi wyrobu. Zakładać należy, że zjawisko to jest oczywiście także zależne od założonego posuwu oraz grubości ścianek, stosowanego wsadu drążonego.

Pojedyncze próby kształtowania z zastosowaniem rolek profilowych o kącie $\alpha = 20^\circ$ oraz $\alpha = 25^\circ$ wykazały, w przypadku wsadów drążonych, znaczne problemy ze stabilnością numeryczną procesu powodowane silnym płynięciem materiału do osi kształtowanego wyrobu. W warunkach rzeczywistych prawdopodobnie prowadziłyby to do powstawania nadmiernej owalizacji wyrobu lub jego zgniecenia poprzez utratę stateczności.



Rys. 3.23. Spęczanie wsadu pełnego za pomocą rolek o wstępnie wybranym kształcie (a), rolek o kształcie zmodyfikowanym (b) oraz kształtowanie z wsadu drążonego (c) [9]

4. Konstrukcja, budowa i certyfikacja prototypowego agregatu do przepychania obrotowego PO-1 oraz PO-2

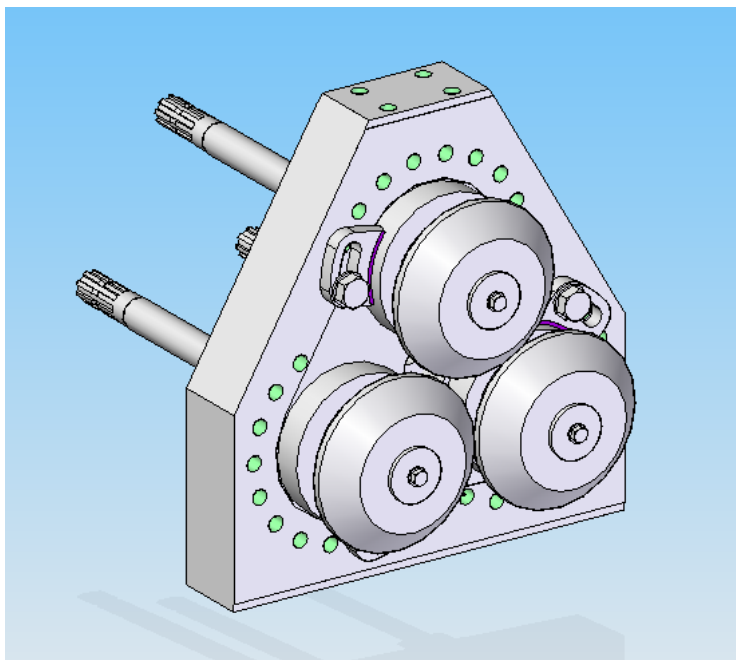
4.1. Założenia

Budowa stanowiska badawczego do prób doświadczalnych nad procesem przepychania obrotowego stanowiła naturalną kontynuację, przedstawionych w poprzednim rozdziale, rezultatów badań teoretycznych poświęconych tej nowej technologii. Zadawalające wyniki wstępnych analiz teoretycznych kształtowania osiowosymetrycznych wyrobów pełnych i drażonych wykorzystano w opracowaniu założeń prototypowego stanowiska badawczego. Szczególne znaczenie dla tego etapu prac miało wykorzystanie programu „Kalkulator siły”, za pomocą którego, w krótkim czasie, oszacowano wartości sił i nacisków dla szerokiego zakresu analizowanych parametrów konstrukcyjnych oraz technologicznych. Ze względu na łatwość montażu, sztywność konstrukcji oraz możliwość dalszych modernizacji stanowiska zdecydowano się na wybór rozwiązania skręcane – spawanego z profili zamkniętych prostokątnych z zastosowaniem żeber oraz płyt usztywniających.

W prowadzonych obliczeniach konstrukcji stosowano także moduł FEMAP programu Solid Edge ST, umożliwiający prowadzenie analizy wytrzymałościowej wybranych części za pomocą metody elementów skończonych. Newralgicznym, z punktu widzenia dokładności wymiarowej uzyskiwanych wyrobów, punktem agregatu była płyta, do której mocowane są oprawy narzędzi rolkowych. Od sztywności tego elementu zależy oczywiście równoległość osi obracających się rolek, co ma decydujący wpływ na jakość wyrobów przepychanych obrotowo. Wybrany do analizy element przedstawiono na rys. 4.1, natomiast na rys. 4.2 przedstawiono wyniki analizy sztywności podanej płyty.

Ze względu na konieczność zapewnienia identycznych prędkości obrotowych rolek narzędziowych w szerokim zakresie prędkości, zaplanowano w tym celu wykorzystanie sprzężonego układu przeniesienia napędu zasilanego silnikiem elektrycznym, wyposażonym w układ dodatkowego chłodzenia stabilizującego warunki pracy silnika elektrycznego przy niższych prędkościach obrotowych. Regulację prędkości obrotowych rolek narzędziowych zamierzano uzyskać za pomocą falownika wektorowego, natomiast zespół popychacza wprowadzającego wsad do przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami zaplanowano wyposażyć w napęd hydrauliczny. Po przyjęciu powyższych założeń koncepcyj-

nych stanowiska przystąpiono do właściwych prac projektowych nad jego konstrukcją. Przyjęte w pracach teoretycznych średnice rolek roboczych i wsadów wraz z prędkościami ruchu poszczególnych narzędzi przeniesiono wprost do projektu konstruowanego stanowiska tak, aby planowane do przeprowadzenia badania doświadczalne mogły stanowić weryfikację uzyskanych wcześniej rezultatów teoretycznych.

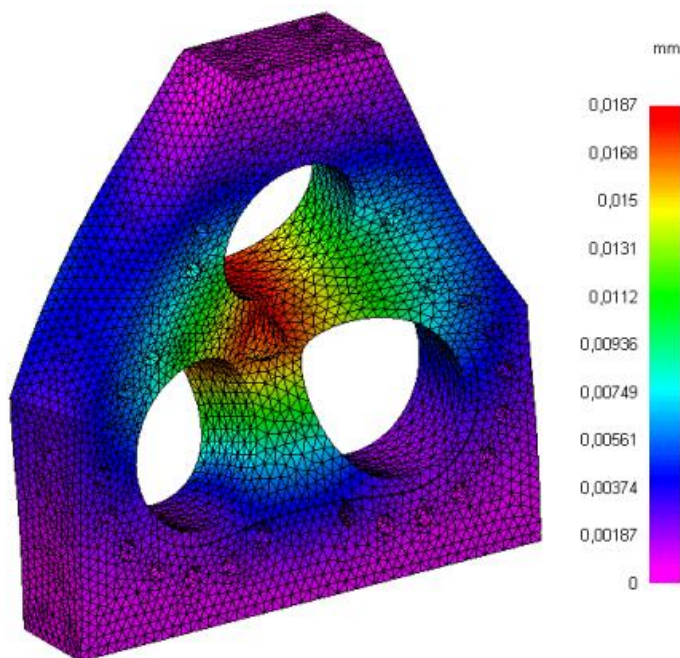


Rys. 4.1. Model płyty wsporczej agregatu do przepychania obrotowego PO-1 z zamontowanymi rolkami, oprawami oraz wałkami napędowymi [9]

4.2. Budowa modelu wirtualnego agregatu

Główne zespoły agregatu (rys. 4.3) to: korpus ramowy, zespół napędowy wyposażony w przekładnię zębatą (stożkowo-walcową) oraz reduktor rozdzielający moment obrotowy na trzy przegubowe wały robocze wyposażone w szybkozłącza oraz zespół kształtujący złożony z trzech, rozmieszczonych symetrycznie na płycie wsporczej, trzpieni przeznaczonych do napędu narzędzi obrotowych- rolek kształtujących. Z drugiej strony maszyny zaprojektowano siłownik hydrauliczny pozwalający na podawanie kształtowanego wsadu do przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami. Korpus maszyny [21] zaprojektowano jako konstrukcję skręcano – spawaną wyposażoną w cztery płyty grodziowe, do

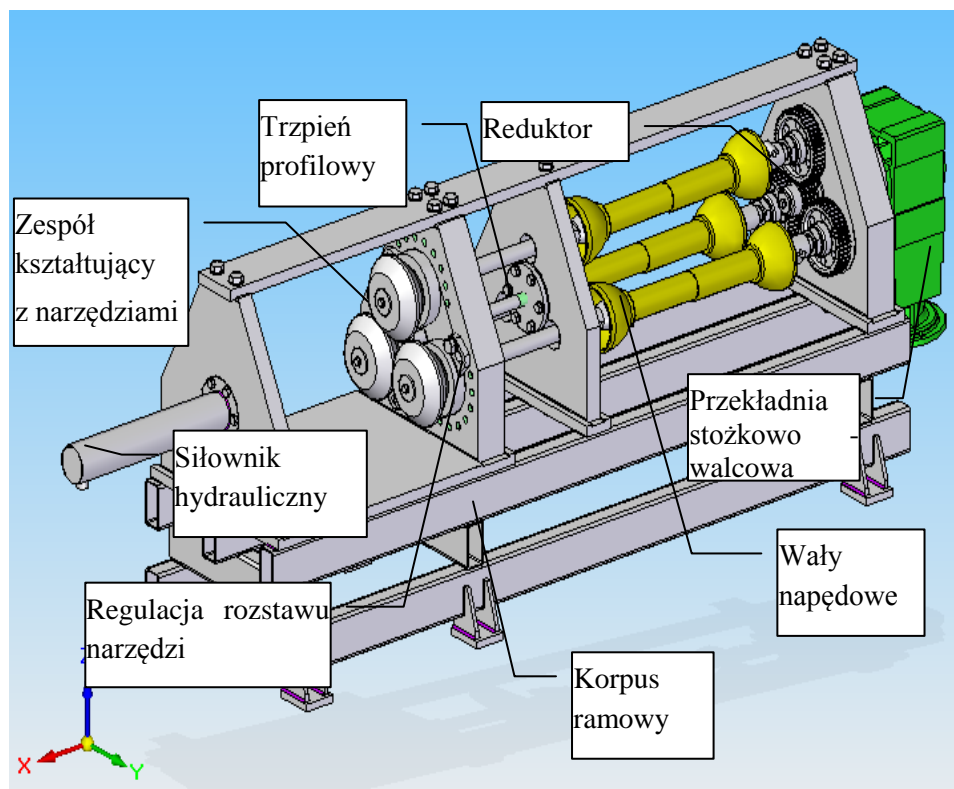
których mocowane jest oprzyrządowanie oraz układ napędowy wyposażony w przekładnię stożkowo - walcową oraz przekładnię redukującą i rozdzielającą moment obrotowy na trzy wałki. Dla zapewnienia odpowiedniej sztywności konstrukcji wykonano obliczenia sprawdzające dla płyty mocującej zespołu kształtującego oraz układu przeniesienia napędu. Jako wartość graniczną przyjęto w nich iż odkształcenia sprężyste analizowanych elementów nie mogą przekroczyć 0,1 mm, co zapewnia osiągnięcie założonych dokładności. Założenie to, dla kształtowania wyrobów w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, przyjęto oczywiście czysto teoretycznie, ponieważ na dokładność kształtowania wyrobów w tak złożonym procesie ma wpływ znacznie większa liczba parametrów, których wzajemne oddziaływanie pozostawało nieznane. Dalsze usztywnianie konstrukcji maszyny prowadziłoby do generowania nieuzasadnionych kosztów, których na tym etapie konstruowania nie uwzględniono.



Rys. 4.2. Analiza sztywności płyty wsporczej agregatu do przepychania obrotowego PO-1 (centralnie przyłożona siła $P = 100$ kN) [9]

Po przeprowadzeniu analizy kilku rozwiązań napędu rolek z zastosowaniem silników elektrycznych o różnych prędkościach obrotowych wyposażonych w przekładnię redukcyjną, zdecydowano się na zastosowanie silnika o mocy 18,5 kW, który w połączeniu z przekładnią stożkowo-walcową, reduktorem oraz falownikiem wektorowym miał umożliwić osiągnięcie prędkości obrotowych

narzędzi w zakresie od 0 do 3,0 obr./s, przy maksymalnej wartości momentu obrotowego około 600 Nm na każdej z rolek. W celu umożliwienia regulacji rozstawu rolek, zaplanowano zastosowanie mechanizmu mimośrodowego wyposażonego w regulację skokową.



Rys. 4.3. Model wirtualny agregatu do przepychania obrotowego PO-1 bez uwidocznionego silnika elektrycznego [9]

Zaplanowane rozwiązanie miało pozwolić na zmianę rozstawu rolek w zakresie 15mm. W konstrukcji agregatu przewidziano zastosowanie siłownika hydraulicznego zasilanego z niezależnego źródła zasilania, umożliwiającego ruch roboczy suwaka z prędkością regulowaną w zakresie od 0 do około 60 mm/s, przy założonej sile maksymalnej do 100 kN. Po przyjęciu maksymalnych, przewidzianych wartości sił i momentów, odkształcenia sprężyste płyty grodziowej, do której przytwierdzono kołnierz siłownika, nie powinny przekroczyć założonej wartości 0,1 mm.

4.3. Wykonawstwo prototypowego agregatu do przepychania obrotowego PO-1

Prototypowy agregat PO-1, przeznaczony do realizacji procesu przepychania obrotowego wyrobów pełnych i drążonych wykonano w oparciu o dokumentację konstrukcyjną. Gotowe stanowisko badawcze wstępnie zmontowano u wykonawcy prac i w tym stanie przewieziono do laboratorium Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Tutaj dokonano montażu finalnego oraz podłączono zasilanie elektryczne oraz hydrauliczne. Fotografie gotowego stanowiska badawczego PO-1 przedstawiono na rys. 4.4 – 4.6.



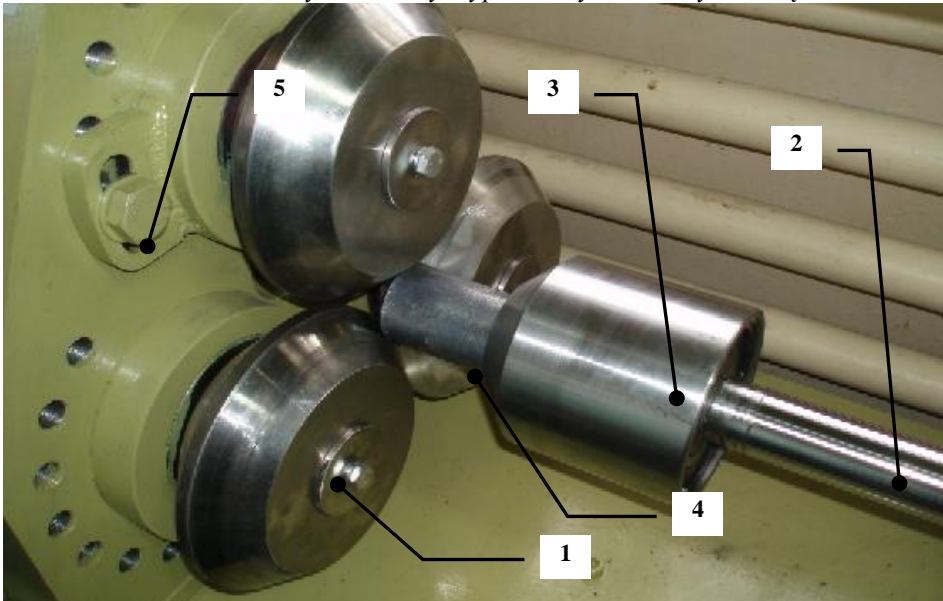
Rys. 4.4. Widok ogólny agregatu do przepychania obrotowego PO-1 (bez zasilacza hydraulicznego)

4.4. Modyfikacja prototypowego agregatu do przepychania obrotowego PO-1 do wersji PO-2

W toku prowadzonych prac badawczych stwierdzono występowanie pewnych utrudnień w obsłudze samego urządzenia (konieczność ręcznego rozsuwania rolek po skończonym procesie, manualna regulacja prędkości popychacza w zależności od siły dławienia zaworu hydraulicznego) oraz w możliwościach aplikacyjnych (rozwiązanie klatki roboczej).

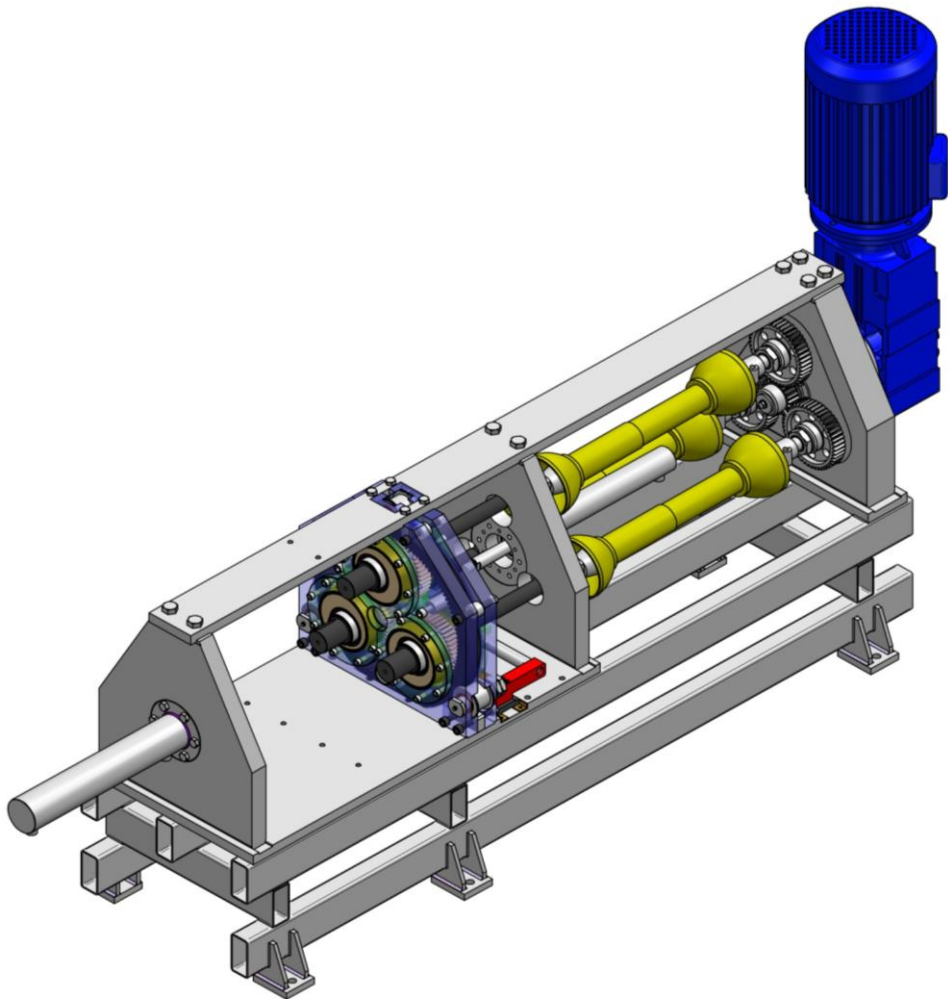


Rys. 4.5. Szafa sterownicza z pulpitem sterującym i falownikiem wektorowym oraz zasilacz hydrauliczny wyposażony w zawory dławiące

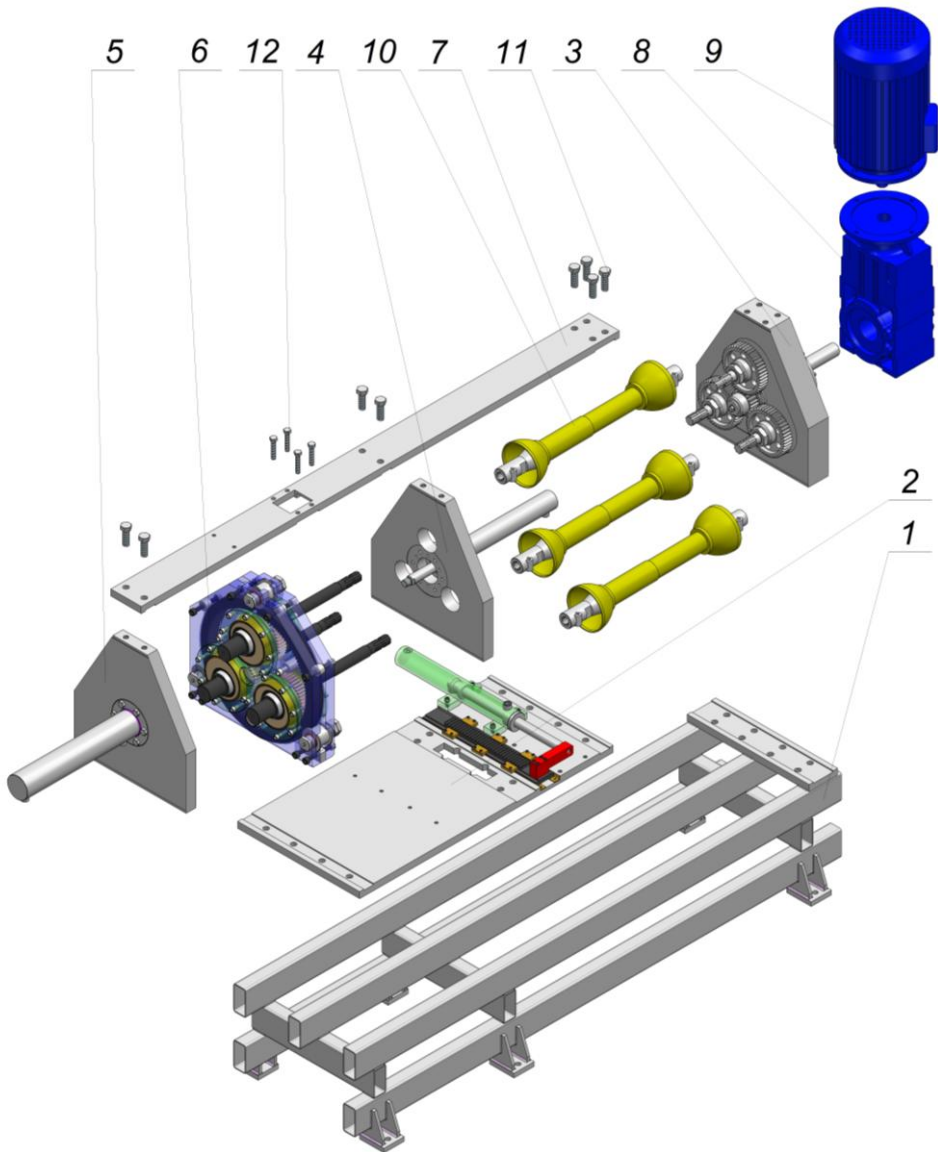


Rys. 4.6. Zespół kształtujący agregatu PO-1 z narzędziami obrotowymi (1), wysuniętym siłownikiem hydraulicznym (2), z głowicą obrotową (3), wsadem (4), w położeniu początku kształtowania oraz mechanizmem mimośrodowym (5), wyposażonym w regulację skokową w celu umożliwienia regulacji rozstawu rolek

W związku z tym zdecydowano się na przeprojektowanie klatki roboczej maszyny z uwzględnieniem możliwości zmiany rozstawu rolek oraz dodaniem dodatkowego zderzaka tylnego sterowanego hydraulicznie. Przeprojektowany agregat PO-2 również został opracowany w Politechnice Lubelskiej i stanowi obecnie specjalistyczne urządzenie kuźnicze do rotacyjnego kształtowania plastycznego metali i ich stopów. Agregat (rys. 4.7) dalej posiada budowę modułową a każdy z modułów stanowi integralny zespół urządzenia, które połączone ze sobą tworzą agregat kuźniczy. Części składowe agregatu kuźniczego do przepychania obrotowego zestawiono na rys. 4.8.



Rys. 4.7. Model przestrzenny agregatu do przepychania obrotowego PO-2

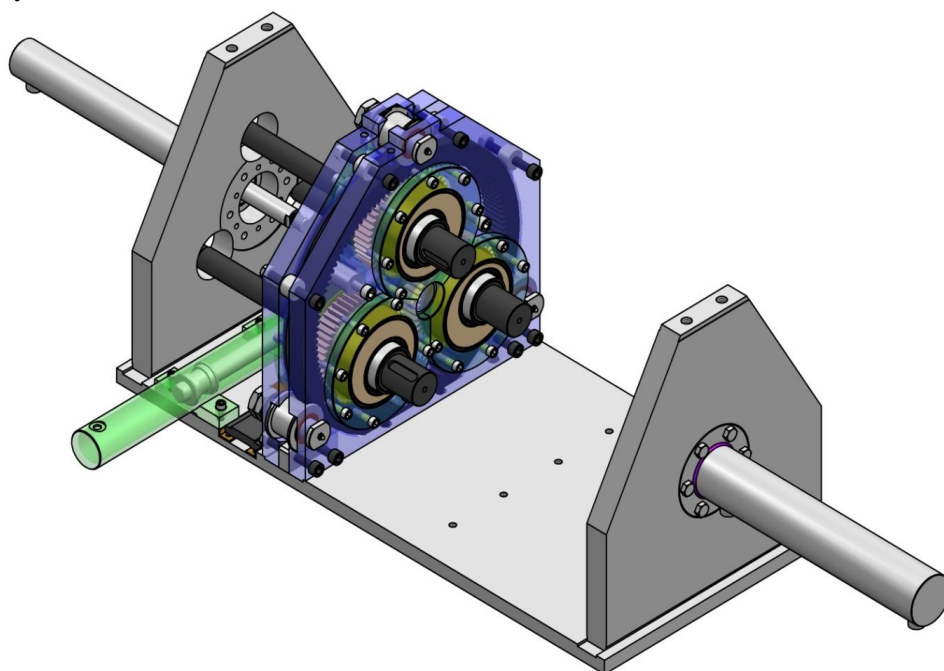


Rys. 4.8. Rozstrzelony widok izometryczny agregatu do przepychania obrotowego PO-2: 1 – rama, 2 – płyta podstawowa wraz z układem napędowym zmiany rozstawu osi, 3 – płyta wsporcza mocowania napędów, 4 – płyta wsporcza silownika tylnego, 5 – płyta wsporcza silownika głównego, 6 – klatka robocza wraz z wałami roboczymi, 7 – płyta spinająca górna, 8 – przekładnia zębata stożkowo – walcowa, 9 – silnik elektryczny, 10 – wały przegubowe, 11, 12 – śruby mocujące

Zespołem spinającym poszczególne moduły agregatu jest rama (1), która wykonana jest jako ażurowa konstrukcja spawana z kształtowników hutniczych zamkniętych. Takie rozwiązanie pozwoliło zmniejszyć masę konstrukcji w stosunku do często spotykanych korpusów wykonanych z płyt stalowych. W ramie wykonane są otwory mocujące do przytwierdzenia zespołów roboczych agregatu. Napęd wałów roboczych urządzenia realizowany jest od silnika elektrycznego, trójfazowego (9) za pośrednictwem przekładni zębatej stożkowo-walcowej (8), które razem tworzą motoreduktor, przymocowany za pośrednictwem kołnierza do płyty wsporczej mocowania napędów (3).

W płycie wsporczej (3) znajduje się również zębata przekładnia rozdzielająca moment obrotowy na trzy wały robocze. Napęd z przekładni rozdzielającej przekazywany jest na wały robocze agregatu za pośrednictwem wałów przegubowych (10). Układ roboczy agregatu składa się z dwóch płyt wsporczych: płyty siłownika tylnego (4) i płyty siłownika głównego (5) oraz klatki roboczej (6), które osadzone są w płycie podstawowej (2), przytwierdzonej do ramy urządzenia. Wszystkie płyty wsporcze wraz z klatką roboczą walców spięte są od góry przy pomocy płyty spinającej (7) i skręcone śrubami (11) i (12).

Model przestrzenny układu roboczego agregatu pokazano na kolejnym rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Układ roboczy agregatu do przepychania obrotowego PO-2
(model 3D)

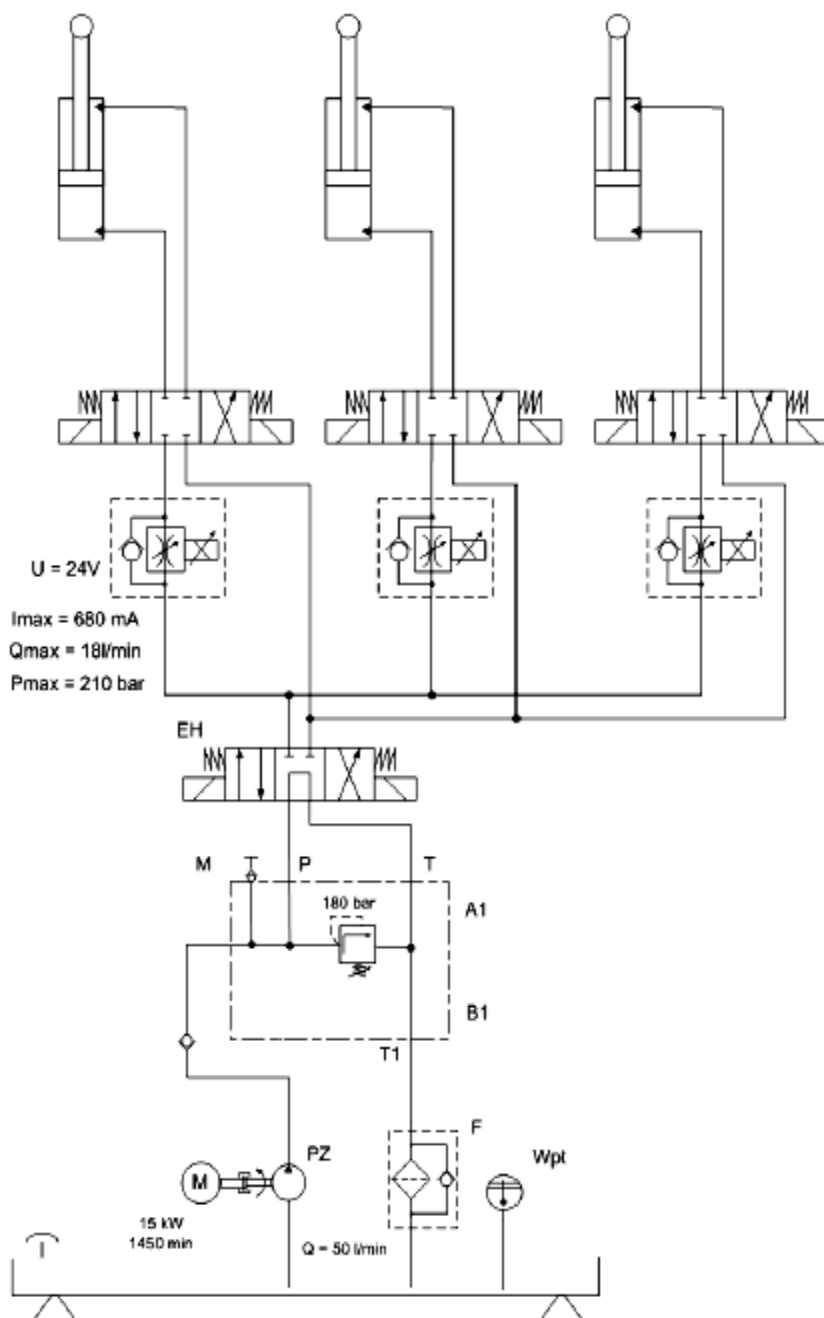
Urządzenie wyposażone jest w trzy siłowniki hydrauliczne: główny, tylny oraz boczny zmiany rozstawu osi. Ruch postępowy kształtowanego półfabrykatu wywołany jest w wyniku oddziaływania siłownika hydraulicznego, głównego, który osadzony jest w płycie wsporczej siłownika głównego.

