

Jarosław Bartnicki, Zbigniew Pater

**Walcowanie poprzeczno – klinowe  
wyrobów drążonych**

Lublin 2005

*Opiniodawca*

prof. dr hab. inż. Jan Kazanecki, Akademia Górniczo-Hutnicza

© Copyright by:

Politechnika Lubelska, Lublin 2005.

Wszelkie prawa zastrzeżone.

Przedruk lub reprodukcja w jakiegokolwiek postaci całości bądź części książki bez pisemnej zgody wydawcy są zabronione.

**ISBN 83-89246-69-4**

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
ul. Bernardyńska 13  
20-950 Lublin  
E-mail: [wydawnictwo@pollub.pl](mailto:wydawnictwo@pollub.pl)

## SPIS TREŚCI

<b>Streszczenie .....</b>	<b>5</b>
<b>Summary.....</b>	<b>7</b>
<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Wstęp.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Elementy drążone i ich zastosowania.....</b>	<b>15</b>
2.1. Wyroby drążone w budowie maszyn.....	18
2.1.1. Porównanie charakterystyk mechanicznych wyrobów drążonych w stosunku do wyrobów tradycyjnych, pełnych..	23
2.2. Przegląd metod wytwarzania wałków drążonych.....	25
2.2.1. Metody wytwarzania.....	25
2.2.2. Zagadnienia jakości wyrobów i stosowane tolerancje wytwórcze .....	38
<b>3. Przegląd literatury w zakresie WPK.....</b>	<b>41</b>
3.1. Dobór kątów narzędzi klinowych .....	50
3.2. Dotychczasowy stan wiedzy na temat WPK wyrobów drążonych.....	52
3.3. Podsumowanie przeglądu literatury.....	55
<b>4. Modelowanie numeryczne WPK wyrobów drążonych .....</b>	<b>59</b>
4.3. Zastosowana metoda obliczeń .....	59
4.4. Zakres obliczeń .....	61
4.5. Model materiałowy .....	63
4.6. Model tarcia .....	64
4.7. Przykładowe wyniki obliczeń.....	66

---

<b>5. Badania doświadczalne .....</b>	<b>71</b>
5.3. Stanowisko badawcze .....	71
5.4. Przygotowanie próbek do badań.....	73
5.5. Zakres badań doświadczalnych .....	76
5.6. Przykładowe wyniki .....	79
<b>6. Analiza wyników uzyskanych dla procesu WPK klinami płaskimi .83</b>	
6.1. Zmiana grubości ścianki .....	83
6.2. Owalizacja przekroju poprzecznego .....	94
6.3. Parametry siłowe.....	97
6.4. Stan odkształcenia.....	102
6.5. Zastosowanie wewnętrznego trzpienia swobodnego .....	105
6.6. Ograniczenia stabilności przebiegu kształtowania .....	107
6.7. Podsumowanie wyników badań.....	113
<b>7. Analiza procesu WPK wałków drążonych trzema narzędziami ....117</b>	
7.1. Walcowanie trzema wałkami klinowymi.....	117
7.2. Walcowanie klinowo-rolkowe .....	127
<b>8. Badania procesu WPK z wsadu drążonego, realizowane w warunkach przemysłowych.....131</b>	
<b>9. Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>147</b>
<b>10. Literatura .....</b>	<b>151</b>

Jarosław Bartnicki, Zbigniew Pater

## **WALCOWANIE POPRZECZNO – KLINOWE WYROBÓW DRAŻONYCH**

### **Streszczenie**

W książce przedstawiono zarys technologii wytwarzania wyrobów drażonych wraz z obszarem ich zastosowań. Za głównych odbiorców elementów mechanicznych tego typu uznano przemysł motoryzacyjny, lotniczy i maszynowy. Zaproponowano wykonawstwo wyrobów drażonych metodą walcowania poprzeczno – klinowego (WPK) i przeprowadzono szereg prac badawczych dotyczących tego procesu. W ramach tych prac wykonano analizy numeryczne WPK wyrobów drażonych mające na celu ustalenie wpływu poszczególnych parametrów procesu na jego przebieg, siły kształtowania i uzyskiwane dokładności wymiarowe. Ze względu na skomplikowany charakter kształtowania obliczenia numeryczne prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D). Na podstawie obliczeń wyznaczono obszary stabilności procesu WPK wyrobów drażonych oraz ustalono rodzaje zakłóceń zaburzających tę stabilność. Ponadto, w zależności od zastosowanych wsadów, analizowano parametry siłowe, rozkłady odkształceń, grubości ścianek i wielkości owalizacji w wyrobach walcowanych. Weryfikacji opracowanych modeli numerycznych procesu WPK wyrobów drażonych dokonywano doświadczalnie, stosując walcarkę płasko-klinową, w której walcowano wałki drażone z materiałów modelowych (ołów, aluminium). W trakcie walcowania rejestrowano podstawowe parametry siłowe. Dobra zgodność wyników obliczeniowych z doświadczalnymi potwierdziła słuszność przyjętych założeń. Pomyślnie zweryfikowany model numeryczny posłużył do dalszych analiz dotyczących procesu walcowania wyrobów drażonych trzema walcami klinowymi oraz nową metodą walcowania klinowo – rolkowego. Dla procesów WPK dwoma klinami pł-