Agregat wyposażony jest również w siłownik hydrauliczny, osadzony w płycie wsporczej siłownika tylnego, który wykorzystywany jest do napędu trzpieni formujących zarysy wewnętrzne odkuwek drażzonych. Możliwe jest również osadzanie na tłoczysku siłownika tylnego głowic, pozwalających kształtować skrajne stopnie odkuwek. Zmiana rozstawu osi realizowana jest za pośrednictwem siłownika bocznego. Wszystkie siłowniki hydrauliczne zasilane są od niezależnego zasilacza hydraulicznego. Regulacja prędkości przemieszczania się tłoczków siłowników realizowana jest poprzez zespół zaworów i rozdzielaczy proporcjonalnych, sterowanych numerycznie (za pomocą programowalnego sterownika przemysłowego). Dzięki temu możliwe jest programowanie dowolnych cykli pracy maszyny.

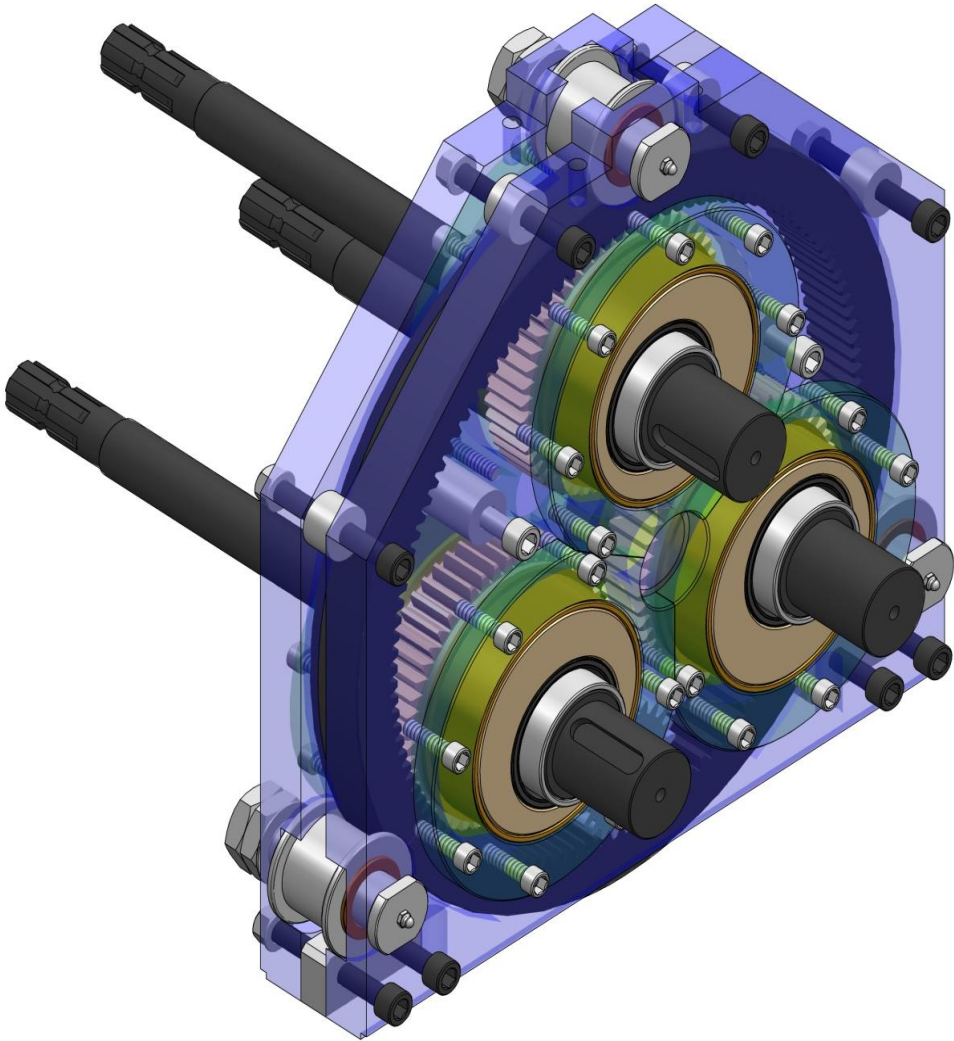
Schemat układu hydraulicznego agregatu do przepychania obrotowego przedstawiono na rysunku 4.10.

Głównym zespołem agregatu do przepychania obrotowego jest klatka robocza, którą pokazano na kolejnych rysunkach 4.11 oraz 4.12. Zaś na rysunku 4.13 przedstawiono sposób działania układu zmiany rozstawu osi w klatce roboczej. Zmiana rozstawu osi wałów roboczych realizowana jest za pośrednictwem trzech tulei mimośrodowych, w których osadzone są wały. Tuleje w części centralnej na średnicy zewnętrznej mają nacięte uzębienie, które zazębia się z wewnętrznym pierścieniem zębatym. Dzięki temu wszystkie trzy tuleje, wraz z wałami głównymi sprzężone są ze sobą mechanicznie. Narzędzia w postaci rolek osadzone są na wysięgowych czopach wałów głównych.

Klatka robocza zbudowana jest z dwóch płyt: przedniej (2) oraz tylnej (3), które umieszczone są w płycie dolnej (1). W płytach przedniej i tylnej wykonane są trzy gniazda, w których osadzone są trzy jednakowe pary tulei łożyskowych (4), spełniające rolę opraw łożyskowych, w których łożyskowane są trzy jednakowe tuleje mimośrodowe. Na obwodzie tulei mimośrodowych nacięte jest uzębienie zewnętrzne proste, natomiast wewnątrz tulei mimośrodowych osadzone są zestawy łożysk stożkowych, w których łożyskowane są wały robocze (6). Dodatkowo tuleje mimośrodowe z naciętym uzębieniem zewnętrznym, sprzężone są ze sobą za pomocą wieńca zębatego z uzębieniem wewnętrznym prostym, który osadzony jest pomiędzy trzema jednakowymi, obrotowymi rolkami ustalającymi (5).



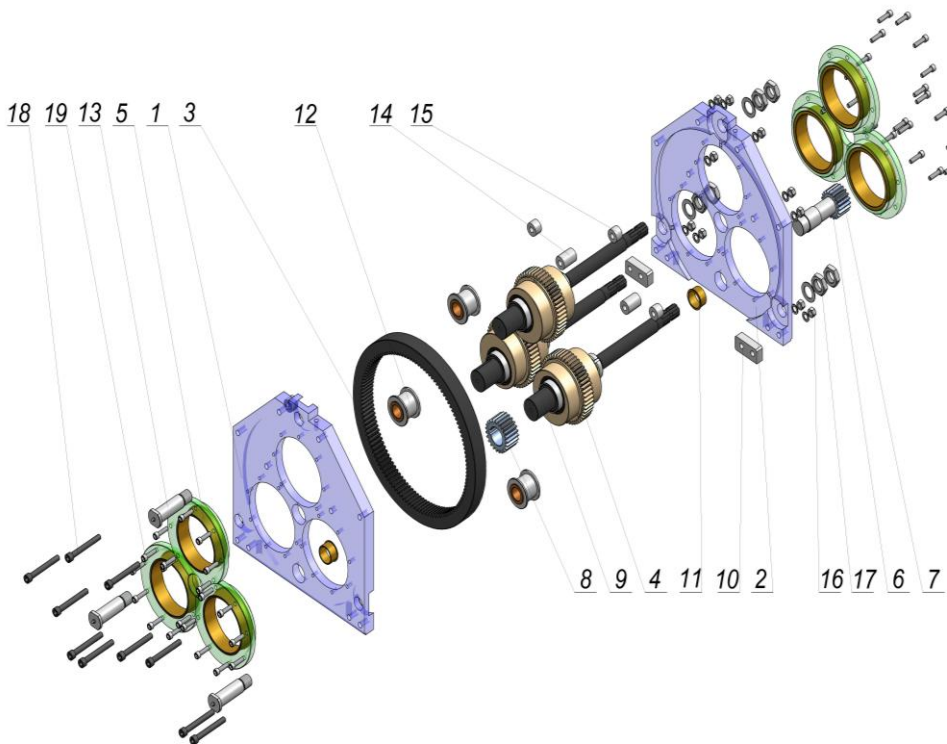
Rys. 4.10 Schemat układu hydraulicznego zastosowanego w agregacie do przepychania obrotowego PO-2



Rys. 4.11. Przestrzenny model klatki roboczej agregatu do przepychnia obrotowego PO-2

W dolnej części wieńca zębatego umieszczono koło zębate napędowe, zazębione z wieńcem zębatym wewnętrznym i osadzone na wałku pośrednim, ułożyskowanym w płytach przedniej i tylnej. Na wysięgowym czopie wałka pośredniego znajduje się drugie koło zębate (7) pośrednie z uzębieniem zewnętrznym, prostym, które jest zazębione z listwą zębatą (8), osadzoną w prowadnicach ślizgowych, umieszczonych w płycie podstawowej. Listwa zębata połączona jest z siłownikiem hydraulicznym (9), który utwierdzony jest do płyty (1). Zasilanie silnika elektrycznego motoreduktora realizowane jest za

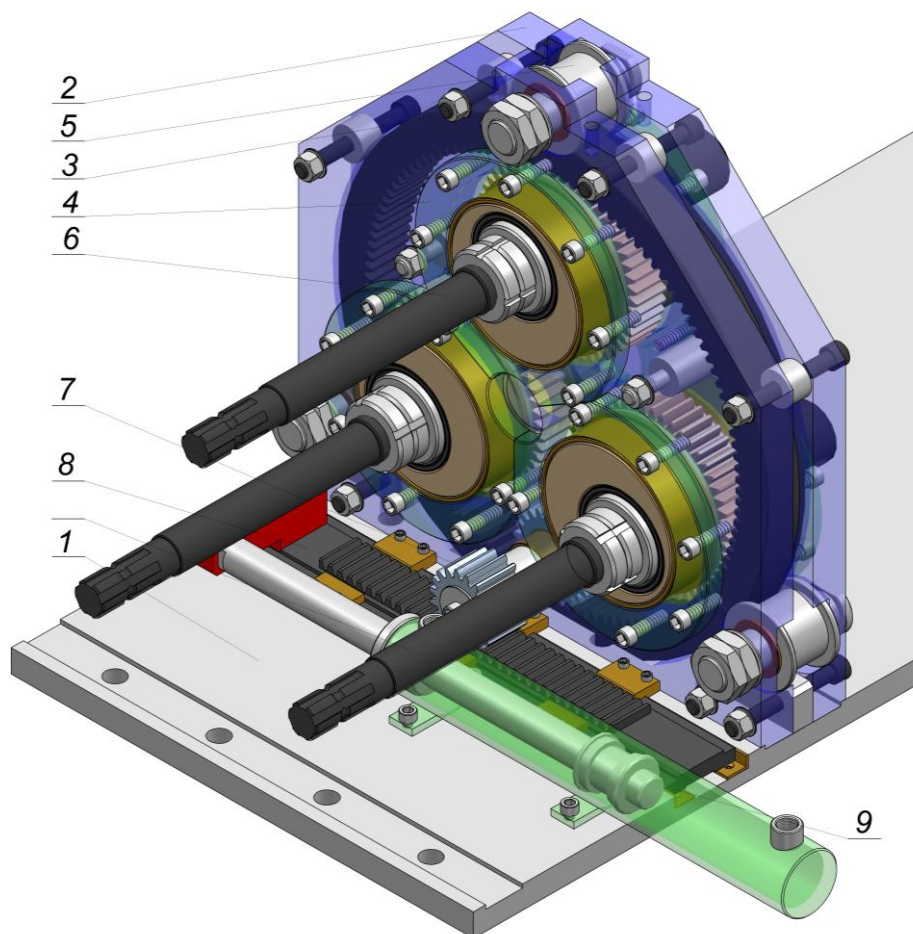
pośrednictwem falownika wektorowego. Dzięki temu możliwa jest płynna regulacja prędkości obrotowej narzędzi w zakresie 10 – 60 obr/min. Podstawowe parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne zestawiono w tabeli 1.



Rys. 4.12. Klatka agregatu do przepychania obrotowego PO-2 (widok izometryczny rozstrzelony): 1 – płyta boczna przednia, 2 – płyta boczna tylna, 3 – wieniec zębany wewnętrzny, 4 – koło zębate mimośrodkowe zewnętrzne, 5 – tuleja łożyskowa wraz z tuleją ślizgową, 6 – wałek napędowy zmiany rozstawu osi, 7 – koło zębate czynne zmiany rozstawu osi, 8 – koło zębate bierne zmiany rozstawu osi, 9 – wał roboczy, 10 – przekładki dystansowe, 11 – tuleja ślizgowa, 12 – rolka prowadząca, 13 – sworzeń rolki, 14, 15 – tuleje dystansowe, 16, 17, 18, 19 – elementy złączne

Na rys. 4.14 przedstawiono gotowy do eksploatacji agregat PO-2 z zamontowanym zestawem narzędzi rolkowych przeznaczonych do kształtowania wałka stopniowanego. Układ mimośrodkowy umożliwiający zmianę rozstawu osi wyposażony w napęd listwą zębatą przedstawiono na rys 4.15. Widoczny jest tam także siłownik hydrauliczny napędzający zespół zde-zraka tylnego, umożliwiający również montaż trzpieni kształtujących (pokazany

trzępień o zarysie sześciokątnym). W celu prowadzenia badań procesów kształtowania plastycznego na gorąco, przy agregacie umieszczono piec komorowy firmy LAC przeznaczony do nagrzewania wsadów – rys. 4.16. W zastosowaniach przemysłowych urządzenie to powinno zostać zastąpione nagrzewem indukcyjnym usytuowanym w przestrzeni przed narzędziami obrotowymi.



Rys. 4.13. Schemat napędu mechanizmu zmiany rozstawu osi wałów głównych agregatu do przepychania obrotowego PO-2 (opis w tekście)

W ramach prowadzonych prac badawczych nad udoskonaleniem agregatu do przepychania obrotowego, dokonano różnych zgłoszeń patentowych obejmujących zarówno proces jak i narzędzia oraz urządzenie [21–23]. Do chwili zamknięcia monografii, na wynalazek pt. „Urządzenie do przepychania obrotowego z regulowanym rozstawem osi” Urząd Patentowy RP udzielił patentu.

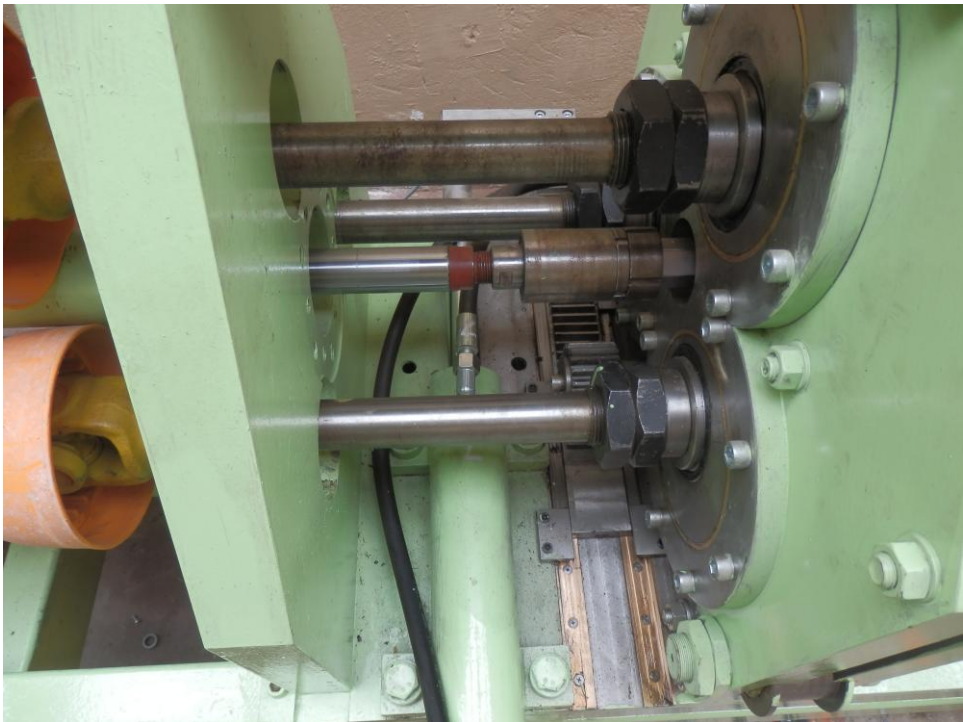
Pozostałe zgłoszenia oczekują na udzielenie praw ochronnych. Ponadto, opracowane w ramach modernizacji agregatu do przepychania obrotowego, zgłoszenie pt. „Sposób przepychania obrotowego z regulowanym rozstawem osi stopniowanych odkuwek” objęte jest projektem dofinansowania zgłoszenia patentu europejskiego odbywającego się w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007÷2013, Priorytet 1, Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Działanie 1.3 Wsparcie projektów B+R na rzecz przedsiębiorstw realizowanych przez jednostki naukowe, Poddziałanie 1.3.2, Wsparcie ochrony własności przemysłowej tworzonej w jednostkach naukowych w wyniku prac B+R.

Tab. 1. Podstawowe parametry agregatu do przepychania obrotowego

Parametr	Oznaczenie	Wielkość
Moc nominalna silnika motoreduktora, kW	N	16
Maksymalny moment obrotowy na wale głównym, Nm	M	850
Maksymalna prędkość obrotowa narzędzi, obr/min	n	60
Minimalna prędkość obrotowa narzędzi, obr/min	n	10
Moc nominalna silnika agregatu hydraulicznego, kW	N	22
Maksymalne ciśnienie robocze zasilacza, MPa	p	25
Maksymalny wydatek zasilacza hydraulicznego, l/min	Q	50
Średnica siłownika głównego, mm	D ₁	80
Średnica siłownika tylnego, mm	D ₂	63
Średnica siłownika zmiany rozstawu osi, mm	D ₃	63
Maksymalna prędkość ruchu tłoczyska siłownika głównego, mm/s	v	25
Maksymalny rozstaw osi, mm	a _{max}	Ø320
Minimalny rozstaw osi, mm	a _{min}	Ø240
Maksymalna średnica narzędzi, mm	D _{max}	Ø260
Maksymalna średnica wsadu, mm	d _{max}	Ø100



Rys. 4.14. Widok ogólny agregatu do przepychania obrotowego PO-2 (opis w tekście)



Rys. 4.15. Widok mimośrodowego układu zmiany rozstawu osi narzędzi kształtujących oraz zderzaka tylnego z zamontowanym trzpieniem sześciokątnym (opis w tekście)



Rys. 4.16. Piec komorowy firmy LAC wykorzystywany do nagrzewania wsadów badawczych

4.5. Procedura certyfikacji

Po przeprowadzeniu identyfikacji aktów prawnych znajdujących zastosowanie w niniejszym przypadku stwierdzono, że agregat do przepychania obrotowego typ PO-1 oraz typ PO-2, zgodnie z art. 1 pkt. 2, jest maszyną i podlega zgodności z zasadniczymi wymaganiami Dyrektywy 2006/42/WE „Maszyny”. W/w maszyna nie jest na liście załącznika nr 4 Dyrektywy maszynowej, w związku z czym nie znajduje zastosowania procedura badania typu WE przez jednostkę notyfikowaną. Ograniczono się zatem wyłącznie do analizy modułu A.

Zainstalowany w agregacie zasilacz hydrauliczny z siłownikiem o dopuszczalnym ciśnieniu 160 bar i maksymalnej pojemności układu hydraulicznego 7,0 litrów podlega wymaganiom kategorii artykułu 3 ust. 3 (załącznik 2, tablica 4) Dyrektywy 97/23/WE „Urządzenia ciśnieniowe”. Według art. 3 ust. 3 Dyrektywy 97/23/WE w/w urządzenie ciśnieniowe powinno być projektowane i wytwarzane z „Uznaną praktyką inżynierską” w celu zapewnienia bezpiecznego ich użytkowania i nie powinno być oznakowane znakiem CE na zgodność z tą Dyrektywą.

Ponieważ agregat zasilany jest napięciem 400V, w związku z tym, podlega zasadniczym wymaganiom Dyrektywy 2006/95/WE „Sprzęt elektryczny niskiego napięcia (50 ÷ 1000V)”- moduł A. Zastosowane urządzenia elektryczne i elektroniczne są oznaczone znakiem CE, w związku z czym nie zachodzi konieczność przeprowadzania oceny na zgodność z Dyrektywą 2004/108/WE „Kompatybilność elektromagnetyczna”.

Do oszacowania zagrożeń zastosowano normy:

PN-EN ISO 12100-1:2005	Maszyny. Bezpieczeństwo. Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania. Część 1: Podstawowa terminologia, metodologia.
PN-EN ISO 12100-2:2005	Maszyny. Bezpieczeństwo. Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania. Część 2: Zasady techniczne.
PN-EN 60204-1:2001	Bezpieczeństwo maszyn. Wyposażenie elektryczne maszyn. Wymagania ogólne.
PN-84/N-01307	Hałas. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące przeprowadzenia pomiarów.
PN-EN 61310-1:2000	Bezpieczeństwo maszyn. Wskazywanie, oznaczanie i sterowanie. Wymagania dotyczące sygnałów wizualnych, akustycznych i dotykowych.
PN-EN 294:1994	Bezpieczeństwo maszyn. Odległości bezpieczeństwa uniemożliwiające sięganie kończynami górnymi do stref niebezpiecznych.
PN-EN-982:1998	Bezpieczeństwo maszyn. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa układów hydraulicznych i pneumatycznych i ich elementów. Hydraulika.

W zakresie identyfikacji oraz oceny zagrożeń, do istotnych czynników niebezpiecznych i szkodliwych wg PN-EN ISO 12100-1:2005 i PN-EN ISO 12100-2:2005, które podczas użytkowania agregatu mogą stwarzać niebezpieczeństwo, zakwalifikowano:

- zagrożenia mechaniczne;
- zagrożenia elektryczne;
- zagrożenia termiczne;
- zagrożenie hałasem;
- zagrożenia wynikające ze stosowania wyposażenia hydraulicznego.

W ocenie wartości „Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia” przyjęto stopnie oceny od 1 do 5. Za wartość progową uznano stopień oceny 1, dla którego przyjęto, że wystąpienie zagrożenia jest znikome, a maszyna, ze względu na rozwiązania konstrukcyjne, jest bezpieczna sama w sobie lub po zastosowaniu środków zmniejszających ryzyko.

Wyznaczenie dopuszczalności „Stopnia zagrożenia” ryzyka oraz zalecenia dotyczące działań wynikających z oceny tego ryzyka przeprowadzono według PN-N-18002:2000 i podano w tabelach umieszczonych w dodatku na końcu książki. Przyjęto stopnie oceny w zakresie od 1 do 5. Osiągnięcie zmniejszenia ryzyka zawodowego przeprowadzono poprzez zastosowanie:

- rozwiązań technicznych urządzeń ochronnych;
- uzupełniających środków ochronnych (osłony);
- środków ochrony indywidualnej;
- zmniejszenie ryzyka za pomocą informacji dla użytkownika.

Zgodnie z PN-EN ISO 12100-1:2005 odpowiednie zmniejszenie ryzyka może być uważane za osiągnięte, jeżeli odpowiedź na każde z następujących pytań będzie pozytywna:

- czy uwzględniono wszystkie rodzaje pracy i wszystkie sposoby ingerencji? – *uwzględniono*,
- czy eliminacja zagrożeń lub zmniejszenie ryzyka za pomocą środków ochronnych została zastosowana? – *została zastosowana*
- czy zagrożenia zostały wyeliminowane lub stwarzane przez nie ryzyko zostało ograniczone do najniższego praktycznie możliwego poziomu? – *zagrożenia zostały ograniczone do najniższego poziomu*,
- czy upewniono się, że zastosowane środki nie stworzyły nowych zagrożeń? – *upewniono się, że zastosowane środki nie stworzyły nowych zagrożeń*,
- czy użytkownicy zostali dostatecznie poinformowani i ostrzeżeni o ryzyku resztkowym? – *zostali poinformowani*,
- czy upewniono się, że warunki pracy operatorów nie zostały zagrożone zastosowanymi środkami ochronnymi? – *upewniono się*,

- czy zastosowane środki ochronne są ze sobą zgodne? – *są ze sobą zgodne,*
- czy uwzględniono dostatecznie skutki, jakie mogą wyniknąć z zastosowania maszyny zaprojektowanej na użytek profesjonalny/przemysłowy w dziedzinie nieprofesjonalnej/ nieprzemysłowej? – *uwzględniono,*
- czy upewniono się, że zastosowane środki nie ograniczyły nadmiernie zdolności do spełniania jej funkcji? – *upewniono się.*

Na tym proces iteracyjnego zmniejszenia ryzyka zakończono. Po przeprowadzeniu całości przewidzianych procedur i badań orzeczono, że przedstawiony do oceny agregat do przepychania obrotowego typ PO-1 spełnia zasadnicze wymagania Dyrektywy 98/37/WE i 2006/95/WE oraz artykułu 3 ust. 3 Dyrektywy 97/23/WE.

Na tej podstawie producent agregatu wystawił deklarację zgodności wg wzoru normy PN-EN 45014:2000 „Ogólne kryteria deklaracji zgodności składanej przez dostawcę” i oznaczył wyrób znakiem zgodności CE umieszczonym na tabliczce znamionowej.

5. Badania procesu kształtowania w agregacie PO-1

5.1. Badania wstępne – montaż głowicy obrotowej

Po zakończeniu procedury certyfikacji przystąpiono do eksploatacji stanowiska. Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie prób funkcjonalno – ruchowych w celu ustalenia podstawowych parametrów kinematycznych procesu oraz dokonania niezbędnych regulacji układu [10].

W tym celu wykonano pomiary prędkości ruchu popychacza oraz ustalono odpowiednie zakresy ustawień falownika wektorowego odpowiadającego za prędkość obrotową rolek roboczych. Po regulacjach dotyczących wzajemnego skojarzenia prędkości ruchu elementów roboczych przystąpiono do pierwszych prób kształtowania wyrobów stopniowanych. Na tym etapie prac zdecydowano się na zastosowanie wsadów wykonanych z ołowiu (gatunek Pb1), co umożliwiło prowadzenie procesu przepychania obrotowego bez konieczności nagrzewania wsadów oraz z minimalnymi wartościami posuwu. Dla zapewnienia bezpośredniego porównania, już na tym etapie badań zastosowano wsady pełne i drażone. W obu przypadkach średnice zewnętrzne wsadów miały $D_W = 60$ mm, natomiast, w przypadku wsadów drażonych, średnice wewnętrzne miały wartość odpowiednio $D_F = 40$ oraz 24 mm. Jednakowa średnica zewnętrzna wsadów $D_W = 60$ mm w trakcie procesu przepychania obrotowego była redukowana, analogicznie jak w badaniach teoretycznych, do wartości $D_F = 40$ mm.

Pierwsze próby laboratoryjne wykazały poprawne funkcjonowanie wszystkich mechanizmów roboczych agregatu oraz potwierdziły możliwość kształtowania osiowosymetrycznych wyrobów stopniowanych metodą przepychania obrotowego. Próby te potwierdziły także wcześniejsze przypuszczenia odnoszące się do zaburzeń wprowadzanych poprzez nieosiowe prowadzenie wsadów w tym procesie. Jednakże, założenia konstrukcyjne głowicy obrotowej zmodyfikowano po przeprowadzeniu pierwszych prób z prototypem agregatu. W badaniach tych brak współosiowości prowadzenia wsadu prowadził do zniszczenia wyrobu oraz zagrażał trwałości uszczelnień siłownika hydraulicznego popychacza. Efektem prowadzonych prób były wyroby o silnie zniekształconych powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych oraz o charakterystycznej, silnie pofalowanej fakturze części o zredukowanej średnicy. Przykładowe wyroby uzyskane w tym początkowym etapie prób funkcjonalno- ruchowych przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Przepychane obrotowo wyroby wykonywane z ołowiu gatunku Pb1 w trakcie prób funkcjonalno – ruchowych agregatu PO-1 bez zastosowania głowicy obrotowej montowanej na popychaczu [9]

Dla zabezpieczenia się przed tym niekorzystnym zjawiskiem zespół popychacza wyposażono w specjalną głowicę obrotową umieszczoną na końcu siłownika – rys. 5.2. Rozwiązania konstrukcyjne głowicy oparto na zabudowie układu trzech łożysk (jedno poprzeczne i dwa wzdłużne) w korpusie wyposażonym w gniazdo mocujące wsady. Rozwiązanie to umożliwiło proste pozycjonowanie wsadów o średnicach skorelowanych z pierścieniowymi wkładkami redukcyjnymi. Szczególnie masywna budowa głowicy miała na celu przystosowanie tego układu do odprowadzania nadmiaru ciepła wydzielanego w trakcie przewidzianego w dalszym etapie prac kształtowania stali na gorąco.

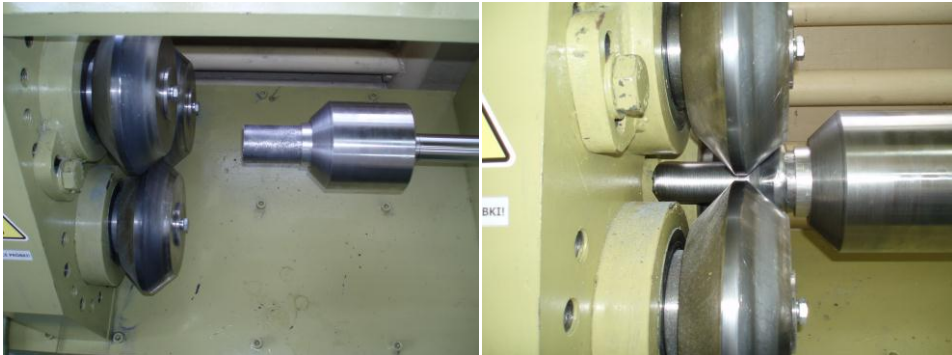
5.2. Kształtowania z wsadów pełnych i drażonych wykonanych z ołowiu Pb1

Po opisanej zmianie budowy agregatu PO-1 podjęto próby kształtowania ze zmodyfikowanym prowadzeniem wsadów. Przykładowy proces kształtowania wyrobu pełnego z zastosowaniem materiału modelowego w postaci ołowiu przedstawiono na rys. 5.3, na którym dobrze widoczna jest głowica obrotowa oraz pierścieniowa wkładka redukcyjna utrzymująca wsad w pozycji osiowej względem przestrzeni roboczej pomiędzy narzędziami rolkowymi. Gotowe

wyroby pełne oraz drażone, uzyskane w procesie przepychania obrotowego, pokazano na rys. 5.4.



Rys. 5.2. Głowica obrotowa z wsadem w tulei prowadzącej w trakcie prób funkcjonalno – ruchowych agregatu PO-1[9]



Rys. 5.3. Przepychanie obrotowe wyrobu pełnego wykonywanego z ołowiu gatunku Pb1 [9]

W obu przypadkach kształtowania z wsadów pełnych i drażonych, na zdjęciu wyraźnie uwidoczniiony jest skutek intensywnego powierzchniowego płynięcia metalu objawiający się wgłębieniem czołowym (w przypadku wyrobu pełnego) oraz wywiniciem materiału (wyrób drażony). Pojawianie się tego zjawiska jest także cechą charakterystyczną procesów walcowania poprzeczno-

klinowego i świadczy o podobnym schemacie płynięcia metalu. Takie wnioski przynosi także obserwacja stożkowej strefy spęczania wyrobu przed rolkami obrotowymi, gdzie także tworzy się charakterystyczne spiętrzenie materiału. W obu analizowanych przypadkach zjawisko to, oprócz spęczania wyrobów, prowadzi do niekontrolowanego wywijania materiału. To niekorzystne zjawisko wystąpi także później w przypadku realizacji procesów przepychania obrotowego z wsadów stalowych na gorąco i będzie szczególnie zauważalne dla kształtowania z wsadów pełnych. Założono, że w kształtowaniu wyrobów drążonych, posiadających mniejszą pojemność cieplną i wychładzających się znacznie szybciej niż ich odpowiedniki pełne, przedstawione tu charakterystyczne wywijanie kołnierzy zostanie ograniczone przez chłodzenie na powietrzu przypowierzchniowych warstw metalu.

Zaburzenia współosiowości prowadzenia wsadów oraz ich wpływ na jakość uzyskiwanej powierzchni zewnętrznej wyrobów kształtowanych stały się jednym z podstawowych tematów badań doświadczalnych. Z uwagi na brak wprowadzania tego zaburzenia w analizach numerycznych MES opisywane w niniejszym rozdziale wyniki badań wytyczają pola tolerancji wyrobów pełnych i drążonych uzyskiwanych w metodzie przepychania obrotowego. Ponadto, dodatkowe zaburzenia procesu wprowadzane są poprzez ręczne podawanie wsadu do głowicy obrotowej popychacza, co także stanowi czynnik generujący odchylenia kształtu uzyskiwanego stopnia wyrobu.



Rys. 5.4. Wyroby pełne oraz drążone uzyskane w procesie przepychania obrotowego (materiał – ołów Pb1) [9]

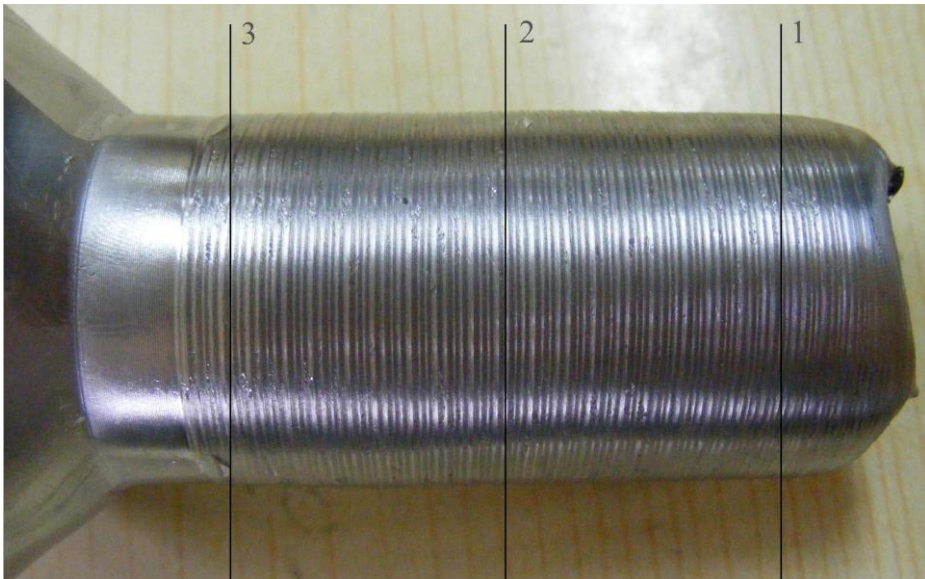
Biorąc pod uwagę problemy zaburzeń kształtu, przekładające się bezpośrednio na uzyskiwane pola tolerancji, dalsze prowadzone badania skierowano na ustalenie powiązań podstawowych parametrów procesu, kształtu uzyskiwanych wyrobów oraz koniecznych do stosowania naddatków technologicznych.

Jako najistotniejszą odchyłkę wymiarową, rzutuującą bezpośrednio na dalsze procesy obróbki uzyskanej części, uznano owalność przekroju poprzecznego wyrażaną jako:

$$\Delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2} \quad (5.1)$$

gdzie: D_{\max} oznaczono maksymalną średnicę wyrobu w danym przekroju, natomiast D_{\min} odpowiednią średnicę minimalną.

W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych zmieniano wartości posuwu p , przy zastosowaniu wsadów pełnych oraz drążonych. Pomiarów średnic ukształtowanej części wyrobu gotowego dokonywano w trzech przekrojach, co uwidoczniło na rys. 5.5, natomiast zestawienie uzyskanych wyników podano w tabeli 5.1. Widoczna na rys. 5.5, charakterystyczna falista powierzchnia wyrobu jest bezpośrednim efektem lekkiego bicia promieniowego popychacza w trakcie kształtowania z wyższymi wartościami posuwu (w tym przypadku posuw $p = 5\text{mm/obr.}$).



Rys. 5.5. Widok orientacyjnego umiejscowienia płaszczyzn pomiarowych badanych wyrobów pełnych oraz drążonych [9]

Tab. 5.1. Zestawienie odchyłek owalności wyrobów pełnych i drążonych przepychanych obrotowo z wartościami posuwu podanymi w tabeli [9]

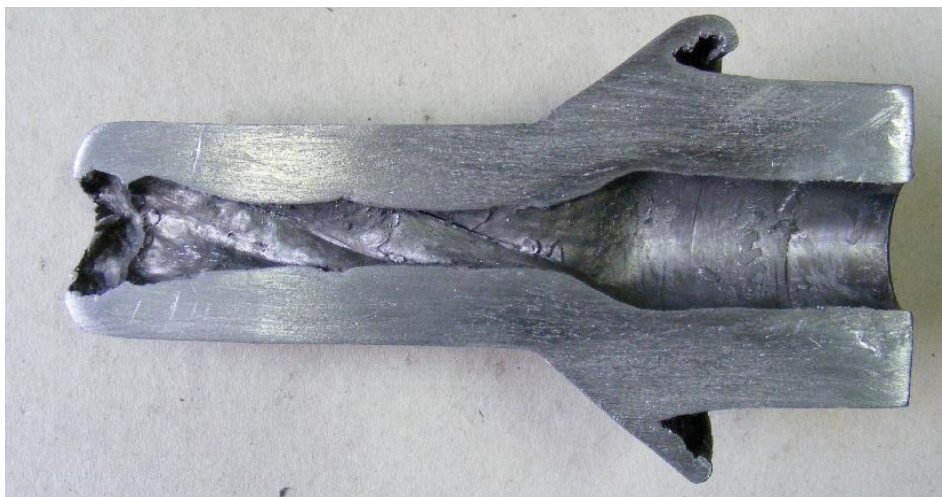
Owalność Δ [mm]	Wsady drążone				Wsady pełne	
Posuw p [mm/obr.]	7,5	5	2,5	1	2,5	1
Nr próbki Płaszczyzna pomiaru (rys. 5.3)	I	II	III	IV	V	VI
1	0,8	0,9	0,3	0,1	0,6	0,4
2	0,7	0,6	0,3	0,2	0,5	0,4
3	1,3	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2

Analiza danych zamieszczonych w tabeli 5.1 wskazuje na występowanie silnego związku pomiędzy wartościami stosowanego w procesie, posuwu, a mierzonymi dokładnościami wymiarowymi wyrobów pełnych i drążonych. Uzyskane w toku badań dane wskazują, że zmniejszanie wartości posuwu pozwala na ograniczenie pola tolerancji wymiarowej wyrobów gotowych. Jednakże, ze względu na bardzo złożony charakter płynięcia metalu w procesie przepychania obrotowego, oraz fakt wykorzystywania w badaniach wyłącznie jednego kompletu rolek narzędziowych z dwoma kątami pochylenia ścian bocznych (kąt kształtujący $\alpha = 30^\circ$ oraz $\alpha = 35^\circ$), dalsze, szczegółowe określenie wpływu poszczególnych parametrów procesu na uzyskiwaną dokładność i stabilność wymiarową wymaga przeprowadzenia prób doświadczalnych w szerszym zakresie stosowanych narzędzi.

Dalszymi pracami, którymi objęto wyroby drążone wykonane z ołowiu Pb1 było ich przecięcie w celu uzyskania możliwości analizy rozkładów grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych. Niestety w tym przypadku po wykonaniu operacji cięcia stwierdzono bardzo duże wahania rozkładów grubości ścianek, co eliminowało dalsze zastosowania uzyskiwanych w ten sposób wyrobów. Przykładowy przekrój wyrobu drążonego wykonanego z ołowiu Pb1 po procesie przepychania obrotowego, przy posuwie $p = 5$ mm/obr., przedstawiono na rys. 5.6.

Charakterystyczne spiralne płynięcie metalu wywołujące falowanie grubości ścianek oraz powstawanie namiastki wewnętrznego zarysu gwintowego wskazywało na niedostateczny udział płynięcia metalu w kierunku poprzecznym do ruchu popychacza. Aby ograniczyć to niekorzystne zjawisko wykonano ponowne próby kształtowania technologii z zastosowaniem zmniejszonych wartości posuwu na obrót $p = 2,5$ mm/obr. Wyniki przeprowadzonego eksperymentu nie przyniosły zasadniczej poprawy pozostawiając wewnętrzną powierzchnię wyrobu kształtowanego w stanie niemożliwym do zaakceptowania bez zdjęcia nadatków wymiarowych rzędu ok. 3 mm. Tak szerokie pole tolerancji oraz naruszenie spójności materiału w procesie dalszej obróbki mechanicznej w tak

szerokim zakresie czyniłoby technologię tę całkowicie nieopłacalną i nieefektywną. Biorąc jednak pod uwagę rezultaty podobnych badań nad kształtowaniem wyrobów drążonych w procesach WPK, gdzie stwierdzono znaczne różnice w zachowaniu się w trakcie badań wsadów wykonanych z ołowiu i stali, z dalszymi wnioskami w tym zakresie wstrzymano się do czasu przeprowadzenia prób z zastosowaniem wsadów stalowych kształtowanych na gorąco.



Rys. 5.6. Przekrój wzdłużny wyrobu drążonego wykonanego z ołowiu Pb1 po procesie przepychania obrotowego ($p = 5 \text{ mm/obr.}$) [9]

5.3. Kształtowania z wsadów pełnych i drążonych wykonanych ze stali C45

Dla wybranych przypadków kształtowania wsadów pełnych i drążonych przeprowadzono próby przepychania obrotowego z wsadów stalowych kształtowanych na gorąco. Zastosowano w nich wsady wykonane ze stali w gatunku C45, o wymiarach analogicznych jak w symulacjach numerycznych, nagrzewane w piecu komorowym do temperatury 1150°C . Rolki robocze oraz głowicę obrotową popychacza początkowo pozostawiano w temperaturze otoczenia, co prowadziło do szybkiego wychładzania wyrobu kształtowanego pomiędzy rolkami. Efektem tego obniżania temperatury był szybki wzrost granicy plastyczności prowadzący do występowania zjawiska poślizgu. Przykładowy wyrób zniszczony na skutek poślizgu przedstawiono na rys. 5.7. Po przeprowadzeniu trzech, czterech cykli przepychania obrotowego, gdy narzędzia uzyskały temperaturę roboczą około 150°C , dalsze kształtowanie przebiegało zgod-

nie z założeniami. W kolejnych badaniach zdecydowano się na wstępne nagrzewanie narzędzi roboczych do temperatury około 200°C.



Rys. 5.7. Przykładowy wyrób zniszczony w wyniku wystąpienia zjawiska poślizgu ($p = 5 \text{ mm/obr.}$)

Na rys. 5.8 przedstawiono proces kształtowania jednego z wsadów pełnych oraz wybrane wyroby gotowe, pełne i drążone. Podobnie, jak we wcześniejszym kształtowaniu z wsadów łożnianych (rys. 5.2) widoczne jest intensywne, powierzchniowe płynięcie metalu, skutkujące w efekcie powstaniem leja czołowego w zredukowanym stopniu wyrobu pełnego. W przypadku tym, podobnie jak dla zastosowania wsadów łożnianych także powstaje charakterystyczne wywiniecie materiału ograniczające czas prowadzenia procesu do momentu pojawienia się tego zjawiska.

Istotną różnicą, przy kształtowaniu wyrobów z wsadów drążonych, jest praktyczny brak pojawiania się tendencji do wywijania kołnierza. Zjawisko to jest zastępowane poprzez zmianę długości spęczanej części wyrobu przed kołnierzem, czyli strefą redukcji średnicy.

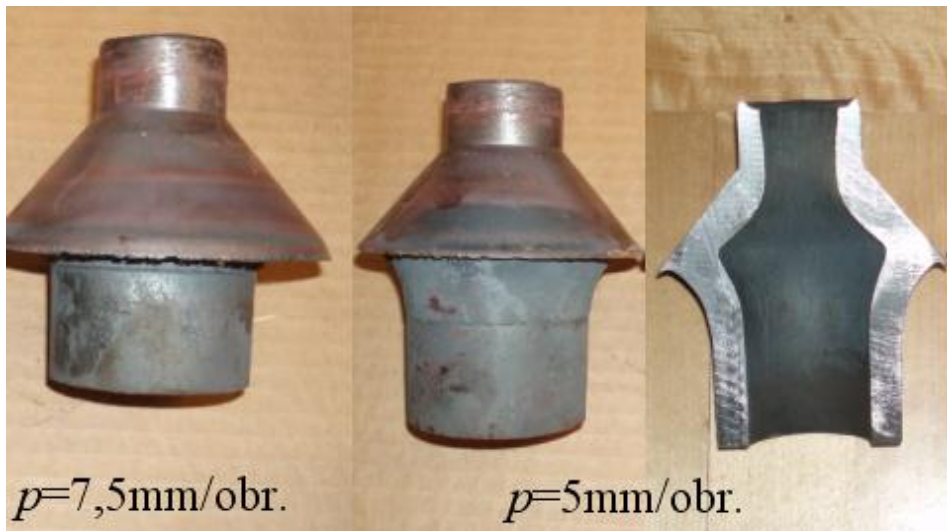
Na podstawie danych numerycznych przeprowadzono badania doświadczalne procesu kształtowania z wsadów drążonych przy posuwie $p = 5 \text{ mm}$ oraz $7,5 \text{ mm}$. Wyniki tych prób pokazano na rys. 5.9, gdzie zamieszczono zdjęcia uzyskanych wyrobów drążonych.

Wykonane na tym etapie badań pomiary otrzymanych wyrobów drążonych wykazują niewielkie odstępstwa w stosunku do danych uzyskanych na drodze numerycznej, co świadczy o poprawności założeń w przyjętym do obliczeń modelu procesu. Próby dalszego ograniczania wartości posuwu na obrót p prowadziły do intensywnego płynięcia metalu w kierunku wstecznym do ruchu popychacza w warstwach przypowierzchniowych wyrobu kształtowanego. Efektem tego zjawiska było pojawianie się charakterystycznego wywinęcia metalu do

tyłu na zewnętrznej średnicy kołnierza. Prowadziło to do ograniczenia szerokości tworzonego lokalnie zgrubienia przez co uzyskiwanie w ten sposób wyrobów stopniowanych (zwłaszcza o przekroju pełnym) stawało się trudniejsze do uzyskania. Przykład wyrobu pełnego, kształtowanego przy posuwie na obrót $p = 2,5$ mm/obr. przedstawiono na rys. 5.10.



Rys. 5.8. Proces przepychania obrotowego wyrobu pełnego ($p = 5$ mm/obr.) oraz uzyskane wyroby gotowe (stal C45) [9]



Rys. 5.9. Wyroby drążone uzyskane w procesie przepychania obrotowego przy wartości posuwu p podanej na rysunku wraz z rozkładem grubości ścianek w przekroju wzdłużnym [9]

Prace weryfikacyjne wskazały dodatkowe ograniczenie procesu w postaci wychładzania wsadu przed strefą kształtowania. Zjawisko to występowało szczególnie intensywnie dla przypadków przepychania z wsadów drążonych, jednakże i dla wsadów pełnych stanowiło ograniczenie zmuszające do przerywania procesu kształtowania z powodu ryzyka zakleszczenia nadmiernie

spęczanego wsadu w głowicy obrotowej popychacza – rys. 5.11. Prowadzone na dalszym etapie badania wskazują konieczność przewidywania, w projektowaniu procesów przepychania obrotowego, odpowiedniej długości części chwytowych wsadu dla zapewnienia jego właściwego prowadzenie w trakcie procesu. Dodanie do planowanej długości wyrobu przed strefą odkształcaną części niepodlegającej obróbce plastycznej sprzyja oczywiście łatwemu usuwaniu wyrobu z głowicy roboczej popychacza po przeprowadzonym procesie kształtowania. Z tego też względu za bardzo istotne uznano także określenie wpływu parametrów procesu na długość strefy spęczanej przed przestrzenią roboczą pomiędzy rolkami narzędziowymi. W przypadkach skrajnych, tak jak to przedstawiono na rys. 5.9, konieczne było przerwanie procesu przepychania.

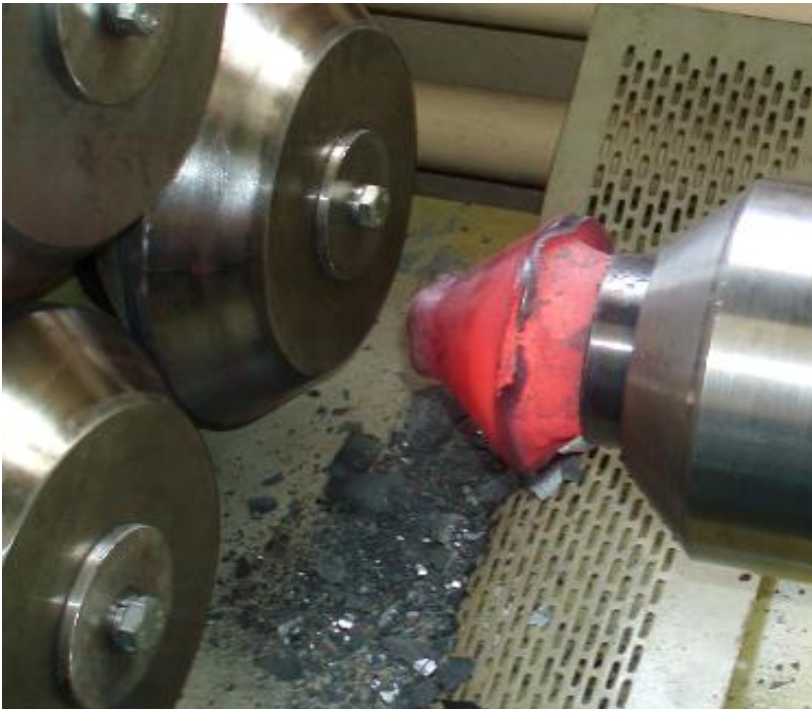


Rys. 5.10. Wyroby pełny z charakterystycznym, wstecznym wywinięciem krawędzi kołnierza, spowodowanym zbyt małą wartością posuwu na obrót p ($p = 2,5 \text{ mm/obr.}$) [9]

Usunięcie spęczanego wsadu z głowicy obrotowej popychacza nie stanowiło w tym przypadku problemu, ponieważ na wyrobie tym zakleszczył się pierścień prowadzący mocowany wewnątrz gniazda głowicy na połączenie wciskowe. Z uwagi na zabudowane w opisywanej głowicy łożyska, pozostawianie w gnieździe mocującym gorących wsadów jest niewskazane dla dalszej niezawodnej eksploatacji wrażliwego na temperaturę łożyskowania.

Widoczna na rys. 5.11 znaczna ilość kruszącej się na powierzchni odkształcanego wsadu zgorzeliны spowodowana była stosowaniem w procesie nagrzewania pieca komorowego. Przy stosowanych w badaniach gabarytach wsadów, dla osiągnięcia równomiernego nagrzania próbek do temperatury 1150°C , konieczne było przetrzymywanie ich w komorze pieca przez okres około 30 minut. Przy równoległym nagrzewaniu kilku wsadów (zwłaszcza o przekroju pełnym) czas nagrzewania wzrastał nawet do około 60 minut.

W celu określenie przydatności opracowanej technologii do kształtowania wybranych elementów typu stopniowane osie i wały zdecydowano się na wybranie wytwarzanej metodą kucia odkuwki spełniającej podane kryterium. Opracowanie technologii wytwarzania takiego wyrobu daje odpowiedź na temat rzeczywistego spektrum zastosowań nowej metody, co podano w kolejnym podrozdziale

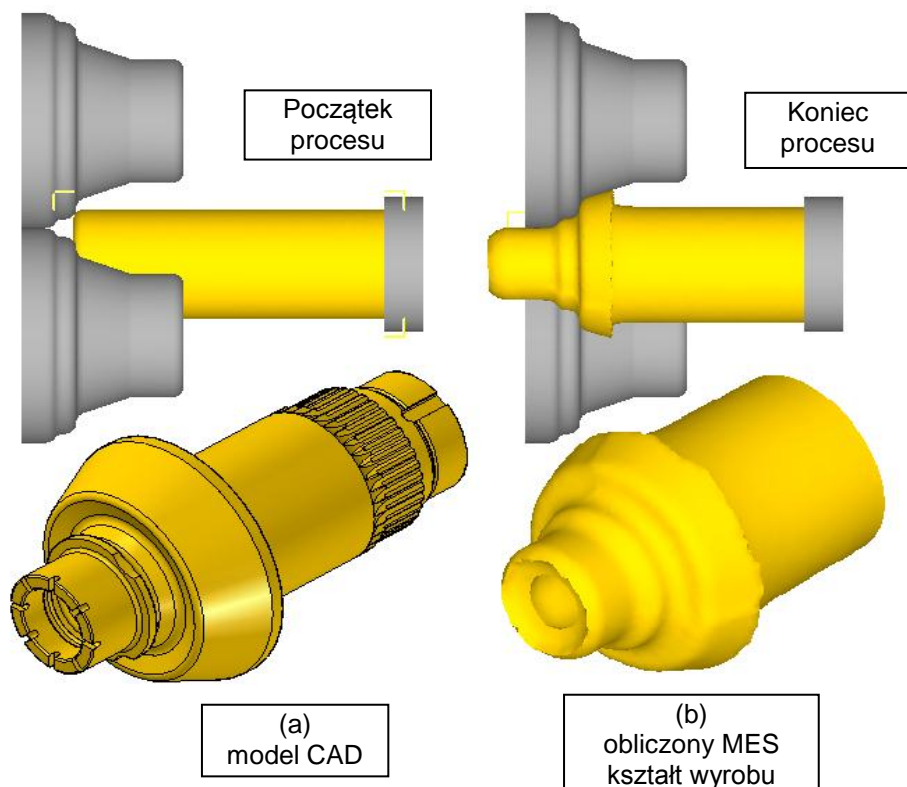


Rys. 5.11. Zjawisko nadmiernego spiętrzania wsadu przed strefą kształtującą rolek narzędziowych ($p = 1 \text{ mm/obr.}$) [9]

5.4. Wytwarzanie wałka stopniowanego – analiza procesu

Na podstawie analizy parametrów procesu przepychania obrotowego wyrobów pełnych i drążonych, zdecydowano się na przeprowadzenie prób kształtowania wybranej odkuwki drążonej – rys. 5.12. Wyrób ten posiada kołnierz oraz proporcje wymiarowe odpowiadające założeniom prowadzenia procesu kształtowania metodą przepychania obrotowego. Próba uzyskania wyrobu drążonego wg dokumentacji technicznej miała na celu praktyczne sprawdzenie możliwości projektowania technologii wykonawstwa tego typu wyrobów. Wsad do procesu w postaci rur grubościennych, posiadał średnicę

zewnętrzną $D_z = 68$ mm i wewnętrzną $D_w = 40$ mm. Średnica zewnętrzna wsadów w trakcie symulacji procesu przepychania obrotowego była redukowana do wartości $D_R = 42$ mm (za rolkami) oraz powiększana do $D_S = 98,5$ mm (przed rolkami), zgodnie z zarysem roboczym rolek profilowych odzwierciedlających wymiary wyrobu kształtowanego – rys. 5.13.



Rys. 5.12. Model przestrzenny CAD wyrobu gotowego (a) oraz uzyskany w wyniku obliczeń kształt części (b) po procesie przepychania obrotowego [9]

Ponieważ wcześniejsze obliczenia numeryczne wykazały ścisłą zależność pomiędzy stosowanymi w procesie przepychania obrotowego wartościami posuwu na obrót p , w badaniach numerycznych zdecydowano się na aplikację zmiennych wartości tego parametru. Oparto się w tym wypadku na zależnościach:

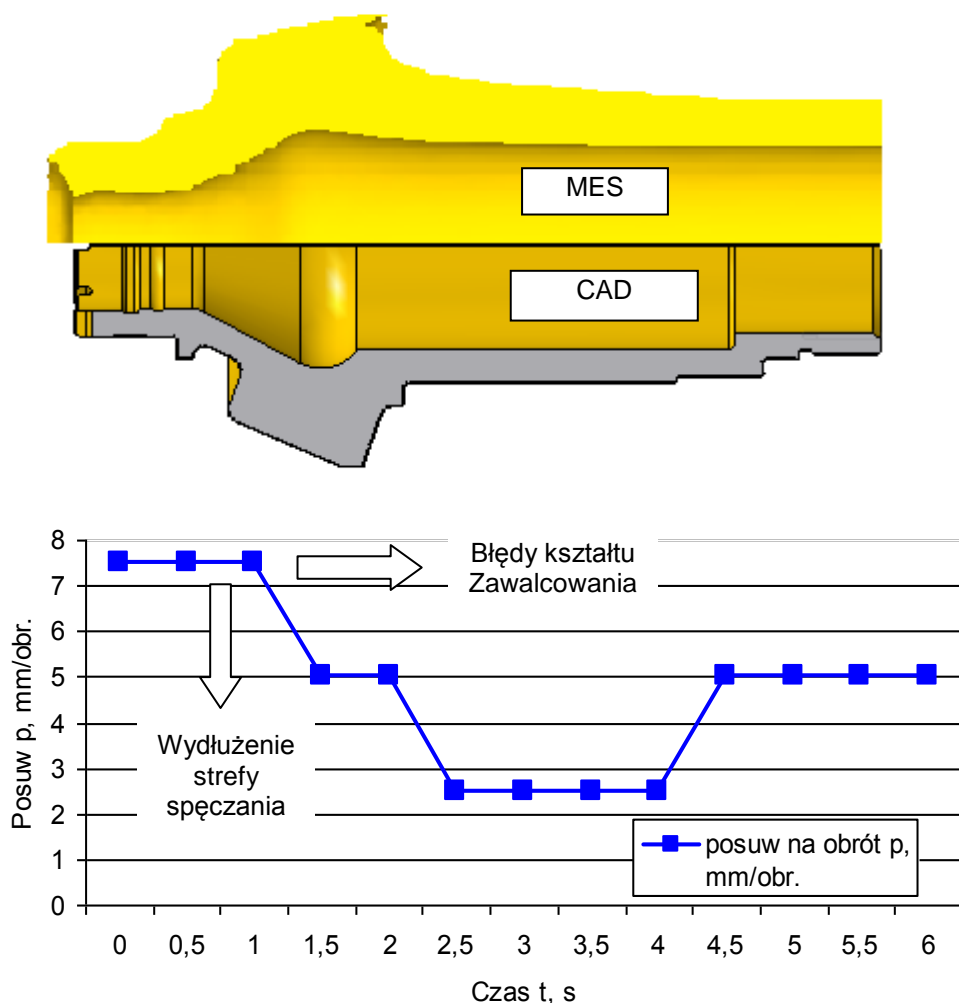
- większa wartość posuwu na obrót – silniejsze spęczanie wsadu przed rolkami narzędziowymi;
- mniejsza wartość posuwu na obrót – wyższa dokładność wymiarowa oraz brak charakterystycznego wywijania kołnierza.