skimi i trzema walcami zaproponowano zależności (wiążące parametry kątowe narzędzi), których spełnienia wymaga się dla zapewnienia stabilnego przebiegu kształtowania. Opierając się na zdobytych doświadczeniach przeprowadzono próby przemysłowe WPK korpusów noży obrotowych z wsadów drążonych oraz wykonano symulacje numeryczne tych procesów. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na zaprojektowanie narzędzi, których kształt (sprawdzony w obliczeniach numerycznych) zapewnia osiągnięcie, zakładanego przez producenta, poziomu jakości wyrobów uzyskiwanego w obecnie stosowanej technologii wytwarzania.

Jarosław Bartnicki, Zbigniew Pater

## **THE CROSS-WEDGE ROLLING PROCESS OF HOLLOWED PARTS**

### **Abstract**

In this book the issues concerning the technology of hollowed parts manufacturing and the area of their implementation are presented. The main buyers of these mechanical elements include automotive, aircraft and engineering industries. The manufacturing of hollowed parts by means of the cross - wedge rolling (CWR) method was proposed and numerous experimental research of this process were made. The research included numerical analysis CWR of hollowed parts which aimed at determining the influence of the process parameters on the process course, forming forces and the obtained dimensional accuracy. Due to the complex character of forming numerical calculations were made in the 3D state of strain conditions. On the basis of calculations, the areas of stability of the CWR process of hollowed parts were determined and type of disturbance of this stability was defined. Moreover, depending on the used charge, force parameters, strain distributions, wall thickness and size of ovalization in the rolled parts were analyzed. Verification of the worked out numerical models of the CWR process of hollowed parts was done experimentally, using the flat wedge rolling mill, in which hollowed shafts were rolled from model materials (lead, aluminum). During the rolling the basic force parameters were noticed. Good conformity of experimental and calculated results confirmed the rightness of the assumptions. The successfully verified numerical model was used in the further numerical research on the rolling process of hollowed parts with three wedge rolls and on a new wedge-rolls rolling method. For the CWR processes with two flat wedges and three rolls dependence was proposed (binding angle parameters of tools), which needs the stability of the forming

process. On the basis of the experiments, industrial tests of CWR of rotary knives bodies from hollowed charge and the numerical simulations of these processes were made. The analysis of the obtained results allowed for designing tools, which shape (confirmed in the numerical calculations) provides possibility of achieving assumed by the manufacturer level of quality of products obtained in the present manufacturing technologies.



## WYKAZ OZNACZEŃ

$D$  – średnica zewnętrzna wsadu

$D_d$  – średnica zewnętrzna wyrobu drażonego

$D_p$  – średnica zewnętrzna wyrobu pełnego

$E$  – moduł Young'a

$J$  – moment bezwładności przekroju

$M_s$  – moment skręcający

$R_w$  – promień walca

$S_d$  – pole przekroju wyrobu drażonego

$S_p$  – pole przekroju wyrobu pełnego

$W_o$  – wskaźnik wytrzymałościowy przekroju

$a_p$  – współczynnik o kilka rzędów mniejszy niż prędkość poślizgu

$d_n$  – średnica walcowanego przewężenia (średnica nominalna)

$d_s$  – średnica spiętrzenia

$d_t$  – średnica trzpienia wewnętrznego

$d_w$  – średnica wewnętrzna wsadu

$g_e$  – grubość ścianki zmierzona

$g_o$  – grubość ścianki wsadu

$g_t$  – grubość ścianki obliczona MES

$k$  – granica plastyczności materiału przy czystym ścinaniu

$l$  – długość walcowania (długość kształtowanego przewężenia –  $2l$ )

$l_{kal}$  – długość strefy kalibrującej narzędzia

$l_{klina}$  – długość klina

$m$  – czynnik tarcia

$r$  – promień walcowanego stopnia odkuwki

$t$  – czas

$v_p$  – prędkość poślizgu

$\Delta$  – parametr owalizacji

$\Delta_g$  – względna różnica między obliczonymi i zmierzonymi wartościami grubości ścianek

$\alpha$  – kąt pochylenia bocznych ścian klina (kąt kształtujący)

$\beta$  – kąt rozwarcia klina

$\delta$  – stopień gniotu ( $\delta = D/d_n$ )