Biorąc pod uwagę powyższe zależności, oraz bazując na wynikach wcześniejszych analiz, w obliczeniach procesu kształtowania wybranego wyrobu zdecydowano się na zastosowanie różnych wartości posuwu na obrót p w zakresie $2 \div 10$ mm/obr. W pierwszych próbach numerycznych, prowadzonych przy wyższych wartościach posuwu na obrót ($p = 5 \div 10$ mm/obr.) stwierdzono znaczne zwiększanie się intensywności spęczania wsadu kosztem ograniczenia przyrostu długości części kształtowanej. Efektem tego były problemy z zachowaniem kształtu cylindrycznego wyrobu przed formowanym kołnierzem oraz znaczne zaburzenia kołowości w przekrojach poprzecznych spowodowane zakłóceniem osiowego płynięcia metalu poprzez zbyt szybkie wprowadzanie go do przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami.

W analizowanym przypadku dopiero złożenie zmieniających się (malejących) w trakcie procesu wartości posuwu pozwoliło na uzyskanie odpowiedniego kształtu wyrobu drażonego. Na rys. 5.14 przedstawiono przekroje wzdłużne modelu gotowej części oraz wyrobu otrzymanego w wyniku symulacji ze zmieniającymi się wartościami posuwu.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń numerycznych należy zauważyć, iż zastosowane uproszczenia w konstrukcji rolek narzędziowych znalazły swoje odzwierciedlenie w wielkości naddatków wymiarowych powstałego wyrobu. Szczególnie zauważalne jest to w partii czołowej powstałej po redukcji średnicy wyrobu pomiędzy rolkami, oraz w obszarze spęczania przed formowanym kołnierzem. Uzyskiwane w tym przypadku naddatki wymiarowe należy szacować na około $4 \div 5$ mm.

Odnosząc się do przedstawionego na rys. 5.14 zakresu zmian wartości posuwu na obrót p należy zauważyć, iż proces rozpoczynano z najwyższą wartością $p = 7,5$ mm/obr. zmniejszając ją dwuetapowo do $p = 2,5$ mm/obr., aby ponownie lekko zwiększyć ten parametr do wartości $p = 5,0$ mm/obr. Początek realizowanego procesu przy wyższych prędkościach kształtowania zapewniał właściwe zapoczątkowanie spęczania wsadu, co gwarantowało uzyskanie odpowiedniej średnicy oraz grubości ścianki w miejscu formowania kołnierza wyrobu. Ograniczenie tej prędkości w dalszym etapie prowadziło do zmniejszania błędów kształtu, co uwidoczniło w opisie rys. 5.14. Wyjaśnieniem podniesienia wartości posuwu w ostatnim etapie kształtowania wyrobu było ograniczenie pojawiającej się tendencji do charakterystycznego wywijania kołnierza wyrobu oraz skrócenia czasu jego trwania.



Rys. 5.14. Uzyskany w wyniku symulacji MES przekrój wzdłużny wyrobu zestawiony z analogicznym przekrojem modelu CAD oraz zmiany wartości posuwu na obrót p w trakcie procesu kształtowania [9]

5.5. Badania doświadczalne procesu kształtowania wałka stopniowanego

Pomyślne rezultaty badań numerycznych procesu przepychania obrotowego wałka stopniowanego (rys. 5.12) wykorzystano do wykonania badań doświadczalnych tego procesu w agregacie PO-1. W tym celu, na podstawie modeli

numerycznych narzędzi roboczych wykonano niezbędne oprzyrządowanie (rys. 5.15) oraz przygotowano wsady stalowe w gatunku C45 o średnicach zgodnych z przyjętymi w badaniach numerycznych. Podobnie jak we wcześniejszych badaniach doświadczalnych z poprzednim kompletem narzędzi zdecydowano się na nagrzewanie rolek do temperatury około 200°C, co miało szczególne znaczenie w przypadku stosowanych w badaniach, wsadów drążonych.



Rys. 5.15. Rolki robocze do procesu przepychania obrotowego wykonane wg rys. 5.13.

Wsady stosowane w badaniach nagrzewano w piecu elektrycznym, komorowym do temperatury 1150°C i następnie kształtowano przy wybranych parametrach posuwu na obrót w zakresie posuwu na obrót $p = 2,5 \div 7,5$ mm/obr.

W pierwotnej koncepcji agregatu PO-1 nie przewidziano możliwości zmian wartości posuwu na obrót w trakcie realizacji procesu. Możliwości takie gwarantowałyby zastosowanie elektrozaworu sterującego w czasie wydatkiem oleju hydraulicznego podawanego do siłownika popychacza, lub wprowadzenie fallownika wektorowego o szybszym czasie reakcji na potrzeby zmiany prędkości obrotowej. Stąd też, opisywane w dalszej części rozdziału, próby kształtowania prowadzono przy wybranych, stałych wartościach tego parametru. Uzyskane w wyniku prowadzonego procesu przepychania obrotowego wyroby drążone posiadają kształt zewnętrzny zgodny z zakładanym na etapie projektowania narzędzi oraz ustalania parametrów procesu.

Na rys. 5.16 przedstawiono proces przepychania obrotowego drążonego wałka stopniowanego z zastosowaniem zaprojektowanych narzędzi rolkowych oraz przykład wyrobu pełnego. Prezentowany proces przeprowadzono przy zastosowaniu stałej wartości posuwu $p = 5$ mm/obr., co, w prezentowanym przypadku kształtowania z wsadu pełnego, nie gwarantowało uzyskania pełnej, zakładanej szerokości kołnierza wałka. W przypadku tym jednak, poza wspomnianym wymiarem kołnierza, uzyskano najbliższy założeniom kształt

pozostałych partii wyrobu. Zarówno część tylna, przewidziana do późniejszego nacinania wielowypustu, jak i strefa przednia, przewidziana do zabudowy łożyska, cechowały się dobrą jakością powierzchni oraz nadatkami materiału nie przekraczającymi 0,2 mm. Zawężenie zakresu tolerancji wymiarowych uzyskanych wyrobów poniżej w/w granicy pozwala na zredukowanie dalszej, planowanej obróbki mechanicznej do operacji szlifowania, co stanowi jeden z głównych celów w poszukiwaniu oszczędności produkcyjnych.



Rys. 5.16. *Proces przepychania obrotowego drążonego wałka stopniowanego z zastosowaniem zaprojektowanych narzędzi rolkowych oraz uzyskany wyrób pełny ($p = 5 \text{ mm/obr.}$) [9]*

Nadmierne spęczenie obszaru bezpośrednio za formowanym kołnierzem spowodowane jest oczywiście zbyt dużymi wartościami posuwu na obrót, co przyczyniło się do powstania znacznego nadatku wymiarowego w tym obszarze. Brak jednak znacznych błędów kształtu (odchyłki kołowości mieszczą się w badanych przypadkach w zakresie do 0,4 mm) wskazuje na prawidłowe, pozbawione zaburzeń, płynięcie metalu. Podobne wyniki badań, pojawiające się dla szerszego zakresu stosowanych wartości posuwu na obrót p , świadczą o możliwościach zmiany tego parametru, zgodnie z rezultatami przeprowadzonych symulacji numerycznych.

Bezpośredni wpływ różnych wartości posuwu na obrót przedstawia rys. 5.17, na którym uwidoczniło oddziaływanie tego parametru na uzyskiwany kształt wyrobu finalnego. Zbyt mała prędkość kształtowania, przekładająca się na wydłużony czas trwania procesu skutkuje pojawianiem się niepożądanego wywijania kołnierza przed uformowaniem jego zakładanej szerokości (rys. 5.17.a).

Przeciwnieństwem tego problemu jest zastosowanie nadmiernej prędkości posuwu prowadzące do powstawania niekontrolowanego spęcznienia wyrobu przed strefą pożądanego kształtowania kołnierza (rys. 5.17.b). Przedstawione przypadki wskazują na konieczność ustalenia właściwego stanu równowagi pomiędzy poosiowym i promieniowym płynięciem metalu w procesie przepychania obrotowego w kolejnych stadiach procesu.



Rys. 5.17. Wpływ różnych wartości posuwu na obrót p na uzyskiwany kształt wyrobu finalnego: (a) $p = 2,5 \text{ mm/obr.}$; (b) $p = 7,5 \text{ mm/obr.}$ [9]

Brak odpowiedniego doboru wzajemnej korelacji prędkości obrotowej rolek roboczych z prędkością liniową popychacza w trakcie trwania procesu przepychania obrotowego prowadzi, w tym wypadku, do zawężenia zakresu zastosowań tej metody do prostych wyrobów osiowosymetrycznych ze stopniami posiadającymi odpowiednie pochylenia ścian bocznych. W przypadku kształtowania wyrobów o bardziej złożonym zarysie, otrzymane wyniki jednoznacznie potwierdzają konieczność stosowania w procesie zmiennych wartości posuwu na obrót.

Szczególnie w przypadku części o kształcie złożonym, po zakończeniu procesu stwierdzano problemy z usuwaniem wyrobu gotowego z przestrzeni roboczej. O ile w prezentowanych wynikach badań doświadczalnych (z rolkami o kącie pochylenia $\alpha = 30^\circ$ oraz $\alpha = 35^\circ$) wyjęcie uformowanego elementu pełnego lub drążonego nie przysparzało większych trudności, to w przedstawionym tu procesie operacja ta wymagała rozsunięcia rolek roboczych poprzez ręczną zmianę ich rozstawu. Skutkiem tak silnego obciskania wyrobu kształtowanego przez rolki narzędziowe było odcisnięcie się zarysu rolek na materiale (rys. 5.18.), co należałoby wyeliminować w przyszłości poprzez wprowadzenie sterowania rozstawem tych narzędzi w agregacie PO-2, co opisano w następnym rozdziale.



Rys. 5.18. *Zaznaczenie zarysu rolek narzędziowych na przepychanym obrotowo wyrobie pełnym ($p=7,5\text{mm/obr.}$) [9]*

6. Poszerzony zakres zastosowania technologii przepychania obrotowego – agregat PO-2

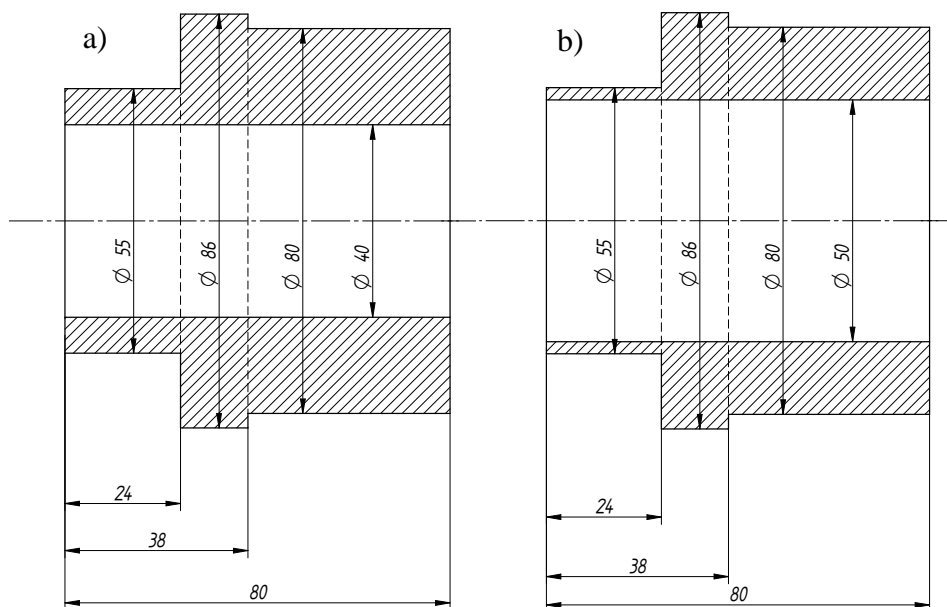
Wprowadzenie (w rozwojowej wersji agregatu PO-2) dodatkowego sterowania zmianą rozstawu osi w trakcie realizowanego procesu kształtowania oraz dodanie zderzaka tylnego umieszczonego na siłowniku hydraulicznym przyczyniło się do zwiększenia potencjalnych zastosowań technologii przepychania obrotowego. Kolejnymi modyfikacjami, nasuwającymi się w trakcie prowadzonych obliczeń numerycznych oraz prób doświadczalnych było dodanie trzpieni dziurujących oraz kalibrujących. Innym rozwiązaniem może być wprowadzenie do procesu trzpieni kształtowych (w tym o zarysie sześciokątnym) oraz specjalnych konstrukcji narzędzi rolkowych do kształtowania uzębień. Poniżej przedstawione przykłady wskazują dalsze kierunki rozwoju zaproponowanej technologii przepychania obrotowego

6.1. Kształtowanie wałków stopniowanych

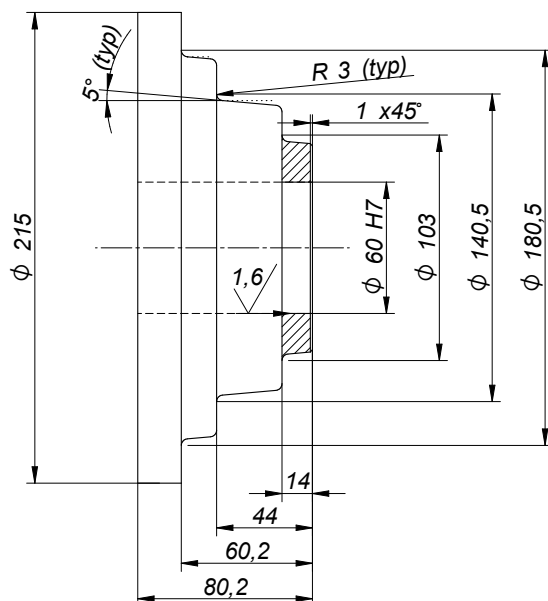
Analiza teoretyczna polegała na wykonaniu obliczeń numerycznych procesu przepychania obrotowego wałków stopniowanych (rys. 6.1) oraz porównaniu uzyskanych kształtów i odchyłek. Wałki powstały z dwóch wsadów o tych samych średnicach zewnętrznych, lecz innych średnicach wewnętrznych. Grubości ścianek poszczególnych wsadów wynosiły odpowiednio 30 mm oraz 40 mm. Wyniki przeprowadzonych badań zostały porównane pod względem zmian grubości ścianek, okrągłości i przemieszczeń materiału w poszczególnych częściach wytworzonych wałków.

W wałku o grubości ścianek 40 mm dodatkowo zostały przeanalizowane naprężenia oraz przemieszczenia materiału występujące podczas procesu. Do wykonania drążonego wałka stopniowanego użyto narzędzi rolkowych przedstawionych na rys. 6.2. Dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu narzędzi można uzyskiwać różnorodne wałki.

Wsady zostały zaprojektowane w taki sposób, aby uzyskać wałki przedstawione na rys. 6.1. Wymiary wsadów różniły się tylko średnicami wewnętrznymi, co wpłynęło na grubość ścianek. Średnice wewnętrzne wynosiły odpowiednio $\varnothing 40$ mm oraz $\varnothing 50$ mm, średnice zewnętrzne wyniosły $\varnothing 80$ mm, a długość wsadów 80 mm. Model materiału użyty do wykonania wsadów to stal węglowa C25.

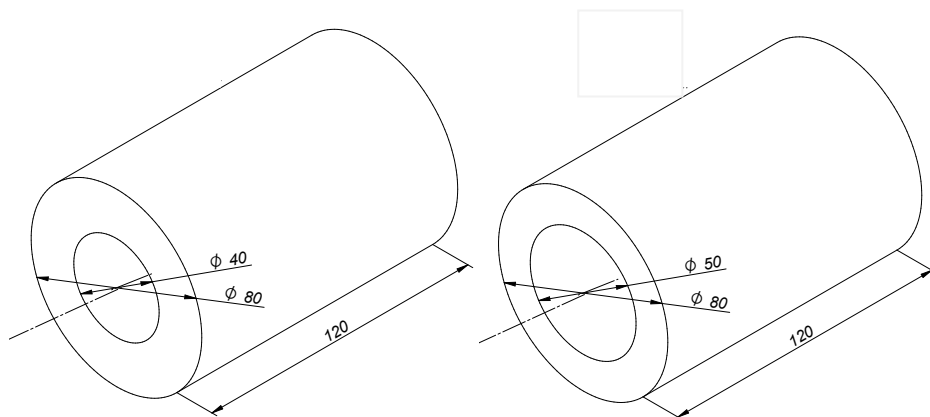


Rys. 6.1. Założone wymiary końcowe wałków przy projektowaniu procesu dla średnicy wewnętrznej: a) $\text{Ø}40$ mm, b) $\text{Ø}50$ mm



Rys. 6.2. Rysunek rolki kształtującej

Modelem popychacza był nieodkształcalny walec, poruszający się ruchem prostoliniowym w kierunku zgodnym z osią wsadu, popychacz zaczynał obracać się podczas zetknięcia się wsadu z narzędziami roboczymi. Ruch ten był przeciwny do ruchu obracających się rolek.



Rys. 6.3. Szkice zaprojektowanych wsadów

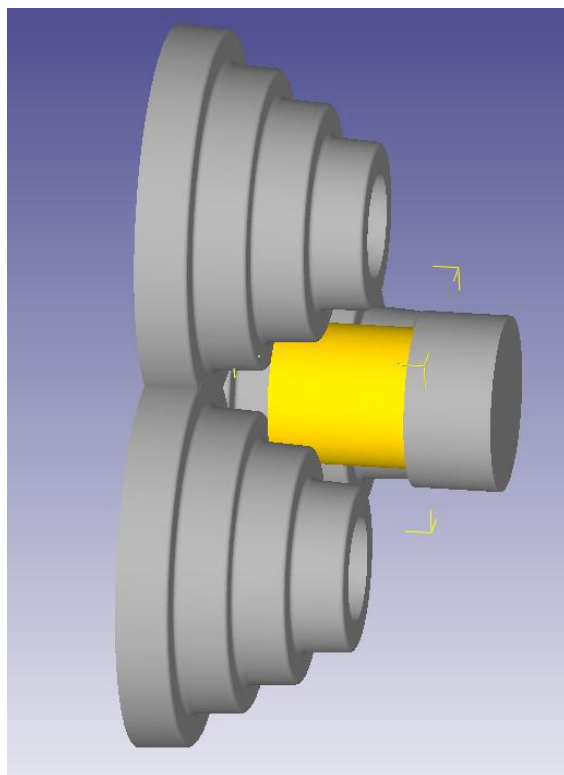
Po zaprojektowaniu wszystkich elementów w programie Solid Edge złożono je w model numeryczny procesu, umożliwiając przeprowadzenie symulacji numerycznej przy użyciu oprogramowania Deform3D. Elementy zostały ustawione tak, aby wsad, dzięki popychaczowi, został wprowadzany w strefę kształtowania zawartą pomiędzy rolkami roboczymi, co zostało przedstawione na rys. 6.4.

Proces zachodził w warunkach uwzględniających przepływ ciepła pomiędzy poszczególnymi elementami modelu oraz otoczeniem. Początkowa temperatura wsadu wynosiła 1150 °C zaś narzędzi 150 °C. Ustalona prędkość narzędzi wynosiła 2 rad/sec, taką samą prędkość obrotową uzyskiwał popychacz po zetknięciu się wsadu z narzędziami roboczymi, zaś prędkość posuwu popychacza wynosiła 1mm/sec. Narzędzia robocze popychacza zostały zaprojektowane jako elementy nieulegające odkształceniom (doskonale sztywne). Podczas rysowania wsadów ich krawędzie zewnętrzne nie zostały sfazowane dla uzyskania dokładniejszych wyników obliczeniowych.

Obliczenie całego procesu zajęło około 12 dni. Na rys. 6.5 zostały przedstawione kolejne etapy kształtowania wałka stopniowanego wraz z podanymi rozkładami naprężeń. Usunięcie dwóch, spośród trzech, rolek roboczych dało lepszy widok na powierzchnię uzyskiwanego wyrobu.

Obserwacja przyrostu naprężeń w trakcie procesu wskazuje, że do około 40% jego zaawansowania maksymalne wartości naprężeń, sięgające poziomu około 300 MPa, widoczne są w miejscach styku rolek narzędziowych z materiałem kształtowanym. Na tym etapie dochodzi do silnego wydłużania

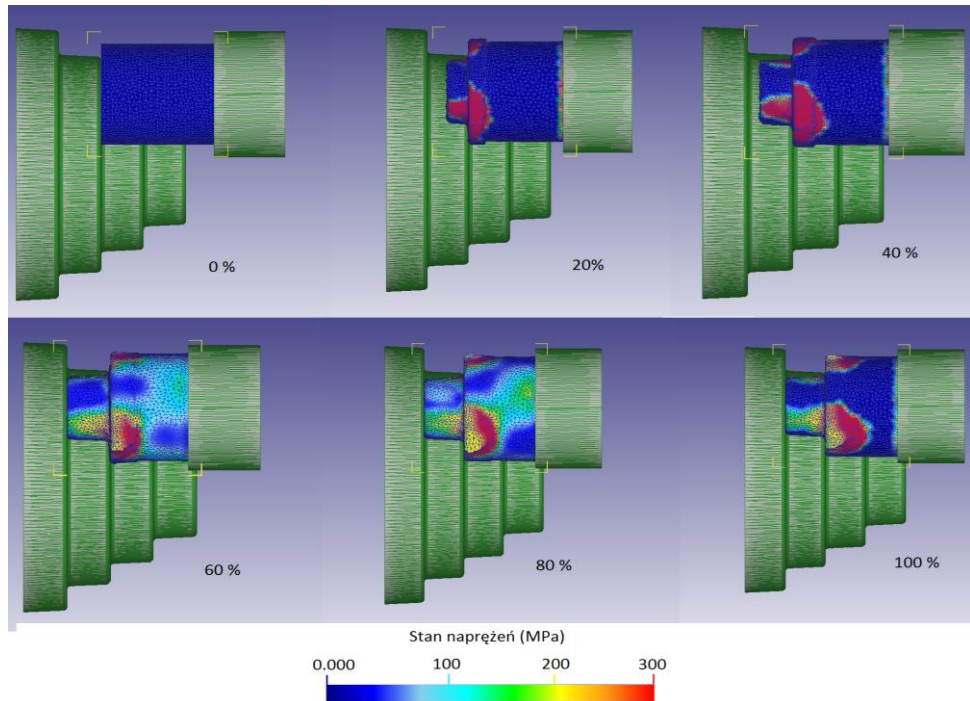
początku wsadu, który wypełnia pierwszy stopień w przestrzeni pomiędzy rolkami. Dopiero po wypełnieniu tego stopnia (60% zaawansowania procesu) materiał zaczyna uplastyczyć się na wskroś i dopiero wtedy zaczyna płynąć w całej objętości. Ograniczenie posuwu na obrót w końcowej fazie procesu ponownie prowadzi do koncentracji naprężeń w strefie kontaktu pomiędzy wyrobem kształtowanym a narzędziami. Rys. 6.6 przedstawia stan naprężeń w przekrojach powstającego wałka. Przedstawione na rys. 6.5 rozkłady naprężeń na powierzchni zewnętrznej uzyskiwanego wałka stopniowanego znajdują swoje odzwierciedlenie także w przekrojach wzdłużnych tego wyrobu zamieszczonych na rys. 6.6.



Rys. 6.4. Model numeryczny procesu przepychania obrotowego

Najbardziej równomierne rozkłady naprężeń uzyskiwane są w zakresie od 60% do 80% zaawansowania procesu. Materiał uplastyczniony na wskroś płynie wtedy także w kierunku do osi wyrobu przyczyniając się do pogrubienia jego ścianek. Zjawisko to jest szczególnie intensywne w strefie redukcji średnic. Intensywność odkształceń w kolejnych etapach kształtowania pokazuje rys. 6.7. Szczególnie dobrze widoczny jest tutaj promieniowy kierunek płynięcia mate-

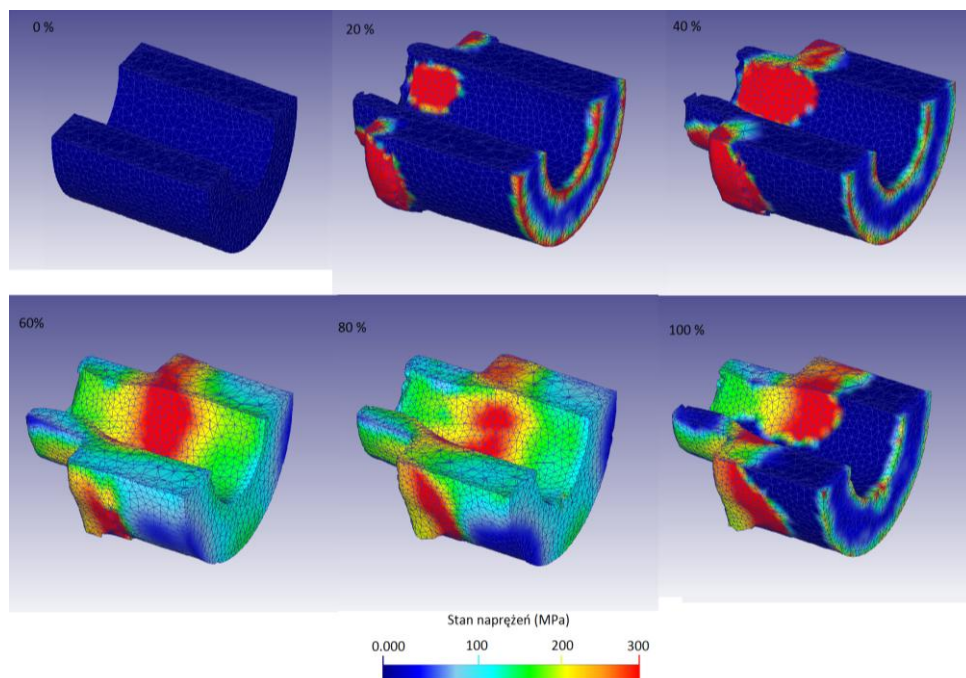
riału w dalszych fazach kształtowania. Powstał stopień wálka można w pewnym zakresie modelować poprzez zmianę parametrów technologicznych procesu.



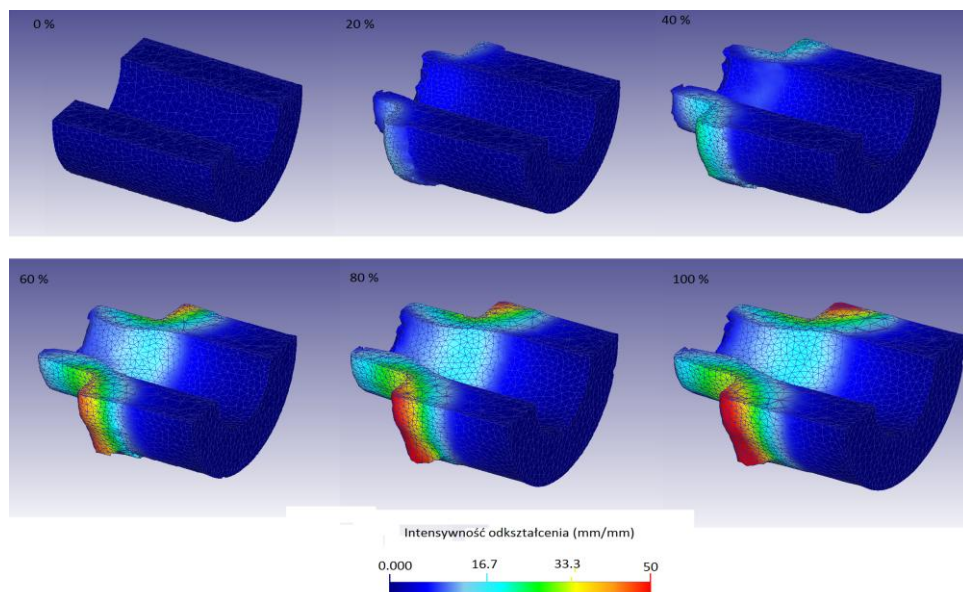
Rys. 6.5. Kolejne etapy kształtowania wsadu o średnicy wewnętrznej $\varnothing 40$ mm wraz z rozkładem naprężeń [17]

Zwiększenie zgrubienia w strefie przejścia może być pożądane i służyć wzmocnieniu wyrobu w miejscu znaczącego ograniczenia jego wytrzymałości. Przykład takiego ukształtowania strefy redukcji średnic podano na rys 6.8. Uzywanie intensywnego zwiększenia grubości ścianek w tej strefie możliwe jest poprzez chwilowe zwiększenie wartości posuwu na obrót w po uformowaniu pełnej długości stopnia.

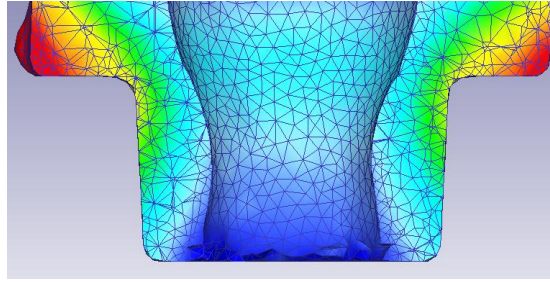
W podanym przypadku czynność tę należy podjąć przy zaawansowaniu procesu sięgającym 60%. Wcześniejsze zwiększenie prędkości posuwu na obrót prowadzi do wystąpienia zjawiska poślizgu oraz pojawienia się trójkątowania wyrobu prowadzącego do jego zniszczenia. Intensywność odkształcenia oraz kształt przekrojów porzecznych uzyskiwanych wyrobów stopniowanych przedstawiają rys. 6.9 oraz rys. 6.10. Oba rysunki pokazują wyrobu powstałe z wsadów o innych średnicach wewnętrznych. Na rys. 6.9 przedstawiony został wyrób z wsadu o średnicy wewnętrznej $\varnothing 40$ mm, zaś na rys. 6.10 widnieje wyrób z wsadu o średnicy wewnętrznej $\varnothing 50$ mm.



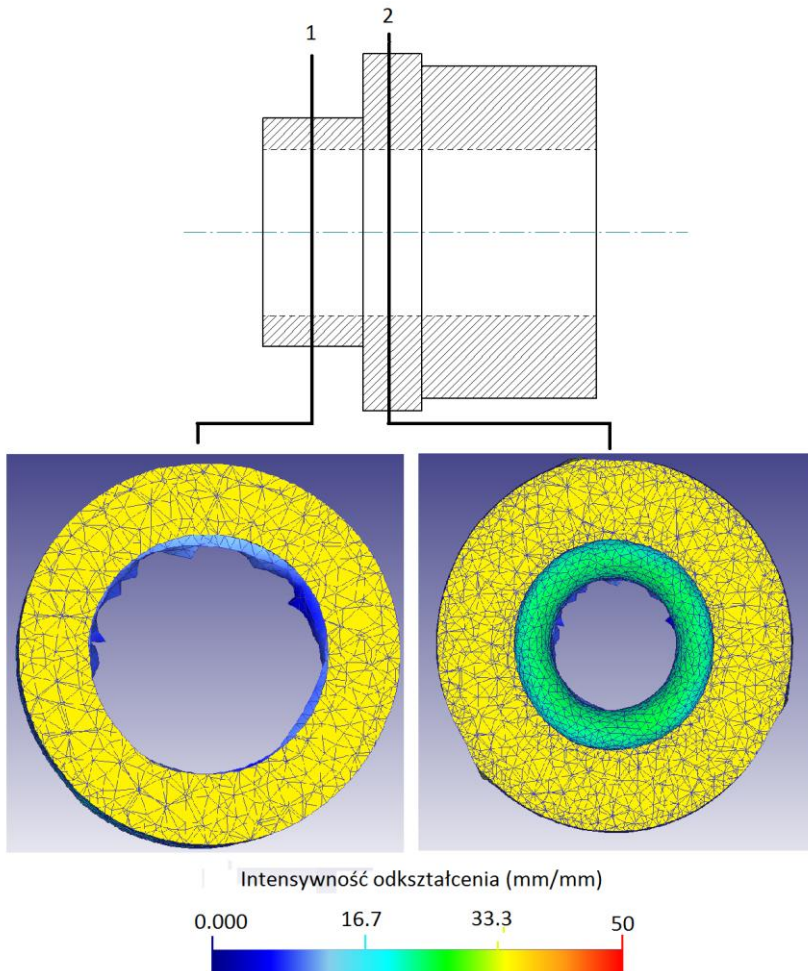
Rys. 6.6. Kolejne etapy kształtowania wsadu o średnicy wewnętrznej \varnothing 40 mm w przekroju poprzecznym wraz z rozkładem naprężeń [17]



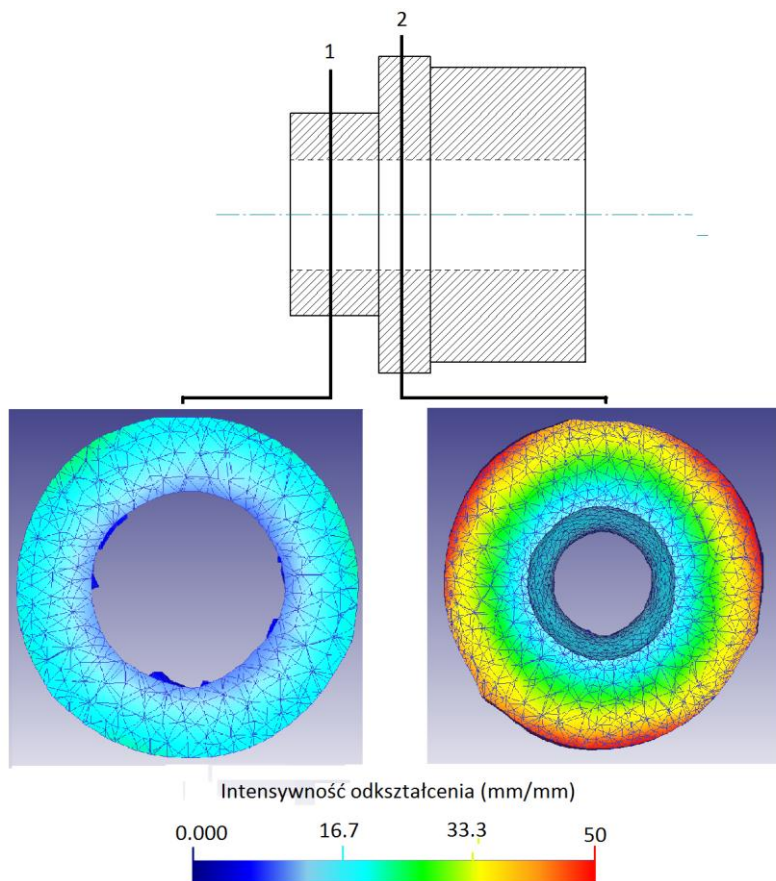
Rys. 6.7. Intensywność odkształceń w kolejnych etapach kształtowania



Rys. 6.8. Zagłębienie powstałe w wyniku płynięcia materiału



Rys. 6.9. Intensywność odkształceń w przekrojach ukształtowanego wałka z wsadu o średnicy wewnętrznej $\varnothing 40$ mm



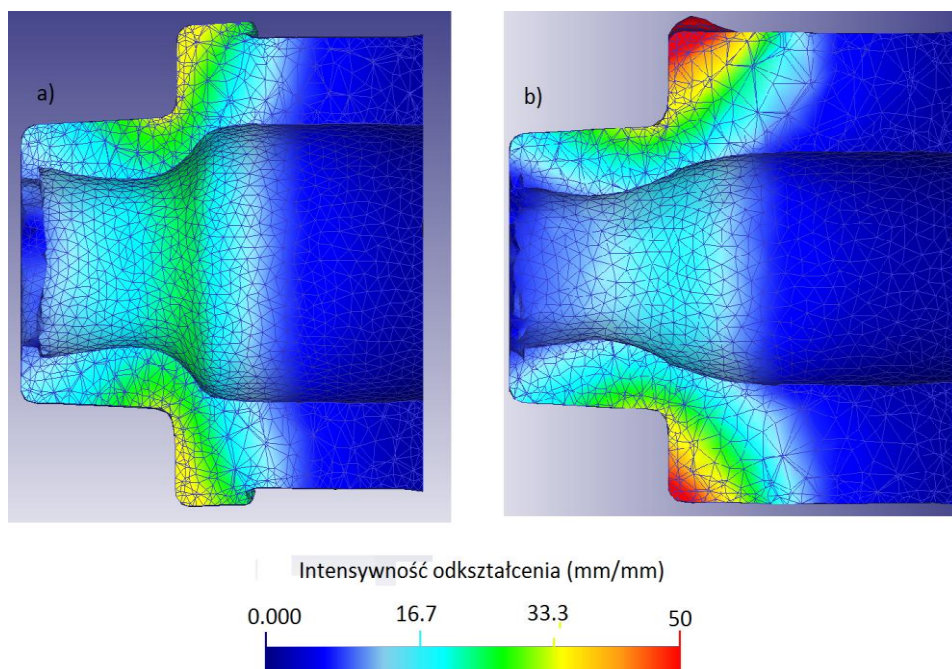
Rys. 6.10. Intensywność odkształceń w przekrojach ukształtowanego wałka z wsadu o średnicy wewnętrznej $\varnothing 50$ mm

Redukcja średnicy w tych przypadkach nastąpiła w podobny sposób na średnicy wewnętrznej jak i zewnętrznej wsadów, z tą różnicą, że na zewnątrz wsadów na materiał działała siła pochodząca od narzędzi roboczych. Na wewnętrznej powierzchni wsadów materiał płynął swobodnie w sposób zależny od ustalonej wartości posuwu na obrót.

Na rysunkach 6.9 i 6.10 pokazano, że intensywności odkształceń w obu przypadkach były inne. Na rysunku 6.9, gdzie przedstawiono wyniki osiągnięte z wsadu o średnicy wewnętrznej $\varnothing 40$ mm rezultaty są zróżnicowane i obejmują one wartości od około 12 aż do 50 przy powierzchni zewnętrznej w przekroju nr 2. W tym samym wałku można zaobserwować również najmniejsze wartości odkształcenia w przekroju nr 1. Rozkład ten jest bardzo podobny do analogicznie kształtowanych wyrobów z wsadów pełnych. Wskazuje to, że materiał o większej grubości ścianek zachowuje się w podobny sposób jak wyroby pozabawione otworu.

W wałku o mniejszej grubości ścianek (rys. 6.10) zaobserwowane wartości odkształceń pozostają niemalże stałe. Wynika to z szybszego uplastycznienia materiału na wskroś i wskazuje na występowanie znacznie większego ryzyka pojawienia się błędów kształtu. Wartości odkształceń są w tym wypadku mniejsze i osiągają poziom około $\varepsilon = 40$, co wskazuje także na mniejszy udział odkształceń zbędnych w tym procesie.

W wytworzonych wałkach porównane są również grubości ścianek, które są jednymi z podstawowych wartości określających sztywność oraz trwałość elementu. Wałki należy projektować w taki sposób, aby miały jak największe właściwości wytrzymałościowe pod kątem naprężeń skręcających oraz gnących. Grubości ścianek powinny mieć takie wartości, aby nie przekroczyły wartości krytycznych dla danych wartości obciążeń. Na rysunku 6.11 pokazano w przekrojach wzdłużnych grubości ścianek osiągnięte w ostatecznym etapie kształtowania.

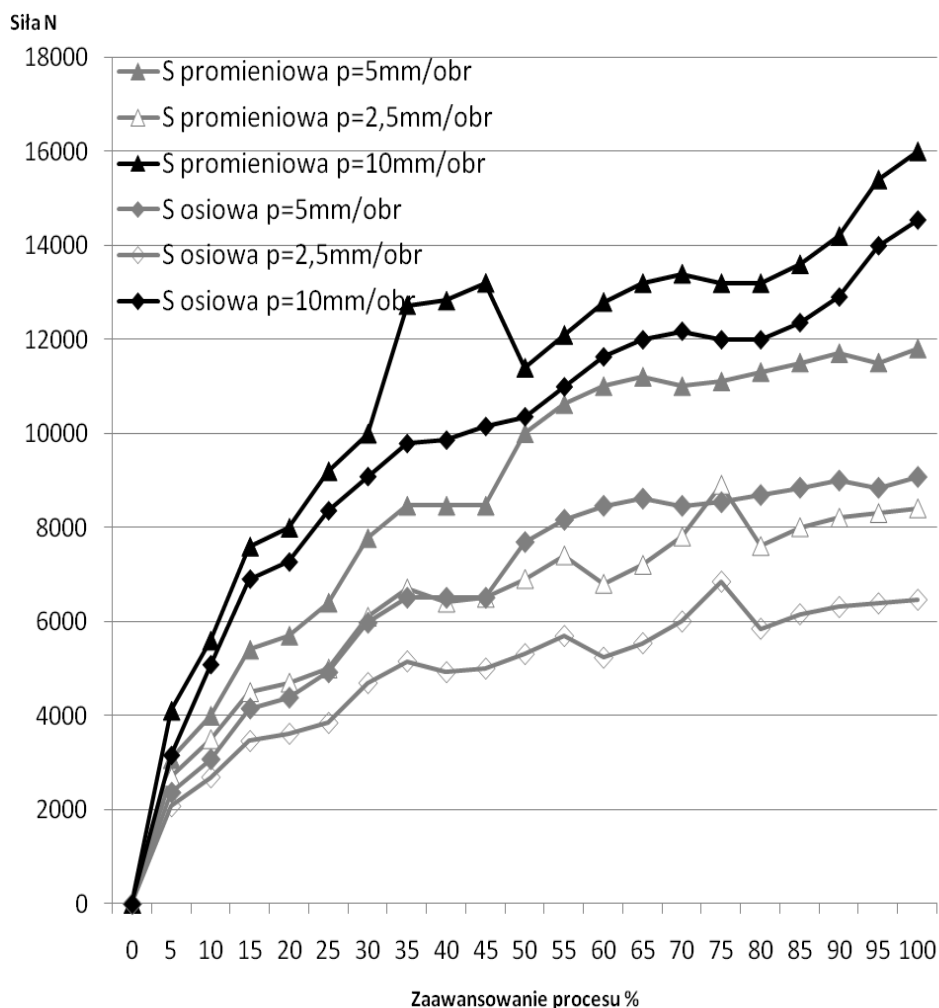


Rys. 6.11. Grubości ścianek wytworzonych wałków z wsadów o średnicy wewnętrznej: a) $\varnothing 50$ mm, b) $\varnothing 40$ mm

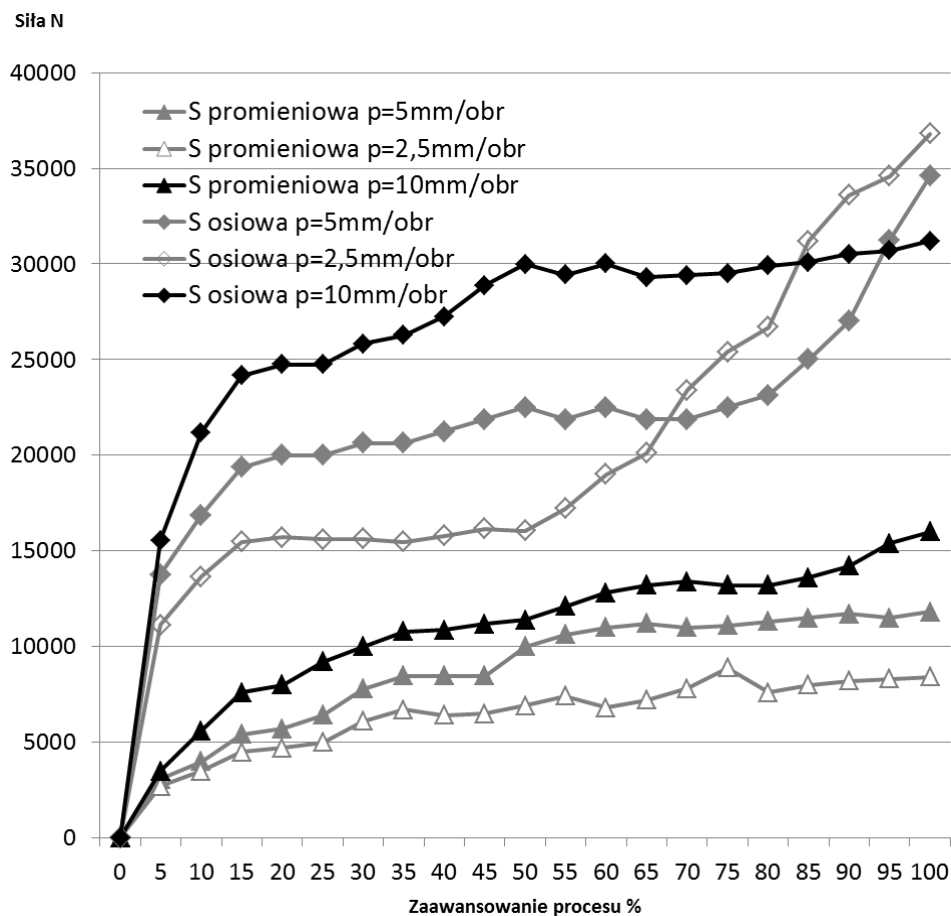
Na rysunku 6.11a, pokazana jest ścianka wyrobu, do którego został użyty wsad o średnicy wewnętrznej $\varnothing 50$ mm. Grubość tej ścianki jest dosyć mała. Ścianka nabiera niepożądanego kształtu w miejscu gdzie zaczyna się stopień wałka. Spowodowane jest to nieodpowiednim płynięciem materiału wzdłuż osi wałka po wspomnianym wcześniej uplastycznieniu na wskroś. Widać również

stopień, który był w odpowiedni sposób wywijany, co może wpłynąć na sztywność wałka. Wałek powstały z wsadu o średnicy wewnętrznej \varnothing 40 mm nie posiada już tak wyraźnego środkowego stopnia, jednak materiał płynący wewnątrz kształtowanego materiału formował się dużo lepiej. Żaden z wyrobów nie uzyskał pożądanego kształtu wewnętrznego, który powinien być walcowy o stałej średnicy, jednak wałek utworzony z wsadu \varnothing 40 mm był bardziej zbliżony do podanego założenia.

Na zestawieniu parametrów siłowych w realizowanym procesie (rys. 6.12) stwierdzono pewne różnice w przebiegach sił w porównaniu z analogicznym wykresem sporządzonym dla przepychania wyrobów kształtowanych z wsadów pełnych (rys. 6.13).



Rys.6.12. Wykres siły rozporowej oraz osiowej występujących w procesie kształtowania wyrobu drążonego z wartością posuwu podaną w legendzie



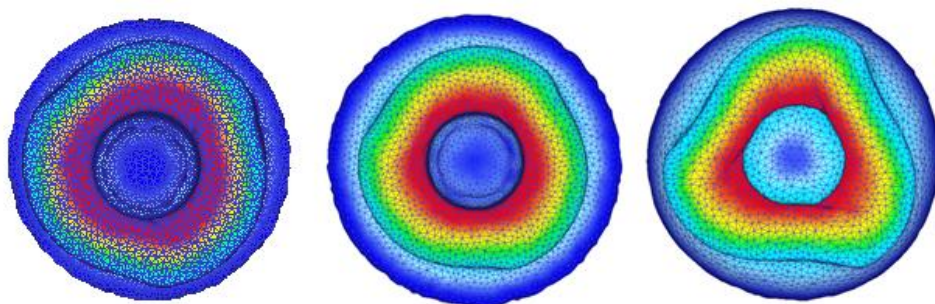
Rys.6.13. Wykres siły rozporowej oraz osiowej występujących w procesie kształtowania wyrobu pełnego z wartością posuwu podaną w legendzie

Podczas kształtowania wyrobów pełnych, szczególnie na początku procesu, siły osiowe rosły bardzo gwałtownie, by ustabilizować się na pewnym poziomie w okolicy 20% zaawansowania procesu. W przypadku zastosowania wsadów drążonych siły rosną równomiernie i brak jest zauważalnego etapu stabilizacji ich wartości. Większe oscylacje wskazują także na zaburzenia płynięcia metalu, co powinno wiązać się z większymi odchyłkami kształtu uzyskiwanych wyrobów.

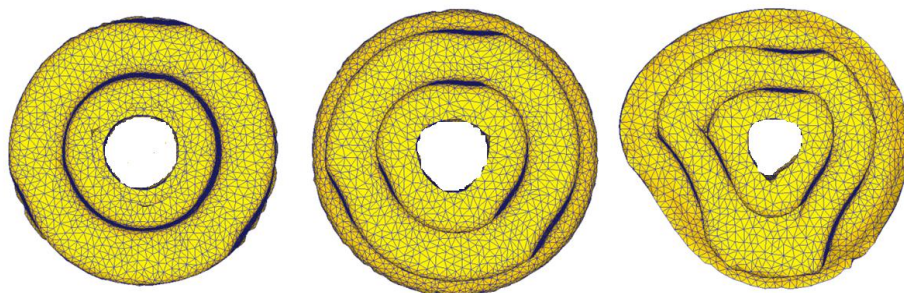
Wyniki otrzymane podczas przeprowadzonych obliczeń numerycznych wskazują na występowanie podobnych błędów kształtu zarówno podczas kształtowania pręta pełnego jak i tulei grubościennych. Rys. 6.14. przedstawia kształt wyrobu po przeprowadzonej symulacji numerycznej pręta pełnego. Zauważyć tutaj można to, iż wraz ze wzrostem prędkości popychacza hydraulicznego rosła odchyłka okrągłości. W przypadku odkuwki kształtowanej z posuwem $p = 10 \text{ mm/obr}$ widzimy znaczny wzrost trójkątowania w porównaniu z wyrobem kształtowanym z posuwem $p = 2,5 \text{ mm/obr}$. Powodem uzyskania takiej geometrii

jest znaczny wzrost siły osiowej, jaką działał popychacz na materiał obrabiany. Powodowało to znaczne płynięcie materiału w kierunku promieniowym i nieprawidłowe jego kształtowanie [20].

Kształtowanie tulei grubościennych przebiegało w bardzo podobny sposób jak wsadu pełnego. Z tą jednak różnicą, że nie zaobserwowano tutaj tak dużego wzrostu sił, jak w przypadku kształtowania z wsadu pełnego. Powodem tego było intensywne płynięcie materiału w kierunku do osi obrabianego elementu. Zaobserwowano w tym przypadku także znaczny wzrost odchyłki trójkątowania, która powiększała się wraz ze wzrostem prędkości popychacza hydraulicznego (rys. 6.15).



Rys.6.14. Otrzymane wyniki procesu dla wałka pełnego z prędkościami kształtowania 2.5 mm/obr, 5mm/obr, 10mm/obr

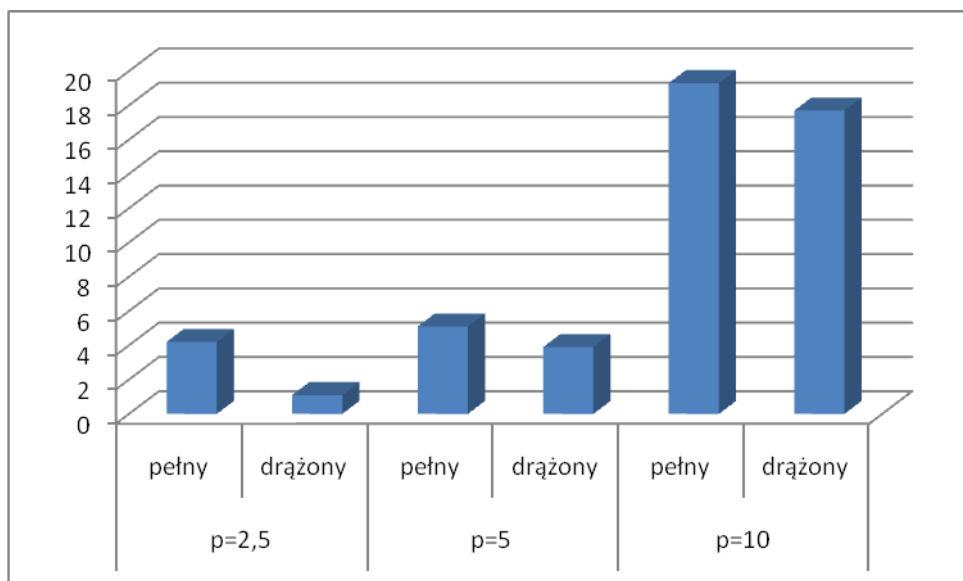


Rys.6.15. Uzyskane wyniki kształtowania tulei grubościennych z prędkościami kształtowania 2.5 mm/obr, 5mm/obr, 10mm/obr

Zgodnie z wcześniejszymi pracami badawczymi określono błąd kształtu jako Δ (odchyłki trójkątowania):

$$\Delta = d_{\max} - d_{\text{nom}}, \quad (6.1)$$

gdzie d_{\max} – maksymalna średnica wyrobu d_{nom} – nominalna średnica wyrobu. Na wykresie (rys. 6.16) przedstawiono zmiany odchyłki trójkątowania dla kształtowania wyrobów pełnych i drążonych przy trzech różnych prędkościach posuwu.



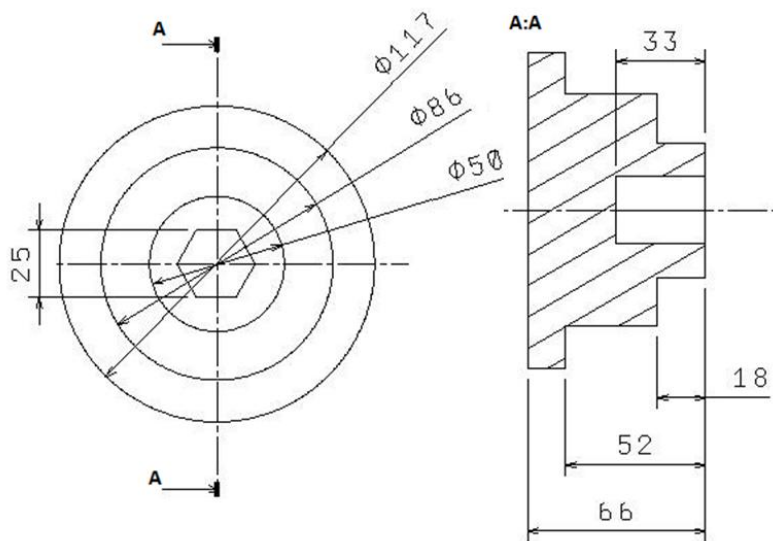
p=2,5		p=5		p=10	
pełny	drażony	pełny	drażony	pełny	drażony
4,2	1,1	5,1	3,9	19,3	17,7

Rys. 6.16. Wykres odchyłek trójkątowania (wartości w mm) dla wyrobów pełnych i drażonych przy podanej wartości posuwu p

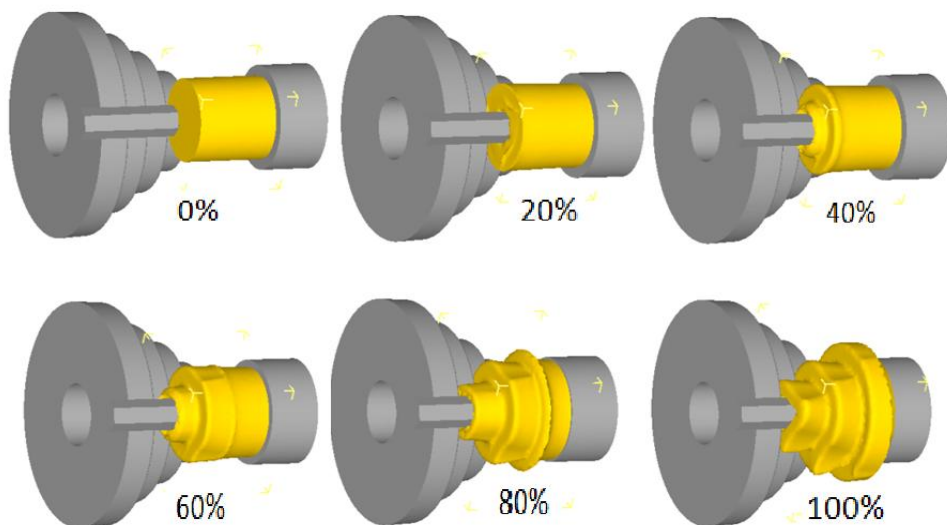
Analiza podanego zestawienia wskazuje na występowanie znacznych odchyłek trójkątowania wyrobów pełnych i drażonych przy przepychaniu obrotowym realizowanym z posuwem $p = 10$ mm/obr. Wartość ta jest zbyt duża dla zapewnienia redukcji trójkątowania pomiędzy rollkami. Materiał nie wykonuje pełnego obrotu pomiędzy narzędziami opuszczając już strefę kształtującą. Zmniejszenie wartości posuwu do $p = 5$ i $2,5$ mm/obr. skutkuje radykalną poprawą dokładności wymiarowej uzyskiwanych odkuwek. Dla wyrobów pełnych zmiana posuwu pomiędzy $p = 2,5$ a $p = 5$ mm/obr. nie przynosi zasadniczych różnic w odchyłce trójkątowania. W przypadku analogicznych wyrobów drażonych redukcja wartości posuwu przynosi znaczące obniżenie odchyłki trójkątowania, która przyjmuje wartość $\Delta = 1,1$ mm [14].

6.2. Zastosowania trzpieni kształtowych

Kolejne z prowadzonych obliczeń numerycznych dotyczyły kształtowania wyrobów z trzpieniami kształtowymi. Przykład takiego wyrobu podano na rys. 6.17, zaś rezultaty obliczeniowe na rys. 6.18÷6.20.



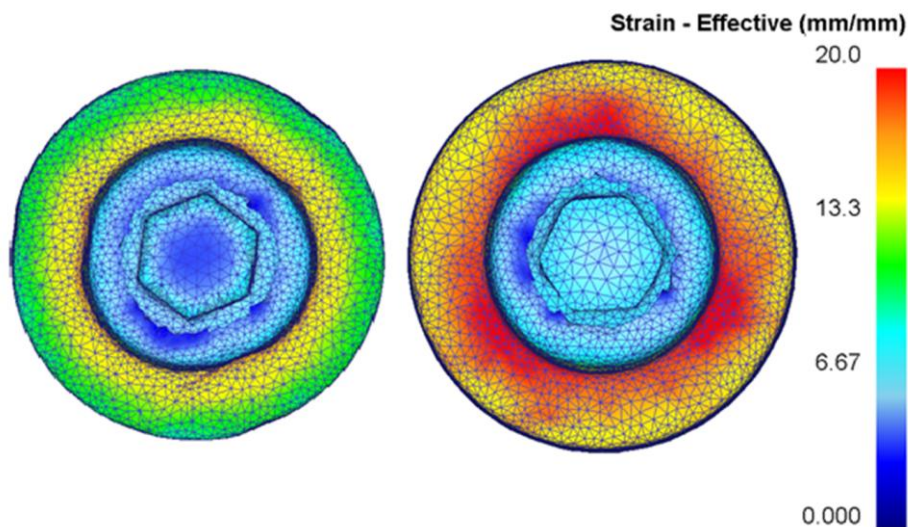
Rys. 6.17. Wyrób z gniazdem kształtowym, sześciokątnym [15]



Rys. 6.18. Progresa kształtu wyrobu z pokazanym błędem trójkątowania wynikającym ze zbyt dużej wartości posuwu na obrót p [15]

Przedstawiona na rys. 6.18 progresja kształtu wyrobu podczas wystąpienia zjawiska trójkątowania była szczególnie trudna do wyeliminowania ze względu na konieczność znacznego zmniejszenia wartości posuwu na obrót. Związane było to z zaburzeniem kołowego płynięcia metalu w trakcie przepychania, co prowadziło do bardzo wczesnego występowania zjawiska poślizgu i w efekcie

zniszczenia powstającego wyrobu. Konieczne w tym przypadku do zastosowania wartości posuwu nie mogły przekraczać $p = 2,5$ mm/obr. Pomimo tego na koniec procesu, w celu usunięcia niewielkiego trójkątowania konieczne było przeprowadzenie dodatkowego kalibrowania z wyłączonym posuwem ($p = 0$). Zastosowane rozwiązanie przyniosło rezultat w postaci ograniczenia trójkątowania Δ z $\Delta = 1,1$ mm do $\Delta = 0,2$ mm po kalibrowaniu – rys. 6.19. Operacja ta zwiększyła znacząco szczególnie poziom odkształceń zastępczych w wyrobie. Ich wartość osiągnęła $\varepsilon = 20$ – rys. 6.20.

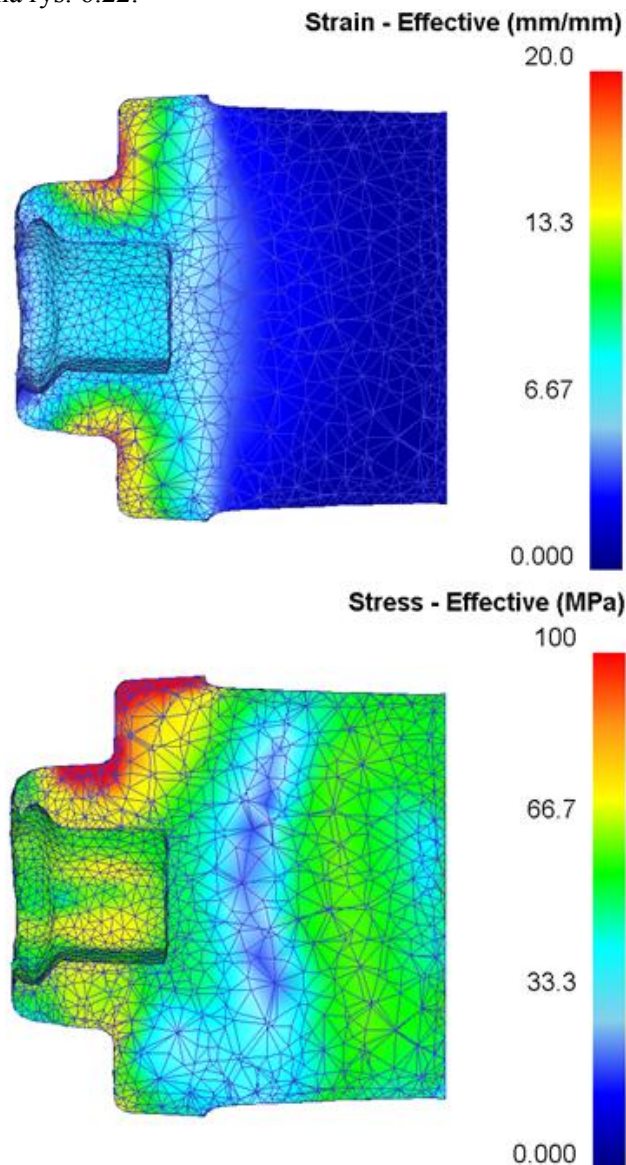


Rys. 6.19. Wyrób przed (po stronie lewej) i po dodatkowym kalibrowaniu z wyłączonym posuwem ($p = 0$) (po stronie prawej) [15]

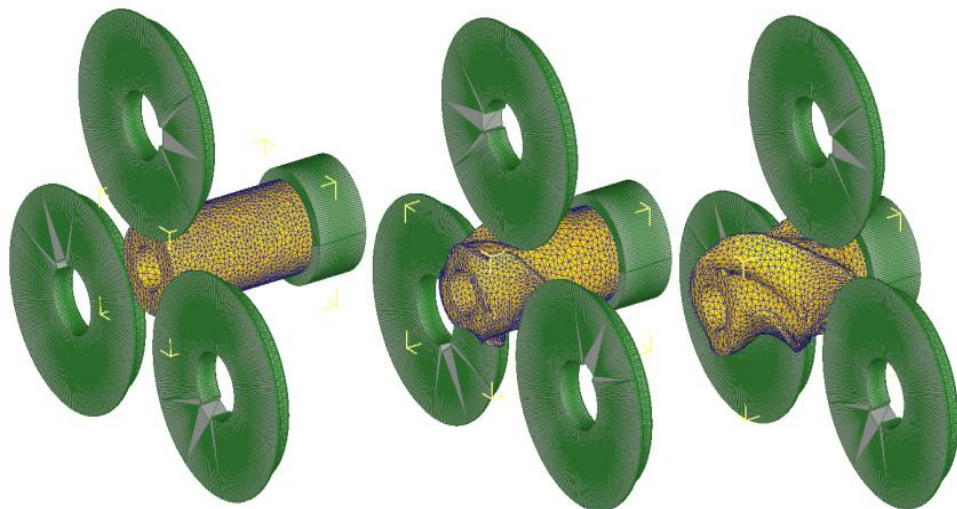
6.3. Kształtowanie wyrobów o zarysie śrubowym

Do analizy kształtowania wyrobu z linią śrubową wybrano przypadek kształtowania wyrobu o zarysie śrubowym na wsadzie drążonym. Opracowany na potrzeby obliczeń model numeryczny procesu oraz progresję kształtu powstającego wyrobu pokazano na rysunku 6.21. W zakresie przewidzianych badań numerycznych MES prowadzono symulacje procesu przepychania obrotowego wyrobów drążonych z różnymi prędkościami ruchu popychacza, skojarzonymi ze stałą prędkością obrotową rolek. Dla zastosowanych w analizie wsadów drążonych ze stopu tytanu Ti6Al4V o wymiarach $\text{Ø}60/\text{Ø}40 \times 160$ graniczną wartością posuwu na obrót, przy której materiał nie zachowywał zarysu kołowego było $p = 8$ mm/obr. Powyżej tej wartości posuwu materiał nie był już kształtowany poprzez styk z kolejnymi rolkami, co prowadziło do braku kalibrowania średnicy wyrobu i powstawania zarysu śrubowego. W obliczeniach

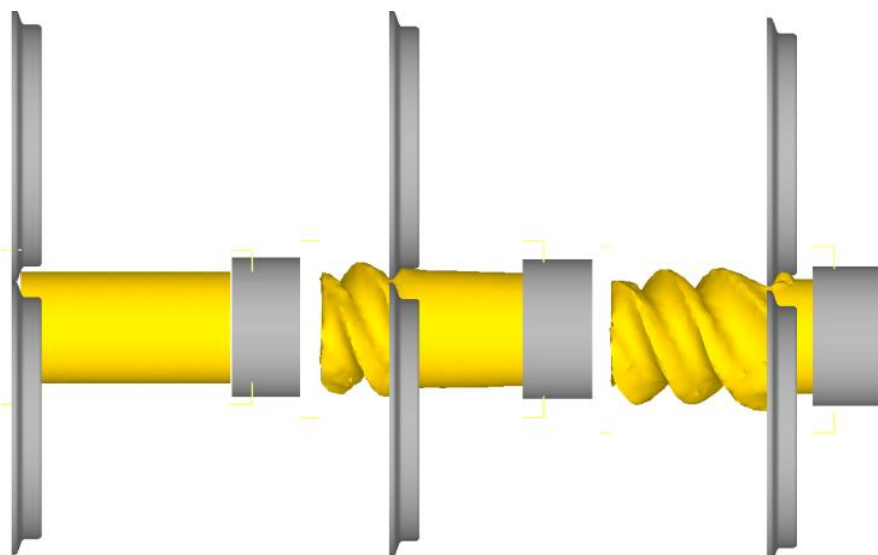
przyjmowano model materiałowy stopu tytanu Ti6Al4V z biblioteki programu Defrom3D. Analizę prowadzono dla początkowej temperatury wsadu $T = 920^{\circ}\text{C}$. Warunki tarcia opisano modelem tarcia stałego przyjmując graniczną wartość czynnika tarcia $m = 1,0$. Rezultat symulacji przy wartości posuwu na obrót $p = 10 \text{ mm/obr.}$ z przedstawionym w widoku bocznym kształtem stosowanych narzędzi podano na rys. 6.22.



Rys. 6.20. Przekroje poprzeczne z uwidocznionymi rozkładami odkształceń (u góry) oraz naprężeń (u dołu)



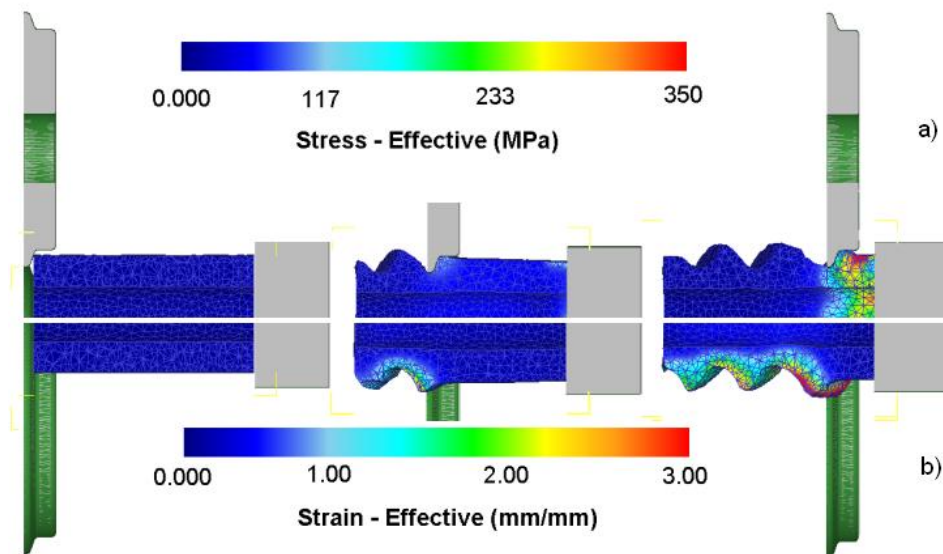
Rys. 6.21. Model numeryczny procesu oraz progresja kształtu wyrobu [16]



Rys. 6.22. Kształt narzędzi oraz kolejne etapy powstawania linii śrubowej ($p = 10 \text{ mm/obr.}$) [18]

W prowadzonych badaniach numerycznych analizowano rozkłady naprężeń oraz odkształceń. Na rys. 6.23 przedstawiono rozkłady naprężeń (a) oraz odkształceń (b) na przekrojach wzdłużnych wyrobu kształtowanego. W trakcie powstawania linii śrubowej naprężenia średnie (rys. 6.23a) osiągały wartości około 100 – 120 MPa, przy czym obszar nimi objęty obejmował jedynie obszar bezpośrednio przed elementem kształtującym narzędzi rolkowych. W ostatniej fazie procesu, gdy materiału kształtowanego pozostawało na utworzenie około połowy

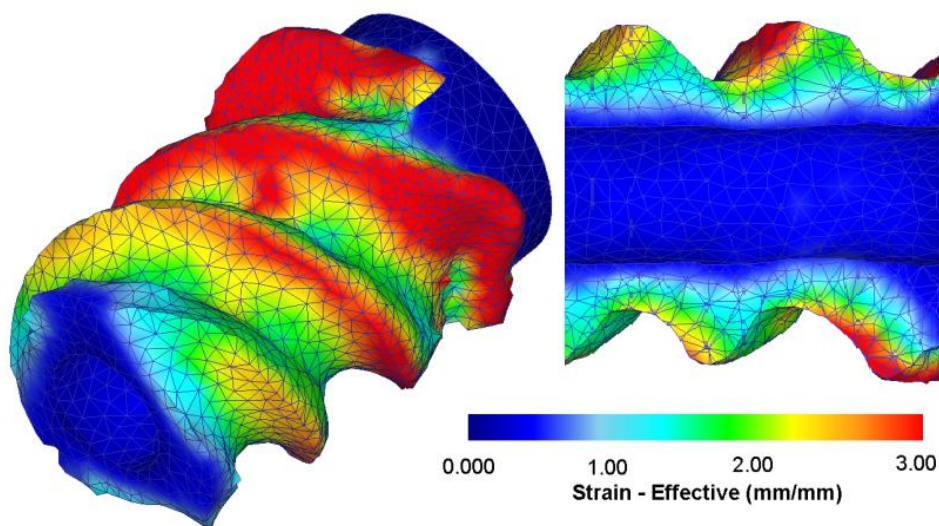
zwoju, wartość naprężeń gwałtownie wzrosła do 350MPa w obszarze początku spękania materiału. Brak możliwości swobodnego płynięcia wyrobu w całej objętości doprowadził do uplastycznienia wsadu na wskroś. Dalsze prowadzenie procesu prowadziło do silnego zdeformowania końca wsadu. Wartości odkształceń, jak na rotacyjne procesy obróbki plastycznej, były w podanym przypadku (rys. 6.23b) względnie małe osiągając maksymalne wartości do $\varepsilon = 3$. Związane było to z brakiem etapu kalibracji wyrobu poprzez kolejne kontakty z obracającymi się rolkami i, co za tym idzie, niewielkim udziałem odkształceń zbędnych. Umieszczenie stref odkształconych przy powierzchni materiału wskazywało na możliwość zachowania cylindrycznego kształtu otworu w wyrobie.



Rys. 6.23. Rozkłady naprężeń (a) oraz odkształceń (b) w przekrojach wzdłużnych wyrobu kształtowanego ($p = 10$ mm/obr.) [18]

Niestety zwiększanie prędkości posuwu na obrót p do wartości $p = 15$ mm/obr. prowadziło do powstawania linii śrubowej o większym skoku, ale i do powstawania zaburzeń tego zarysu. Niekontrolowane płynięcie metalu w kierunku do osi wyrobu skutkowało miejscowymi zawężeniami średnicy wewnętrznej – rys. 6.24. Dla posuwu $p = 10$ mm/ obr. odchyłka trójkątowania wynosiła $\Delta < 0,2$ mm natomiast dla posuwu $p = 15$ mm/ obr. odchyłka ta zwiększała się do $\Delta = 2,7$ mm. Przeprowadzona analiza teoretyczna procesu przepychania obrotowego wyrobów drążonych z zarysem linii śrubowej potwierdza możliwość kształtowania elementów typu ślimak. Proces ten pozwala znacząco zmniejszyć koszty wytwarzania szczególnie krótkich serii wyrobów. Wykorzystanie technik wirtualnego modelowania na etapie projektowania

ułatwia dobór optymalnych parametrów procesu. Możliwe jest również przeanalizowanie kinematyki płynięcia metalu pod kątem prognozowania powstającego zarysu oraz błędów kształtu w tak złożonym kinematycznie procesie. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do kontynuacji prac badawczych, które zmierzają do opracowanie wytycznych do przepychania obrotowego wyrobów o zarysie śrubowym. Praca zrealizowana w zakresie zrealizowanych symulacji numerycznych została wstępnie zweryfikowana doświadczalnie w agregacie do przepychania obrotowego PO-2.

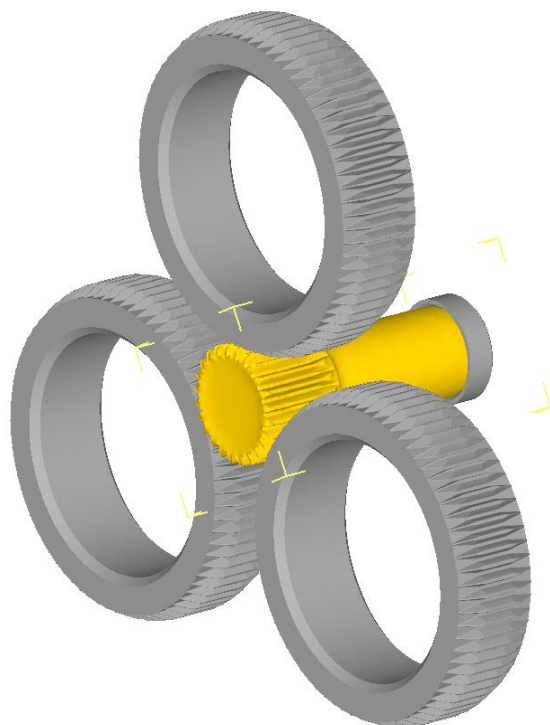


Rys. 6.24. Rozkład odkształceń w widoku izometrycznym oraz w przekroju wzdłużnym wyrobu kształtowanego ($p = 15 \text{ mm/obr.}$)

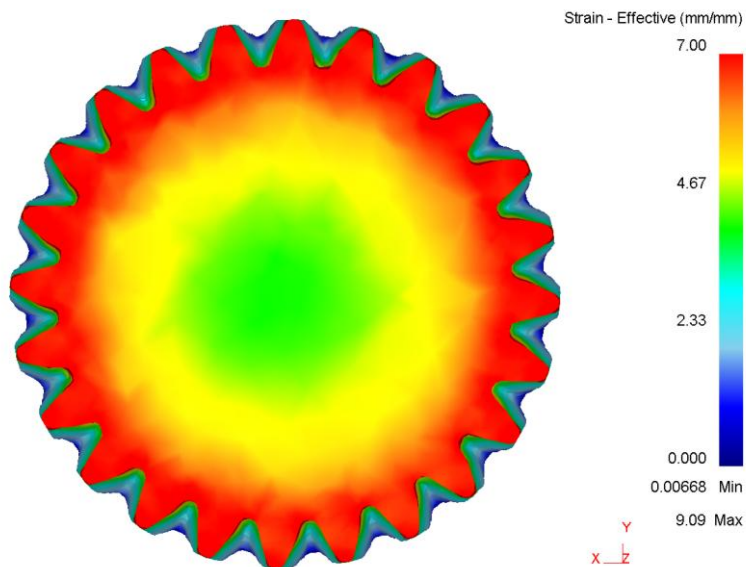
6.4. Kształtowanie wyrobów z uzębieniami przelotowymi oraz czołowymi

W zakresie kształtowania uzębień przeprowadzono próby kształtowania uzębienia metodą przelotową oraz próby uzyskania uzębienia na powierzchni czołowej kształtowanego wałka. W obu przypadkach skupiono się na możliwie dokładnym odwzorowaniu zarysu zębów, co stanowić miało o przydatności tego rozwiązania w zastosowaniach przemysłowych w wytwarzaniu półfabrykatów. Na rys. 6.25 przedstawiono przykładowy model procesu kształtowania uzębienia przelotowego na stopniu przepychanego obrotowo wałka pełnego. Uzyskiwane wyniki obliczeniowe, dla zaprojektowanego przypadku symulacyjnego, podano na kolejnych rysunkach – rys. 6.26–6.28. Podane na rys. 6.26 i 6.27 rozkłady odkształceń wskazują na intensywne kształtowanie wyrobu wyłącznie w obszarze powstającego uzębienia. Uzyskanym w tym zakresie wynikiem

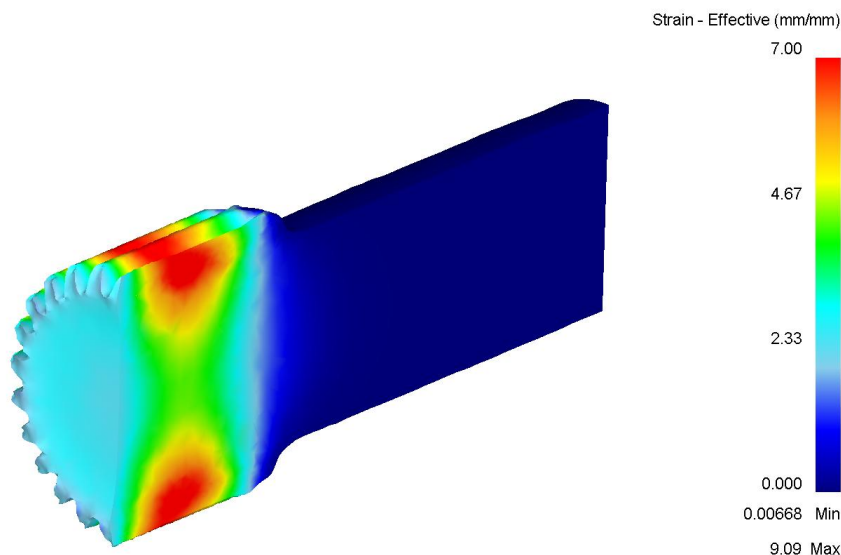
odpowiada także rozkład kryterium zniszczenia (rys. 6.28), gdzie szczególnie widoczne są obszary występowania podwyższonego ryzyka pojawienia się pęknięć.



Rys. 6.25. Model procesu kształtowania uzębienia metodą przelotową

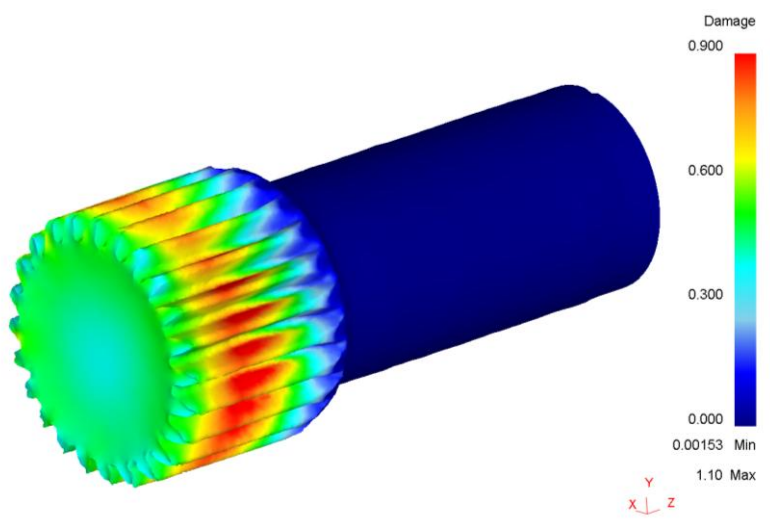


Rys. 6.26. Rozkład odkształceń w widoku od czola

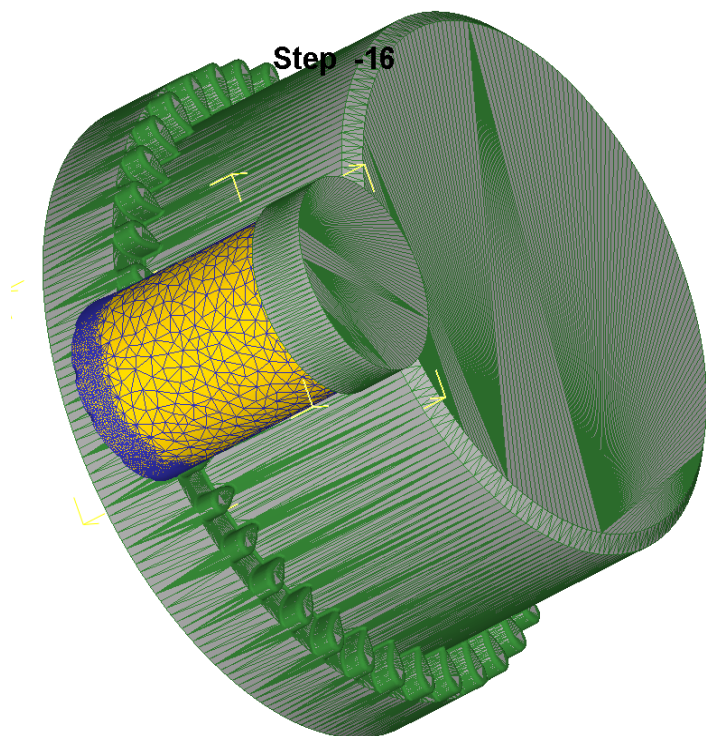


Rys. 6.27. Rozkład odkształceń w przekroju wzdłużnym wyrobu kształtowanego

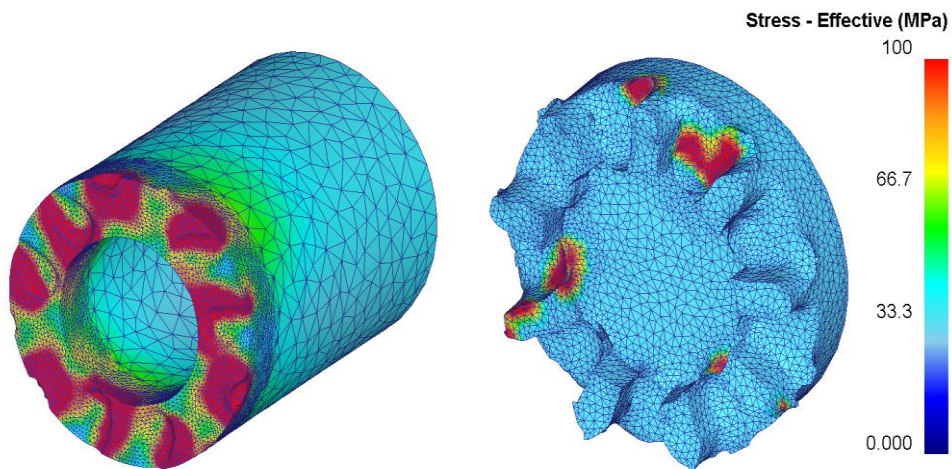
Kolejne z prowadzonych prac symulacyjnych dotyczyły procesu kształtowania uzębień czołowych. Ze względu na konieczność „obtaczania” wsadu przez każdą z rolek niezbędne było w tym celu zaprojektowanie specjalnego zarysu o kształcie łezkowym. Przykładowy model numeryczny takiego procesu z rolką o zarysie łezkowym podano na rys. 6.29. Przedstawiony na rys. 2.19 model numeryczny posłużył do obliczeń teoretycznych procesu przepychania obrotowego uzębienia czołowego. W wyniku prowadzonych analiz uzyskano rozkłady naprężeń i odkształceń w wyrobie kształtowanym (rys. 6.30 i 6.31).



Rys. 6.28. Rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta – Lathama

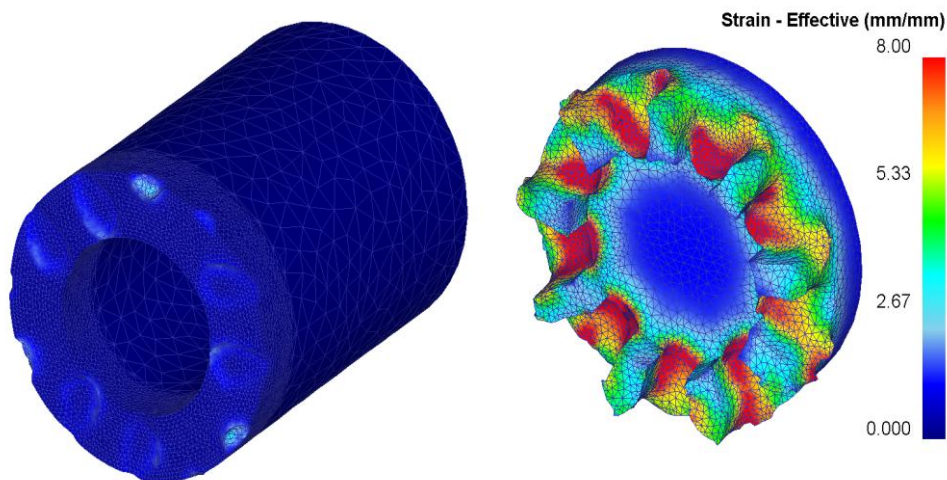


Rys. 6.29 Model numeryczny procesu przepychania obrotowego uzębienia czołowego z pokazaną siatką elementów skończonych i lokalnym ich zagęszczeniem w strefie kształtowania uzębienia (dwie rolki zostały wygaszone)

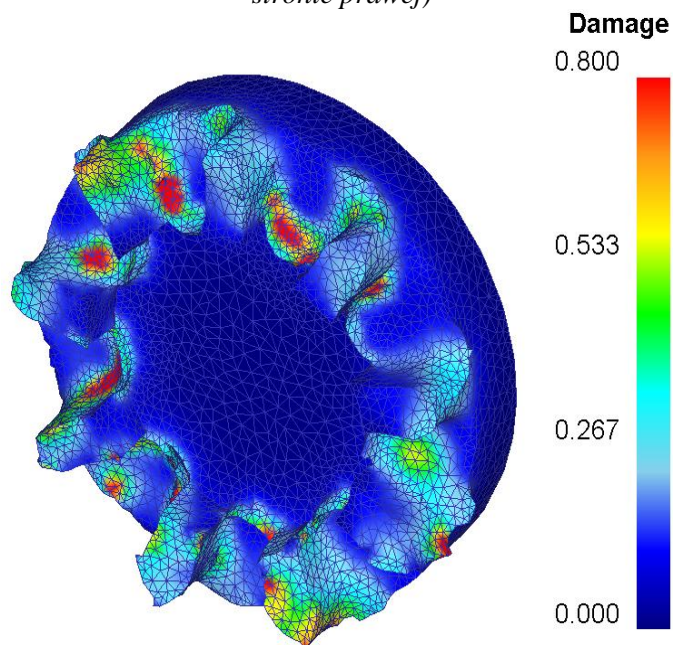


Rys. 6.30 Rozkład naprężeń trakcie kształtowania uzębienia czołowego (10% zaawansowania po stronie lewej, 100% zaawansowania po stronie prawej)

Dalszej analizie teoretycznej poddano kryterium pęknięcia Cockrofta – Lathama wskazujące na możliwość występowania pęknięć w wyrobie wytwarzanym. Podany na rys. 6.32 rozkład tego parametru w obrębie kształtowanego uzębienia wskazuje na występowanie podwyższonego ryzyka pojawienia się pęknięć w wyrobie.

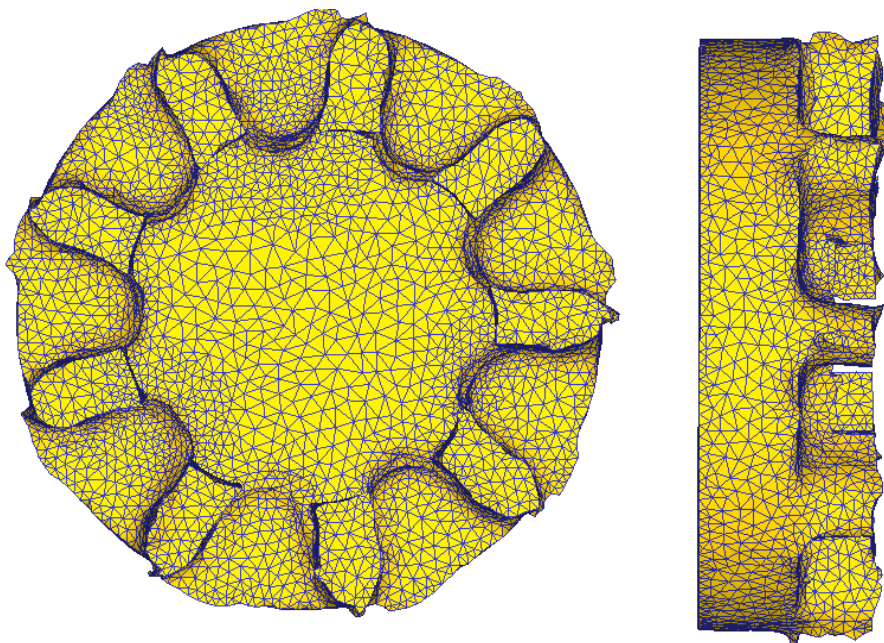


Rys. 6.31 Rozkład intensywności odkształceń w trakcie kształtowania uzębienia czołowego (10% zaawansowania po stronie lewej, 100% zaawansowania po stronie prawej)



Rys. 6.32 Rozkład całki Cockrofta – Lathama – kryterium pęknięcia

Na rys 6.33 przedstawiono widok ukształtowanego uzębienia, które odwzorowało założony zarys rolek narzędziowych. Wykonane pomiary szacunkowe na tak przedstawionym modelu wyrobu wskazują na konieczność dalszej obróbki mechanicznej uzębienia w zakresie około 1,5 mm (przy założeniu uzyskania np. połączenia kłowego).



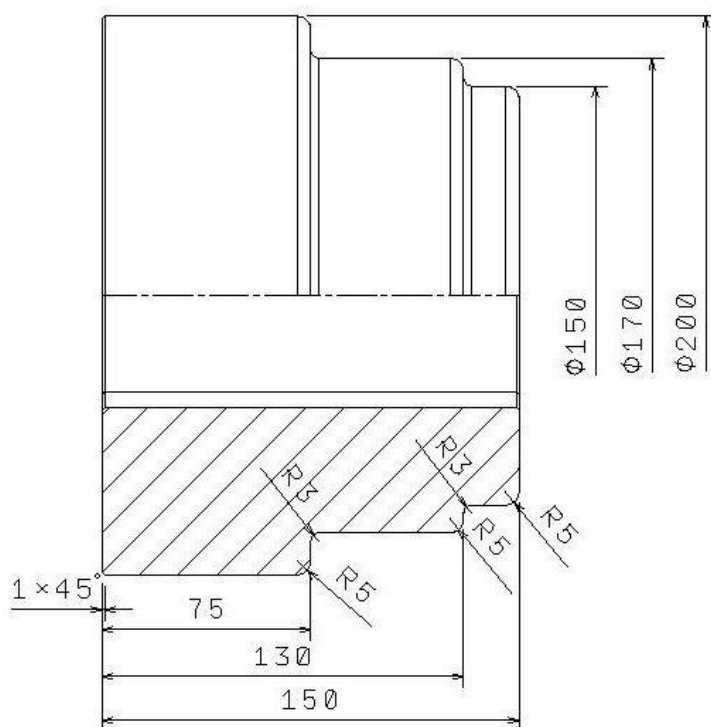
Rys. 6.33. *Przepychany obrotowo wyrób z zarysem uzębienia czołowego*

6.5. Badania doświadczalne

Dla wybranych wyrobów pełnych i drążonych przeprowadzono także badania doświadczalne procesu kształtowania przy parametrach technologicznych zgodnych z zastosowanymi w obliczeniach numerycznych. Dokumentacja wykonawcza narzędzi roboczych w postaci rolek została wykonana na bazie rezultatów symulacji numerycznych. Wybrane schematy wykonawczy dwóch zarysów rolek podano na kolejnych rysunkach (rys. 6.34 i rys. 6.35).

Wykonanie tych narzędzi wymagało jedynie przeprowadzenia operacji toczenia, szlifowania oraz wykonania rowków wpustowych. Materiałem zastosowanym na narzędzia rolkowe była stal w gatunku 40H w stanie ulepszonym.

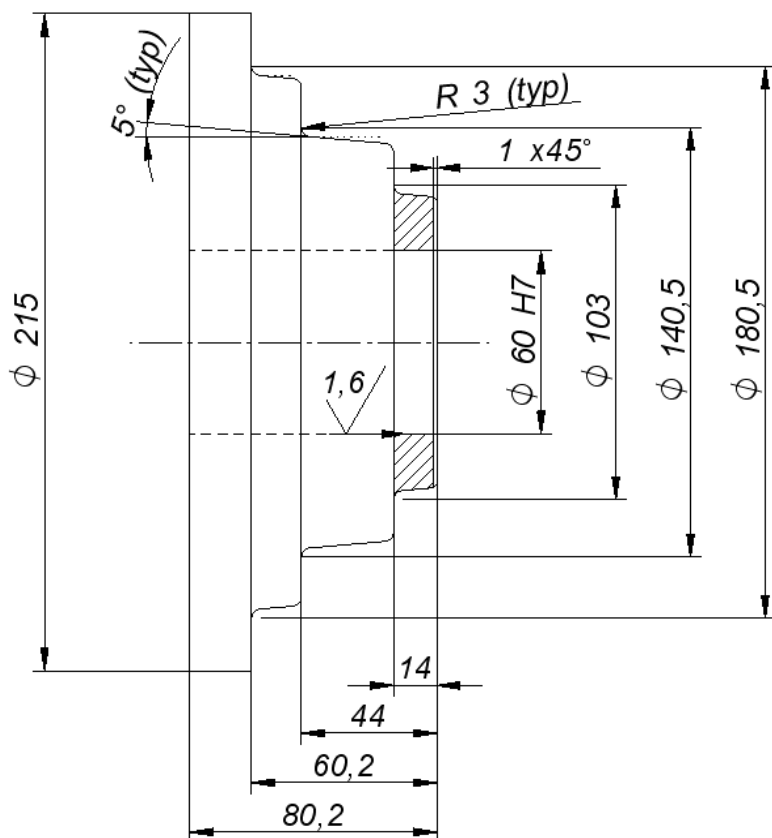
Dla zabezpieczenia możliwości przeprowadzenia prób kształtowania z trzpieniem kształtowym o zarysie sześciokątnym konieczne było zaprojektowanie dodatkowej głowicy obrotowej dla siłownika tylnego wyposażonej w gniazdo montażowe dla przewidywanych w programie badań trzpieni. Widok modelu numerycznego głowicy oraz rysunek wykonawczy trzpienia kształtowego podano na rys. 6.36.



Rys. 6.34. Schemat rolki profilowanej nr 1

Szczególne trudne okazało się zaprojektowanie narzędzia dla zagwarantowania prawidłowego przebiegu kształtowania zębów czołowych. Konieczność odtaczania się poszczególnych zarysów ewolwent rolek roboczych owych po powierzchni kształtowanych zębów skłoniła do żmudnego poszukiwania rozwiązania tego problemu. Opracowany z sukcesem kształt narzędzi zgłoszono do Urzędu Patentowego RP.

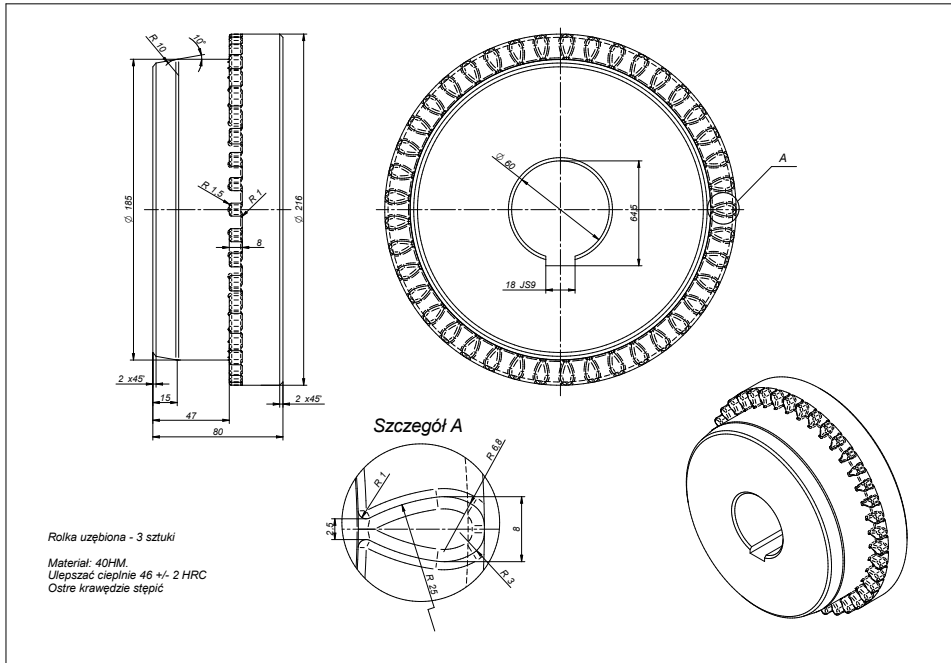
Podane rozwiązanie przedstawiono bardziej szczegółowo na rys. 6.37. Przygotowane narzędzia przedstawiono na rys. 6.38 oraz rys. 6.39. Przeprowadzone w ramach weryfikacji doświadczalnej próby kształtowania w agregacie PO-2 pozwoliły na uzyskanie odpowiedzi dotyczącej zgodności wyników uzyskanych na drodze obliczeń numerycznych i w toku prób eksperymentalnych.



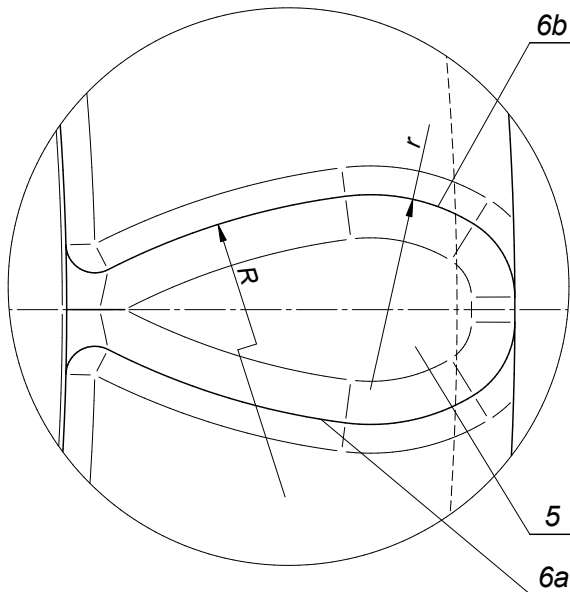
Rys. 6.35. Schemat rolki profilowanej nr 2

Na rys. 6.40÷6.43 przedstawiono fotografie z realizacji procesu kształtowania wałka stopniowanego wykonywanego ze stali w gatunku C45 nagrzewanej do temperatury 150°C. Widoczne na fotografiach relatywnie duże ilości zgorzeliny wynikają z faktu nagrzewania wsadów w piecu komorowym.

Stosowane rozwiązanie wymaga w przyszłości przekonstruowania pod kątem wprowadzenia nagrzewu indukcyjnego. Rozwiązanie to pozwoli, poza poprawą poziomu bezpieczeństwa i ograniczeniem zużycia energii, na zmniejszenie intensywności powstawania zgorzeliny mającej niemały wpływ na warunki kontaktu oraz końcowe wymiary uzyskiwanych wyrobów gotowych.



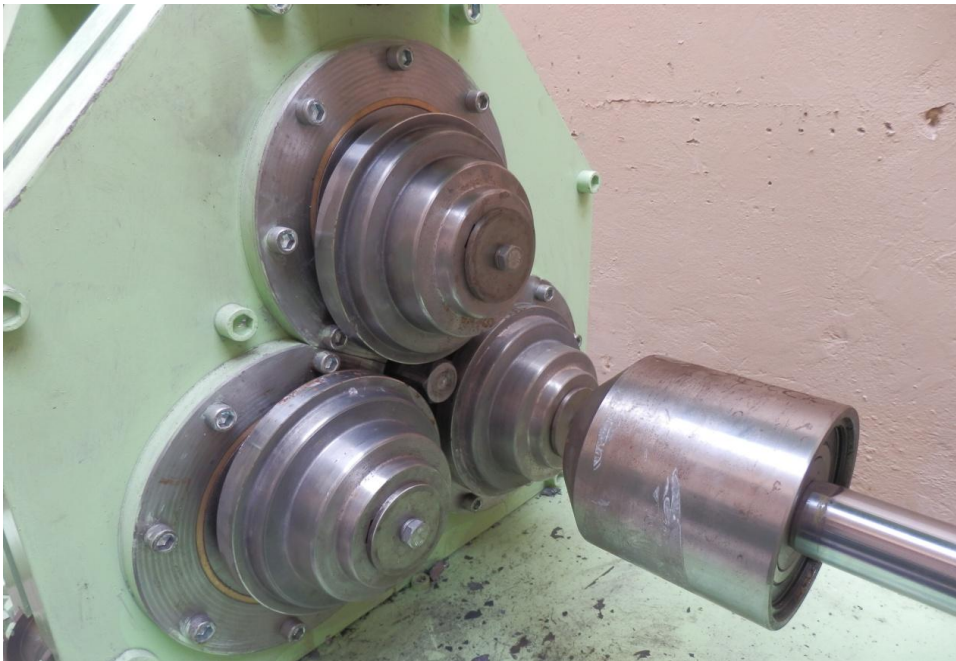
A



Rys. 6.37. Schemat rolki do kształtowania wyrobów z uzębieniem czołowym z zaznaczonymi podstawowymi elementami oraz parametrami będący przedmiotem zgłoszenia patentowego



Rys. 6.38. Wykonane ze stali 40H przykładowe rolki obrotowe



Rys. 6.39. Przestrzeń robocza agregatu PO-2 z zamontowanym trzpieniem kształtowym, sześciokątnym (widoczne zsuniecie rolek do siebie na mimosrodach)

W przedstawionych procesach kształtowania analizowano także graniczne wartości grubości ścianek wsadów drążonych, przy których powstający wyrób zachowuje stabilność kształtu okrągłego. Kluczowe znaczenia miała tutaj także prędkość posuwu na obrót oraz szybsze wychładzanie materiału prowadzące do znacznego wzrostu sił kształtujących. Na rys. 6.44 przedstawiono przykładowy wyrób, który uległ deformacji na skutek zbyt dużej wartości posuwu na obrót.

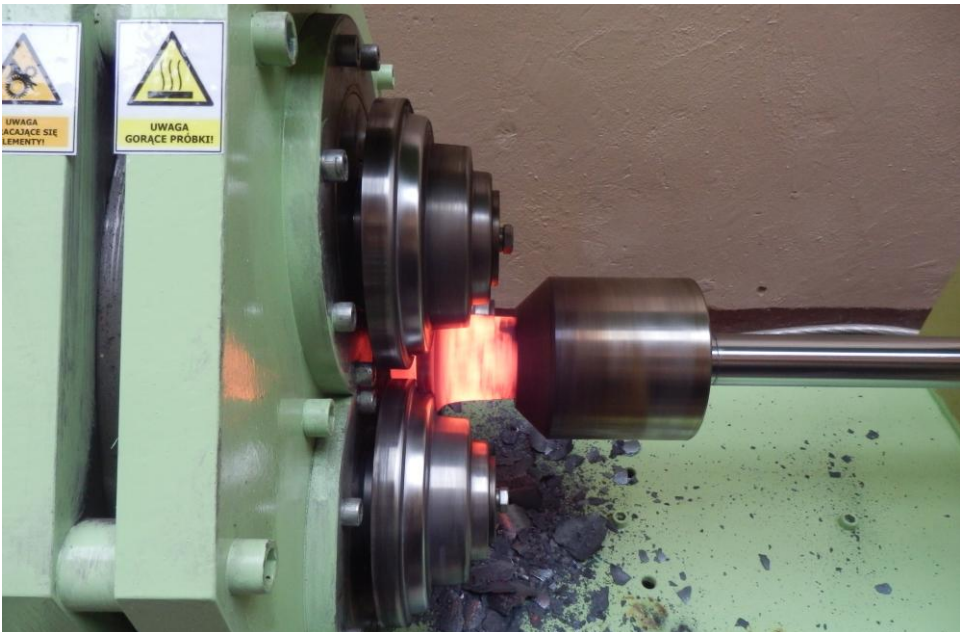


Rys. 6.40. Wprowadzenie wsadu do przestrzeni roboczej oraz przytrzymanie do zetknięcia jego powierzchni czołowej ze stopniem obracających się narzędzi rolkowych

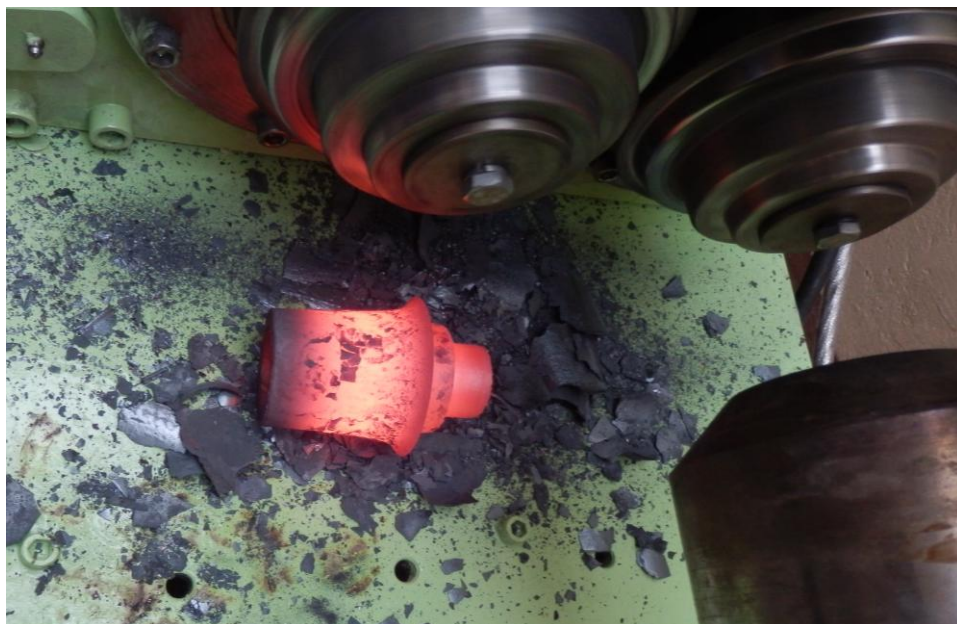
Przykładowe wyniki dotyczące odczytu sił osiowych (popychacz) oraz promieniowych (rolka) podano na wykresie – rys. 6.45. Widoczne różnice w przebiegach sił pomiędzy wartościami wyznaczonymi teoretycznie a uzyskanymi doświadczalnie w trakcie eksperymentu wskazują na pewne uproszczenia w przyjętych do symulacji modelach. Powtarzające się systematycznie różnice wskazują na prawdopodobieństwo szybszego wychładzania się wyrobu kształtowanego niż wg założeń teoretycznych. Z drugiej strony spotkanie się linii przebiegu siły na popychaczu (wyznaczonej MES oraz zmierzonej) wskazuje na trochę inne schematy płynięcia metalu, gdzie w przypadku obliczeniowym materiał ulega silniejszemu spęczaniu niż ma to miejsce w rzeczywistości. Pewnych nieścisłości można się także było spodziewać w procesie skalowania mostków tensometrycznych, co także nie pozostało bez wpływu na otrzymane wyniki. Dla zapewnienia wyższej dokładności realizowanych pomiarów zdecydowano się na zamontowanie dodatkowych szybkozłączy na rozdzielaczu hydraulicznym agregatu (rys. 6.46) oraz na montażu dodatkowego czujnika momentu obrotowego (rys. 6.47) zabudowanego w miejsce jednego z wałów napędowych przenoszących moment obrotowy z przekładni zębatej na rolkę narzędziową.



Rys. 6.41. Etap kształtowania stopnia wałka (głowica popychacza wprawiona w ruch obrotowy przekazywany od rolek poprzez materiał kształtowany)



Rys. 6.42. Koniec etapu kształtowania wałka stopniowanego (zatrzymanie ruchu postępowego popychacza)

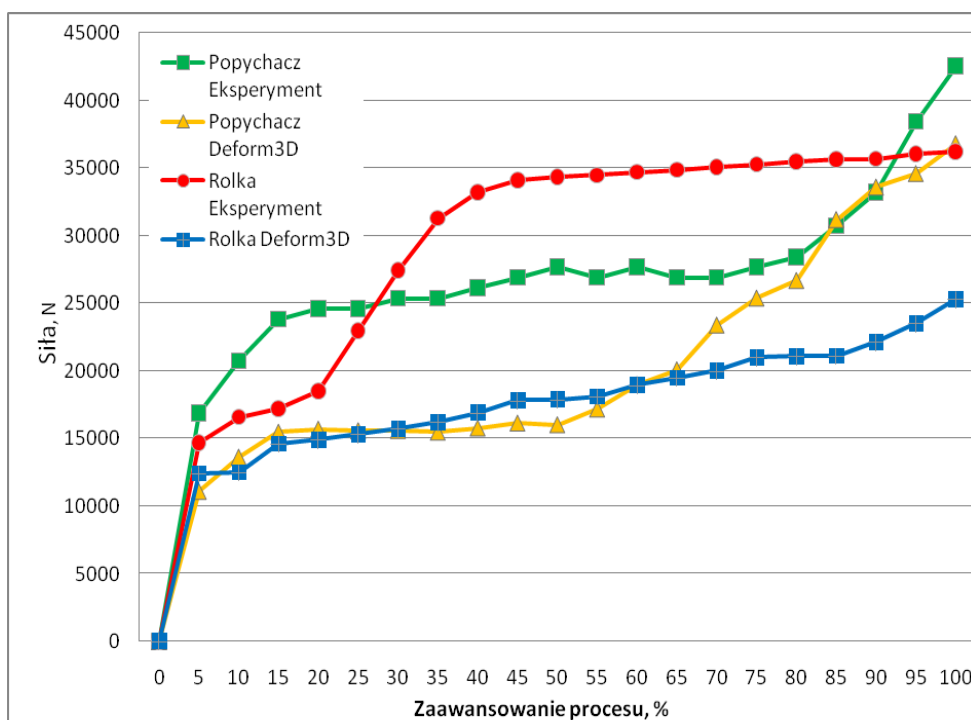


Rys. 6.43. Wyrób gotowy uzyskany w procesie realizowanym ze zmniejszającą się prędkością posuwu na obrót (opis w tekście)



Rys. 6.44. Zdeformowany wyrób drążony powstały w wyniku zbyt szybkiego podawania materiału do przestrzeni roboczej pomiędzy rolkami

Wprowadzone modyfikacje pozwoliły na dokładniejsze pomiary parametrów siłowych w trakcie realizacji procesów kształtowania. Uzyskiwane z czujników ciśnienia informacje umożliwiły na dokładną rejestrację siły osiowej pojawiającej się na popychaczu. Ciekawostką był fakt, że, poza większą częstotliwością próbkowania sygnału, mierzone wyniki były prawie identyczne jak w badaniach tensometrycznych. Wskazuje to na bardzo dokładną kalibrację używanego badaniach mostka. Z wybranych przykładów analizy momentów sił pojawiających się na wałkach napędzających rolki należy podkreślić, że wartości mierzone oraz wyznaczane teoretycznie różniły się w mniejszym stopniu niż wartości sił osiowych i promieniowych. Przykładowy przebieg momentów sił na jednym z wałków podano na rys. 6.48. Widoczne w tym przypadku różnice są nieznaczne a zmiany w przebiegu linii trendu wykazują znaczne podobieństwo.



Rys. 6.45. Przebieg sił osiowych (popychacz) i promieniowych (rolka) w procesie przepychania obrotowego wybranego wyrobów stopniowanego wyznaczony MES oraz zmierzony w trakcie eksperymentu

Wyniki badań laboratoryjnych stanowiły weryfikację wybranych symulacji numerycznych procesów kształtowania wyrobów pełnych i drażonych. W przypadku prób wykonywanych dla zaprojektowanych rolek narzędziowych do kształtowania wyrobów stopniowanych skupiono się na porównaniach odchyłek kształtu oraz parametrów siłowych. Szczególnie dużą trudność sprawiło przeprowadzenie badań nad wytwarzaniem wyrobów z uzębieniem czołowym.

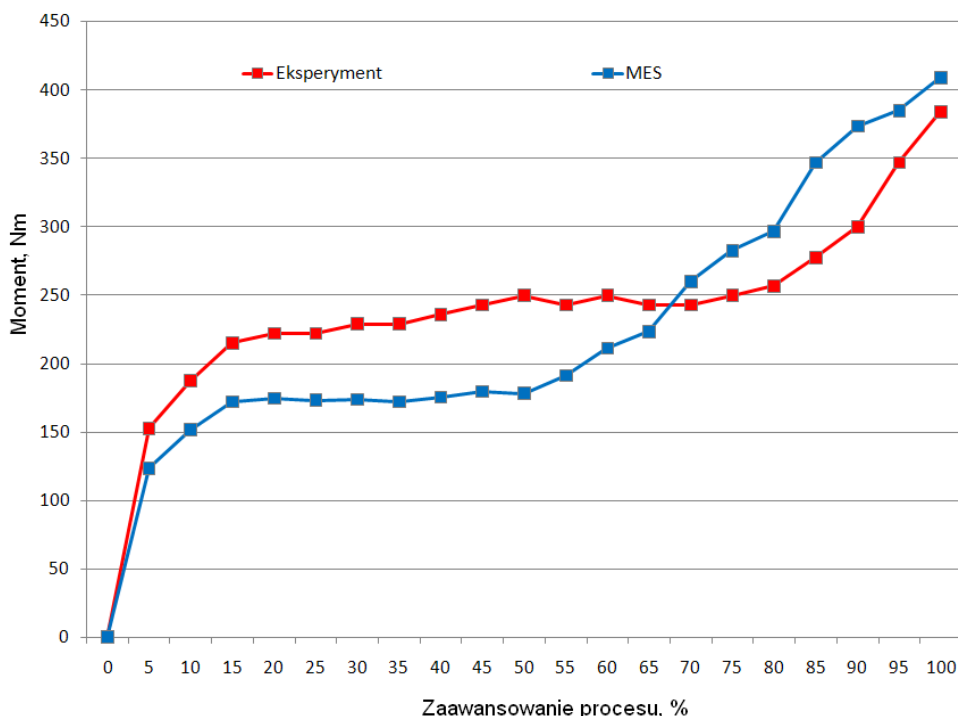


Rys. 6.46. Szybkozłącza zamontowane na przewodach zasilacza hydraulicznego agregatu



Rys. 6.47. Zabudowany w miejsce jednego z wałów czujnik momentu obrotowego (widoczna tylna głowica obrotowa agregatu (przedstawiona na rys 6.36)

Wielokrotnie powtarzane próby kształtowania z trzema rolkami narzędziami, o naciętym zarysie leżkowym, kończyły się kolejnymi niepowodzeniami. Ich efektem było niszczenie kolejnych zębów przez następujące po sobie kontakty z poszczególnymi rolkami. Stąd też, opracowano wzorniki mające pomóc we właściwym wzajemnym ustawieniu kątowym tych narzędzi. Ponieważ w konstrukcji rolek przewidziano ich mocowanie na wale za pomocą wpustów, na kolejnych rolkach nacięto szereg rowków wpustowych z podziałką umożliwiającą ich ustawienie.



Rys. 6.48. Porównanie wybranych przebiegów momentów na jednym z wałów, obliczonych MES oraz zmierzonych tracie eksperymentu

Dopiero szczegółowa analiza kinematyczna układu napędowego agregatu wskazała, że powodem problemów były drgania generowane pod obciążeniem przez przekładnię zębatą rozdzielającą moment obrotowy na trzy wały transmisyjne. Zastosowanie w jej budowie zębów prostych wprowadziło do łańcucha kinematycznego zbyt duże luzy. W ten sposób do dalszych prac nad kształtowaniem uzębień konieczna będzie przyszła modernizacja agregatu polegająca na wymianie przekładni. Przedstawiony na rys. 6.33 zarys uzębienia czołowego udało się uzyskać w stopniu zadowalającym po długich i żmudnych regulacjach mechanizmu napędowego. W ten sposób potwierdzono możliwość kształtowania takich uzębień oraz jednocześnie wypróbowano kształtowanie gniazd sześciokątnych za pomocą trzpienia – rys. 6.49.



Rys. 6.49. Wyrób stopniowany z ukształtowanym zarysem uzębienia czołowego oraz gniazdem sześciokątnym - materiał: ołów Pb1

7. Podsumowanie

W bieżącym opracowaniu zwartym przedstawiono kolejne etapy pracy nad rozwojem technologii przepychania obrotowego. Zakres przeprowadzonych wstępnie obliczeń numerycznych wskazał na dalsze możliwości rozwoju tej technologii kształtowania. Od pozyskania środków na badania do uzyskania prezentowanych tu rezultatów upłynęło trzy lata. W okresie tym kontynuowano badania teoretyczne obejmujące prowadzenie symulacji numerycznych procesu przepychania obrotowego za pomocą oprogramowania MSC.SuperForm2005 oraz Deform3D. Na etapie tym nieocenione okazały się doświadczenia zdobyte w trakcie prowadzenia symulacji numerycznych innych procesów, gdzie wykryły się pewne wady i zalety posiadanego oprogramowania.

Pomyślne rezultaty analiz teoretycznych nad technologią przepychania obrotowego pojedynczego stopnia wałków pełnych i drążonych wskazały, iż metoda ta umożliwi kształtowanie stopniowanych wyrobów osiowosymetrycznych pełnych i drążonych o zakładanym kształcie.

Szczególnie istotnym zagadnieniem, w przypadku kształtowania z wsadów drążonych, pozostaje ustalenie warunków powstawania równomiernych rozkładów grubości ścianek wyrobów w przekrojach wzdłużnych i poprzecznych. Równolegle prowadzone analizy teoretyczne przepychania wyrobów pełnych oraz ich odpowiedników drążonych pozwalają stwierdzić, że zastosowanie w procesie tych dwóch rodzajów wsadów wymaga także dwutorowości prowadzonych badań. Wiąże się to bezpośrednio z odmienną kinematyką płynięcia metalu oraz występowaniem, podanych w tekście, ograniczeń procesu.

Przedstawione w kolejnej części opracowania etapy powstawania prototypowego stanowiska do realizacji procesów przepychania obrotowego wskazują, w jaki sposób, pozyskaną wcześniej wiedzę teoretyczną, wykorzystano w projektowaniu stanowiska badawczego do kształtowania wyrobów pełnych i drążonych. Konstrukcja prototypowego agregatu do przepychania obrotowego PO-1 oraz PO-2 opiera się także w dużej mierze na doświadczeniach zdobytych w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej przy opracowaniu i wykonawstwie maszyn powstałych wcześniej tj. m.in. walcarek poprzeczno-klinowych i pras trójsuwakowych.

Przedstawione etapy modernizacji prototypowego stanowiska do realizacji procesów przepychania obrotowego wskazują, w jaki sposób, pozyskaną wcześniej wiedzę teoretyczną, wykorzystano w projektowaniu stanowiska badawczego do kształtowania wyrobów pełnych i drążonych. Konstrukcja prototypowego agregatu do przepychania obrotowego PO-2 opiera się także w dużej mierze na doświadczeniach zdobytych w Katedrze Komputerowego

Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej przy opracowaniu i wykonawstwie maszyn powstałych wcześniej tj. m.in. walcarek poprzeczno-klinowych i pras trójsuwakowych.

Odrębnym zagadnieniem jest opisana w tekście procedura certyfikacji agregatu o symbolu PO-2, któremu, w efekcie prowadzonych prac, nadano znak „CE” potwierdzający spełnienie wysokich wymagań bezpieczeństwa, zgodnie z aktami prawnymi obowiązującymi na terenie Unii Europejskiej.

Etap przejściowy w dostosowywaniu europejskich regulacji prawnych odnoszących się do maszyn najlepiej pokazuje fakt, iż rozpatrywana na początkowym etapie badań, dyrektywa 98/37/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, ujednolicająca kilka istniejących dyrektyw – 89/392EWG, 91/368/EEG oraz 93/44/EWG uległa zmianie. Nowa dyrektywa nr 2006/42/WE z dnia 17 maja 2006 r. weszła w życie z dniem 29 grudnia 2009 r. Na podstawie dyrektyw opracowywane są dalej normy zharmonizowane EN, które określają szczegółowe specyfikacje dla maszyn. Podane dalej, wybrane wyniki prób doświadczalnych nad nowym procesem kształtowania wskazują poprawność założeń przyjętych w przeprowadzonych obliczeniach numerycznych oraz w projektowaniu samej konstrukcji agregatu. Ujawniające się na tym etapie możliwości modyfikacji podzespołów roboczych celem udoskonalenia maszyny wykorzystano poprzez przekonstruowanie w zespole popychacza dodatkowej głowicy obrotowej. Rozwiązanie to zminimalizowało drgania tego układu, poprawiając jakość powierzchni uzyskiwanych wyrobów oraz przedłużając żywotność uszczelnień siłownika hydraulicznego.

Praktyczna realizacja prób z wykorzystaniem wsadów stalowych kształtowanych na gorąco pozwoliła na laboratoryjną weryfikację wyników obliczeń numerycznych. W zakresie wyrobów pełnych i drążonych uzyskano dobrą zbieżność rezultatów mierzoną kształtem uzyskiwanych wyrobów, odchyłkami kształtu oraz parametrami siłowymi procesu tj. siłą rozporową działającą na rolki robocze oraz siłą poosiową wywieraną przez popychacz na wsad wprowadzany do przestrzeni roboczej pomiędzy narzędziami obrotowymi.

W założeniach nowej metody kształtowania przyjęto zaprojektowanie technologii wykonawstwa wyrobów o średnicach zewnętrznych w zakresie od 30 do 100 mm przy długości całkowitej wsadu do 250 mm. Najdłuższe, zastosowane w badaniach doświadczalnych wsady posiadały długość 200 mm przy średnicy 60 mm. Maksymalne, mierzone średnice spęczanych kołnierzy wyrobów wynosiły do około 120 mm (przy redukcji średnicy wyrobu za rolkami do 40 mm). Niestety, przy tak silnym spęczaniu, dochodziło w tym wypadku do wyboczenia części wyrobu przed strefą roboczą pomiędzy rolkami.

Powiązanie prędkości liniowej popychacza z prędkością obrotową rolek roboczych pod postacią posuwu na obrót p [mm/obr.], pozwoliło na szybkie operowanie tym głównym, z punktu widzenia stabilności kształtowania, parametrem procesu.

Przedstawiony przypadek kształtowania wałka drażonego pokazuje praktyczne możliwości wykorzystania technologii przepychania obrotowego. Niestety stosowanie w tym przypadku sprawdzonych we wcześniejszych badaniach (teoretycznie i praktycznie) wartości posuwu skutkuje powstawaniem wyrobu o założonym kształcie, lecz znacznych naddatkach wymiarowych. Taki proces kształtowania plastycznego wydaje się być wtedy ekonomicznie nieuzasadniony oraz pozbawia wyrób jednej z podstawowych zalet odkuwki tj. ciągłości włókien materiału zapewniających doskonałe charakterystyki mechaniczne wyrobu gotowego. Stąd też w dalszych analizach numerycznych zdecydowano się na zastosowanie zmiennych wartości posuwu na obrót, co okazało się rozwiązaniem słusznym przynosząc znaczne zbliżenia kształtu wyrobu do planowanego do uzyskania zarysu modelu CAD.

Bieżąca konfiguracja agregatu PO-2 gwarantuje możliwości szybkiej zmiany wartości posuwu na obrót w trakcie trwania procesu, przez co przeprowadzenie badań weryfikacyjnych, dla zmieniających się prędkości kształtowania było realizowane i pozwoliło na ograniczenie odchyłek kształtu poprzez końcowy etap kalibrowania przy wyłączonym posuwie. Uzyskiwane w ten sposób wałki o średnicy np. 60 mm posiadały odchyłkę kształtu w postaci trójkątowania na poziomie 0,2 mm, co jest bardzo dobrym wynikiem. Wspomniane w rozdziałach opisujących próby doświadczalne pewne trudności z usuwaniem wyrobów gotowych z przestrzeni pomiędzy rollkami wskazują na konieczność udoskonalenia i tego etapu procesu.

Wprowadzenie, w miejsce ręcznego rozsuwania rolek narzędziowych na sworzniach mimośrodowych (po uprzednim wykręceniu śruby blokującej), pierścienia zębatego sprzęgającego mimośrodoży ruch rolek dało także możliwość łatwego usuwania wyrobu po procesie kształtowania. Zwiększenie dzięki temu uniwersalności stosowanego oprzyrządowania pozwala na dalsze obniżenie kosztów uruchomienia ewentualnej produkcji.

Uzyskanie satysfakcjonujących wyników badań doświadczalnych, jako etapu weryfikującego wcześniejsze analizy numeryczne, pozwala na opracowanie oferty wdrożeniowej dla tej innowacyjnej technologii.

Literatura

- [1] Amborn P., Frielingsdorf H., Ghosh S. K., Greulich K., *Modern side – shafts for passenger cars: manufacturing processes*, “Journal of Material Processing Technology” nr 48, 1995, s. 13 – 24
- [2] Amborn P., Frielingsdorf H., Ghosh S. K., Greulich K., *Modern side – shafts for passenger cars: manufacturing aspects*, “Journal of Material Processing Technology” nr 48, 1995, s. 3 – 12
- [3] Balin A. F., *Prokatka klinami*, „Kuznečno – Stampovočnoe Proizvodstvo” 1962, nr 6, s. 12 – 16
- [4] Bartnicki J., Pater Z., *The aspects of stability in cross – wedge rolling processes of hollowed shafts*, “Journal of Material Processing Technology” 155–156C (2004), s. 1867 – 1873
- [5] Bartnicki J., Pater Z., *Walcowanie poprzeczno – klinowego wyrobów drążonych*, Politechnika Lubelska 2005, s 1 – 160
- [6] Bartnicki J., *The influence of tool shape geometry on the rolling – extrusion process of full and hollowed parts*, “Proceedings of the 24th International Manufacturing Conference” str. 985 – 990, Irlandia
- [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. VIII, no 2 s. 5 – 11
- [8] Bartnicki J., Pater Z., Gontarz A., Kazanecki J., Samołyk G., *The research on rolling–extrusion process of full and hollowed parts*, “Steel Research International, Special edition: Metal Forming 2008”, vol. 1, 2008, s. 364 – 368
- [9] Bartnicki J., *The theoretical and experimental research of rolling– extrusion process*, Monografia, Wyd. PL, 2009, s 1 – 118
- [10] Bartnicki J., *Prototypowy agregat do przepychania obrotowego PO-1 – konstrukcja, certyfikacja oraz wyniki prób doświadczalnych*, „Przeprowadzone badania procesów plastycznego kształtowania w latach 2005–2007”, Monografia, Wyd. PL, 2008, s. 47 – 58
- [11] Bartnicki J., Pater Z., *The influence of tool geometry on the CWR process of hollowed shafts*, “STEEL–GRIPS Journal of Steel and Related Materials”, 2 (2004) Suppl. Metal Forming, s. 103 – 107
- [12] Bartnicki J., Pater Z., *Walcowanie poprzeczno – klinowe wyrobów drążonych*, „Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali”, red. W.S. Weroński, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s.67 – 86
- [13] Bartnicki J., *Owalizacja wałków drążonych w procesach walcowania poprzeczno – klinowego*, „Eksplatacja i Niezawodność” nr 2, (22) 2004, s. 5 – 8

- [14] Bartnicki J., *Analysis of rolling - extrusion process of hydrokinetic joint part*, "Steel Research International. Special edition" – 2012, s. 1407 – 1410
- [15] Bartnicki J., Pater Z., Tomczak J., *Numerical analysis of hollow shaft rolling - extrusion process with mandrel*, "MAPT 2013", International Conference on Materials Processing Technology, Thailand – 2013, s. 63 – 66
- [16] Bartnicki J., Tomczak J., Bulzak T., *Przepychanie obrotowe wyrobów o zarysie śrubowym*, „Rudy i Metale Nieżelazne” 2013, nr 11, str. 688 – 691
- [17] Bartnicki J., *FEM analysis of hollow hub forming in rolling extrusion process*, "Metalurgija" – 2014, nr 4, vol. 53, s. 641 – 644
- [18] Bartnicki J., Tomczak J., Pater Z., *Forming of semi - finished drill parts by means of rolling - extrusion*, "Hutnik – Wiadomości Hutnicze" – 2013, nr 1, s. 10 – 13
- [19] Bartnicki J., Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., *Innovative metal forming technologies*, "Journal of Machine Engineering" – 2014, nr 1, vol. 14, s. 5 – 17
- [20] 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
- [21] Bartnicki J., Tomczak J., Pater Z. *Urządzenie do przepychania obrotowego z regulowanym rozstawem osi* – patent nr 216258
- [22] Bartnicki J. *Sposób przepychania obrotowego z regulowanym rozstawem osi z tylną głowicą trójrolkową* BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO–2013, vol. 41, 10, s. 8 – 8
- [23] Bartnicki J., Tomczak J., Pater Z., *Sposób przepychania obrotowego z regulowanym rozstawem osi stopniowanych odkuwek osiowosymetrycznych* BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO – 2012, vol. 40, 24 (1015), s. 11 – 11
- [24] Belmont K. *Commercial wedge rolling in the United States*. Proceedings of 2nd International Conference on Rotary Metalworking Processes October 6th – 8th 1982, Stratford upon Avon UK, s. 385 – 397
- [25] Celikov A. I. *Poperečno – klinovaja prokatka v mašinostreni*, Wyd., Mašinostroenie, Moskva, 1982
- [26] Celikov A. I., *Elementy teorii poperečnoj prokatki i chłodnaja prokatka na trechvalkovykh stanach*, „Vestnik Mašinostroenija” 1961 nr 7, s. 49 – 54
- [27] Danno A., Tanaka T., *Characteristics of billet deformation in 3-roll wedge rolling of axisymmetric stepped shafts*, "Proceedings of 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes" 8–10 September 1984, Kyoto Japan 1984, s. 321 – 332
- [28] Danno A., Tanaka T., *Hot forming of stepped steel shafts by wedge rolling with three rolls*, "Journal of Mechanical Working Technology" 1984 no. 9, s. 21 – 35
- [29] Dong Y., Lovell M., Tagavi K., *Analysis of slip in cross – wedge rolling, an experimentally verified finite – element model*. "Journal of Materials Processing Technology" 1998 vol. 80 – 81, s. 273 – 281
- [30] GKN Car–Data Base 2010

- [31] Erbel J., *Encyklopedia technik wytwarzania stosowanych w przemyśle maszynowym, t. I*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001
- [32] Glaß R., Hahn F., Kolbe M., Meyer L. W., *Process of partial bulk metal-forming – aspects of technology and FEM simulation*, “Journal of Materials Processing Technology” 1998 vol. 80–81, s. 174 – 178
- [33] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W., *Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów szynowych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003
- [34] Grigorev A. K. i in., *Izmenene toščiny stenki pri poperečno-klinovoj prokatke polych zagotovok.*” *Izv. VUZ Černaja Metalurgija*” 1975 nr 7, s. 99 – 102
- [35] Guifu L., Guolu Z., Changwu G. *The study of the technological parameters and the load and power parameters on 3-roll cross wedge rolling.* “Proceedings of 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes” 8 – 10 September 1984, Kyoto Japan 1984, s. 333 – 343
- [36] Hayama M. *Optimum working conditions in the cross rolling of stepped shaft*, “Journal of Mechanical Working Technology” 1979 nr 3, s. 31 – 46
- [37] Katalog Ohio–State University 2009
- [38] Jezierski J., *Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn*, WNT Warszawa 1994
- [39] Kazanecki J., *Wytwarzanie rur bez szwu*, Wyd. AGH, Kraków 2003
- [40] Kettner P., Schmieder F., *Manufacturing of hollow transmission shafts via bulk – metal forging*, “Journal of Material Processing Technology” nr 71, 1997, s. 113 – 118
- [41] Lange K., *Modern metal forming technology for industrial production*, “Journal of Material Processing Technology” nr 71, 1997, s. 2 – 13
- [42] Lazorkin V., *Technology for manufacturing hollow product of solid blanks by radial forging without piercing*,
- [43] Łuksza J., *Elementy cięgarstwa*, Wyd. AGH, Kraków 2001
- [44] Magda J., *Poprzeczne walcowanie klinowe*, „*Obróbka Plastyczna*” 1981, z. 4, s. 179 – 189
- [45] Neugebauer R., Kolbe M., Glaß R., Hoffmann M., *Optimisation of processing routes for cross rolling and spin extrusion*, *Journal of Materials Processing Technology* 2002 vol. 125 – 126, s. 856 – 862
- [46] Neugebauer R., Kolbe M., Glaß R., *New warm forming processes to produce hollow shafts*, “Journal of Materials Processing Technology” 2001 vol. 119, s. 277 – 282
- [47] Park Ch., Lim J., Hwang B., *A process-sequence design of an axle-housing by cold extrusion using thick-walled pipe.* “Journal of Materials Processing Technology”, 1998, 75, s. 33 – 44,
- [48] Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001

- [49] Pater Z., Bartnicki J., Gontarz A., Weroński W., *Numerical Modeling of Cross – Wedge Rolling of Hollowed Shafts*. “Proceedings of the 8 International Conference on Numerical Method in Industrial Forming Processes – Numiform 2004”, Ohio, 13–17.06.2004, s. 672 – 678
- [50] Pater Z., Gontarz A., Weroński W., *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno – klinowego*, Wyd. LTN, Lublin 2001
- [51] Pater Z., Weroński W., Kazanecki J., Gontarz. A., *Study of the process stability of cross – wedge rolling*, “Journal of Material Processing Technology” 92 – 93, 1999, s. 458 – 462
- [52] Pater Z., *Analiza porównawcza schematów walcowania klinowo – rolkowego*, „Obróbka Plastyczna Metali”, nr 5, 2004, s. 13 – 24
- [53] Pater Z., *Obrotowe obciskanie pręta trzema walcami*. „Obróbka Plastyczna Metali” 2001 nr 1, s. 11 – 20
- [54] Pater Z., *Ołów jako materiał modelowy do symulacji procesów obróbki plastycznej na gorąco*, „Obróbka Plastyczna Metali”, 2003 nr 4, s. 41 – 48
- [55] Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M. R., Menezes P. L. *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
- [56] Samołyk G., Bartnicki J., *Komputerowe wspomaganie szacowania sił dla procesu przepychania obrotowego*, „Przeprowadzone badania procesów plastycznego kształtowania w latach 2005–2007”, Monografia, Wyd. PL, 2008, s. 59 – 72
- [57] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J. *Analiza numeryczna procesu walcowania wałków drążonych z uzębieniami*, „Hutnik – Wiadomości hutnicze”, 2011, nr 8, vol. 0, s. 678 – 681
- [58] Tomczak J., Bartnicki J., *Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej*, Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2012, s. 1 – 217.
- [59] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J., Chyła P., Kazanecki J. *Wpływ metody kalibrowania wykrojów śrubowych na jakość kul walcowanych w walcarkach skośnych*, „Przegląd Mechaniczny” – 2012, nr 11, s. 33 – 39
- [60] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J. *Urządzenie do walcowania poprzecznego, trójwalcowego odkuwek z regulowanym rozstawem osi*, „BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO”, 2012, vol. 40, 22 (1013), s. 10 – 10
- [61] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J. *Urządzenie do walcowania uzębień kół stożkowych*, „BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO”, 2012, vol. 40, 21 (1012), s. 13 – 13
- [62] Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J. *Sposób walcowania uzębień stożkowych kół zębatach*, „BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO”, 2012, vol. 40, 20 (1011), s. 8 – 8
- [63] Tomczak J., Bartnicki J. *Sposób walcowania poprzecznego rowków śrubowych, zwłaszcza wiertel*, „BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO”, 2012, vol. 40, 20 (1011), s. 7 – 8

- [64] Wasiuńyk P., *Teoria procesów kucia i prasowania*. WNT Warszawa 1991,
- [65] Weroński W., Pater Z., *Podstawy procesu walcowania poprzeczno – klinowego*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996
- [66] Weroński W., Pater Z., *Selection of geometric parameters of transverse wedge rolling tools*. “Journal of Materials Processing Technology” 1994 vol. 39 nr 1, s. 87 – 98
- [67] *Forging [online]*, strona American GFM Corporation, [dostęp wrzesień 2010]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.agfm.com>
- [68] *Portal poświęcony technice samochodowej [online]* [dostęp październik 2011] Dostępny w World Wide Web: <http://autokult.pl/kategoria/mechanika/uklady-napedowe>
- [69] *Witryna internetowa AZOM*, [dostęp grudzień 2009] Dostępna w World Wide Web: <http://www.azom.com>
- [70] Materiały reklamowe firmy Beltechnologia & M, 2012
- [71] *Witryna internetowa Metaltechnik Menges*, [dostęp grudzień 2009] Dostępna w World Wide Web: <http://www.metaltechnik-menges.de>
- [72] *Witryna internetowa China Chongfa*, [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.china-chongfa.com>
- [73] *Witryna internetowa Firearmsid*, [dostęp grudzień 2009] Dostępna w World Wide Web: <http://www.firearmsid.com>
- [74] *Witryna internetowa [online] Salzgitter Mannesmann Stainles Tubes GmbH*, [dostęp styczeń 2013] Dostępna w World Wide Web: <http://www.smst-tubes.com/contacts-und-media/downloads/downloads.html>
- [75] *Witryna internetowa University of Michigan* [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.engin.umd.umich.edu>
- [76] *Witryna internetowa [online] Airbus Helicopters* [dostęp wrzesień 2010] Dostępna w World Wide Web: <http://www.airbushelicopters.com/site/en/ref/home.html>, dawniej: <http://www.eurocopter.de>
- [77] *Witryna internetowa FBMFG*, [dostęp grudzień 2010] Dostępna w World Wide Web: <http://www.fbmfg.thomasregister.com>
- [78] *Witryna internetowa HMP*, [dostęp grudzień 2010] Dostępna w World Wide Web: <http://www.hmp.com>
- [79] *Witryna internetowa 4 turbo* [dostęp luty 2012] Dostępna w World Wide Web: <http://www.4turbo.pl>
- [80] *Witryna internetowa Autogen*, [dostęp luty 2012] Dostępna w World Wide Web: <http://www.autgen.pl>
- [81] *Witryna internetowa Autodamis*, [dostęp luty 2012] Dostępna w World Wide Web: <http://www.autodamis.pl>
- [82] *Witryna internetowa Auto-France*, [dostęp luty 2012] Dostępna w World Wide Web: <http://www.auto-france.pl>
- [83] *Witryna internetowa Mototechnika*, [dostęp luty 2012] Dostępna w World Wide

- Web: <http://www.mototechnika.republika.pl>
- [84] *Witryna internetowa NSC Trucks*, [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.nsctruck.pl>
- [85] Materiały reklamowe firmy Smeral, 2010
- [86] Materiały reklamowe Snecma, 2009
- [87] *Witryna internetowa Tedrive*, [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.tedrive.pl>
- [88] *Witryna internetowa Vamapo*, [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.vamapo.pl>
- [89] Materiały reklamowe Huty Stalowa Wola, 2008
- [90] *Witryna internetowa Rohrwerk-Maxhuetten*, [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.rohrwerk-maxhuetten.de>
- [91] *Witryna internetowa Indiamart*, [dostęp grudzień 2011] Dostępna w World Wide Web: <http://www.indiamart.com>
- [92] Materiały reklamowe Technonova Co. Ltd., 2012
- [93] Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J., *Odkształcenie i pękanie metali*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999
- [94] Yohei A., Ichiro Mori K., Takuji M., Fujio O., *Improvement of roughness of inner surface in multi stage deep drawn stainless steel cups by inner ironing*, "STEEL-GRIPS Journal Steel and Related Materials" 2 (2004) Suppl. Metal Forming, s. 245 – 250

Dodatek

Ocena ryzyka maszyny:

Agregat do przepychania obrotowego typ PO-2

Producent : Politechnika Lubelska
Katedra Komputerowego Modelowania
i Technologii Obróbki Plastycznej
ul. Nadbystrzycka 38D
20-618 LUBLIN

Lublin 2013

1. Identyfikacja zagrożeń

Identyfikację zagrożeń dotyczących maszyny: Agregat do przepychania obrotowego typ PO-2, które mogą wystąpić podczas użytkowania przedstawiono tabelarycznie (tabela 1).

Ocenę ryzyka przeprowadzono wg wytycznych normy PN-EN 1050:1999 „Maszyny. Bezpieczeństwo. Zasady oceny ryzyka” oraz dyrektywy 2006/42/WE „Maszyny”.

1. Wyszczególnienie ograniczeń dotyczących agregatu

1.1. Zakres użytkowania

Agregat przeznaczony jest do przepychania siłownikiem pomiędzy trzema obrotowymi rolkami próbek stalowych podgrzanych do temperatury plastyczności oraz próbek ołowianych.

1.2. Użytkowanie agregatu

Agregat został zaprojektowany z przeznaczeniem do użytkowania zgodnie z jego przeznaczeniem. Wszelkie inne użycie może zagrozić zdrowiu i bezpieczeństwem użytkownika.

Do oszacowania zagrożeń zastosowano normy:

PN-EN ISO 12100-1:2005	Maszyny. Bezpieczeństwo. Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania. Część 1: Podstawowa terminologia, metodologia.
PN-EN ISO 12100-2:2005	Maszyny. Bezpieczeństwo. Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania. Część 2: Zasady techniczne.
PN-EN 60204-1:2001	Bezpieczeństwo maszyn. Wyposażenie elektryczne maszyn. Wymagania ogólne.
PN-84/N-01307	Hałas. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące przeprowadzenia pomiarów.
PN-EN 61310-1:2000	Bezpieczeństwo maszyn. Wskazywanie, oznaczanie i sterowanie. Wymagania dotyczące sygnałów wizualnych, akustycznych i dotykowych.
PN-EN 294:1994	Bezpieczeństwo maszyn. Odległości bezpieczeństwa uniemożliwiające sięganie kończynami górnymi do stref niebezpiecznych.

PN-EN-982:1998

Bezpieczeństwo maszyn. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa układów hydraulicznych i pneumatycznych i ich elementów. Hydraulika.

2. Oszacowanie ryzyka

W oszacowaniu ryzyka zastosowano stopnie oceny:

1. Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia:

- „przed” – przed zastosowaniem środków zmniejszających ryzyko
- „po” – po zastosowaniu środków zmniejszających ryzyko

2. Stopnia zagrożenia

W ocenie wartości „Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia” przyjęto stopnie oceny od 1 do 5.

Za wartość progową uznano stopień oceny 1, dla którego przyjęto, że wystąpienie zagrożenia jest znikome, a maszyna jest ze względu na rozwiązania konstrukcyjne bezpieczna sama w sobie lub po zastosowaniu środków zmniejszających ryzyko.

Wyznaczenie dopuszczalności „Stopnia zagrożenia” ryzyka oraz zalecenia dotyczące działań wynikających z oceny tego ryzyka przeprowadzono według PN-N-18002:2000 i podano w tabeli 1. Przyjęto stopnie oceny od 1 do 5.

3. Ocena ryzyka

Osiągnięcie zmniejszenia ryzyka zawodowego przeprowadzono poprzez zastosowanie:

- rozwiązań technicznych urządzeń ochronnych,
- uzupełniających środków ochronnych (osłony)
- środków ochrony indywidualnej,
- zmniejszenie ryzyka za pomocą informacji dla użytkownika.

Zgodnie z PN-EN ISO 12100-1:2005 odpowiednie zmniejszenie ryzyka może być uważane za osiągnięte, jeżeli odpowiedź na każde z następujących pytań będzie pozytywna:

- czy uwzględniono wszystkie rodzaje pracy i wszystkie sposoby ingerencji? – *uwzględniono*,

Tabela Nr 1 Oceny ryzyka wg normy PN-N-18002:2000

Zagrożenie	Nr	Niezbędne działania
Bardzo małe	1	Nie jest konieczne prowadzenie żadnych działań
Małe	2	Zaleca się rozważenie możliwości zmniejszenie poziomu ryzyka lub zapewnienie, że ryzyko pozostaje najwyżej na tym samym poziomie
Średnie	3	Podjęcie działań, których celem jest zmniejszenie ryzyka
Duże	4	Zastosowanie środków ochronnych. Praca nie może być rozpoczęta do czasu zmniejszenia ryzyka do poziomu dopuszczalnego
Bardzo duże	5	Praca nie może być rozpoczęta ani kontynuowana do czasu zmniejszenia ryzyka do poziomu dopuszczalnego

- czy eliminacja zagrożeń lub zmniejszenie ryzyka za pomocą środków ochronnych została zastosowana? – *została zastosowana*
- czy zagrożenia zostały wyeliminowane lub stwarzane przez nie ryzyko zostało ograniczone do najniższego praktycznie możliwego poziomu? – *zagrożenia zostały ograniczone do najniższego poziomu,*
- czy upewniono się, że zastosowane środki nie stworzyły nowych zagrożeń? – *upewniono się, że zastosowane środki nie stworzyły nowych zagrożeń,*
- czy użytkownicy zostali dostatecznie poinformowani i ostrzeżeni o ryzyku resztkowym? – *zostali poinformowani,*
- czy upewniono się, że warunki pracy operatorów nie zostały zagrożone zastosowanymi środkami ochronnymi? – *upewniono się,*
- czy zastosowane środki ochronne są ze sobą zgodne? – *są ze sobą zgodne,*

- czy uwzględniono dostatecznie skutki, jakie mogą wyniknąć z zastosowania maszyny zaprojektowanej na użytek profesjonalny/ przemysłowy w dziedzinie nieprofesjonalnej/ nieprzemysłowej – *uwzględniono*,
- czy upewniono się, że zastosowane środki nie ograniczyły nadmiernie zdolności do spełniania jej funkcji? – *upewniono się*.

WNIOSEK

Proces iteracyjnego zmniejszenia ryzyka może być zakończony.

UWAGA:

Przy ocenie ryzyka uwzględniono ograniczenia i zagrożenia dotyczące maszyny:

Agregatu do przepychania obrotowego typ PO-2