$\varepsilon$  – odkształcenie

$\dot{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia

$\xi$  – współczynnik wzrostu średnicy

$\mu$  – współczynnik tarcia

$\nu$  – współczynnik Poisson’a

$\rho$  – gęstość

$\sigma_p$  – naprężenie uplastyczniające

$\tau$  – naprężenie styczne

## 1. WSTĘP

Globalna produkcja przemysłowa rośnie z roku na rok. Obok najszybciej rozwijającego się sektora elektronicznego, coraz większy nacisk kładzie się na rozwój rozwiązań mechanicznych i związanych z nimi nowoczesnych technik wytwarzania. Prostą metodą przyczyniającą się do pomniejszenia masy konstrukcji jest zastosowanie elementów drążonych w miejsce tradycyjnie wykorzystywanych pełnych wałów, osi i belek. Zmiana ta, dokonana przy zachowaniu niezbędnej sztywności pozwala na poszerzenie zakresów pracy danych zespołów czy konstrukcji. Rozwiązania tego typu spotykamy na co dzień w wielu dziedzinach najnowszej techniki. Najbardziej widoczne z nich, to wszelkiego rodzaju budowlane konstrukcje nośne stanowiące podstawę wielu otaczających nas budynków. Mniej zauważalne dla osób niezorientowanych w tematyce są zastosowania elementów drążonych w budowie maszyn. Podobne, na pierwszy rzut oka, do części pełnych elementy drążone pojawiają się coraz częściej w projektach prostych elementów mechanicznych takich jak stopniowane wałki i osie. Te wystudiowane rozwiązania stanowią niekiedy efekt bardzo złożonych badań uwzględniających bardzo wiele czynników mających wpływ na ich codzienną eksploatację. W efekcie, drążone odpowiedniki elementów pełnych zdobywają coraz to szersze obszary zastosowań.

Powszechniejsze wdrożenie nowoczesnych technik kształtowania otwiera przed elementami drążonymi nowe zastosowania, niedostępne do tej pory z przyczyn technologicznych. Elementy te zdobywają rynki motoryzacyjne, lotnicze i maszynowe [100, 102 – 104]. Podnoszenie standardów jakości wyrobów naturalnie faworyzuje technologie wytwórcze związane z obróbką plastyczną. Jednym z niezaprzeczalnych atutów tych technik wytwarzania jest bardzo wysoka powtarzalność produkowanych elementów. Obróbka plastyczna, jako technologia stosowana raczej w produkcji wielko-

seryjnej i masowej, zajmuje tutaj bardzo ważne miejsce. W dziedzinie tej wciąż trwają poszukiwania kompromisów pomiędzy doskonalszymi materiałami, innowacjami w zakresie konstrukcji i technologii oraz pogonią za coraz wyższymi standardami jakościowymi. Nie bez znaczenia jest również fakt wykorzystywania wirtualnego prototypowania, dającego bardzo szeroki wachlarz możliwości analitycznych. Zastosowanie tej techniki w warunkach przemysłowych pozwala na bardzo duże oszczędności zarówno czasu jak i nakładów finansowych niezbędnych do wykonania wielu prób rzeczywistych, będących podstawą tradycyjnego projektowania nowych technologii.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwość wykorzystania jednej z nowoczesnych technologii obróbki plastycznej tj. walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) do kształtowania wyrobów drążonych. W efekcie rozszerzono dotychczasowe spektrum zastosowań tej technologii o wytwarzanie części drążonych typu stopniowanych wałków i osi.

W pracach badawczych wykorzystano przede wszystkim nowoczesne metody modelowania numerycznego, bazującego na metodzie elementów skończonych. Opracowane modele teoretyczne procesu WPK wyrobów drążonych weryfikowano w licznych testach, prowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Na podstawie wykonanych obliczeń oraz prób eksperymentalnych dokonano oceny możliwości technologicznych WPK w przypadku kształtowania wyrobów drążonych. W pracy podano również przykład przemysłowego zastosowania technologii WPK do walcowania drążonych korpusów noży obrotowych. Projektując narzędzia dla tego procesu bazowano na wiedzy uzyskanej z wykonanych uprzednio prac badawczych.

Obiecujące rezultaty prac zarówno numerycznych, jak i eksperymentalnych, wskazują na celowość kontynuowania badań w zakresie przedstawianej problematyki. Złożoność zagadnienia wymaga wciąż prowadzenia dalszych prac celem ustalenia dalszych związków i zależności rządzących przebiegiem procesu WPK wyrobów drążonych. Prowadzone są w tym zakresie dalsze, intensywne badania.

Monografia wraz z innymi opracowaniami autorów [5-11, 62-79] stanowi kompendium wiedzy na temat technologii WPK wyrobów drążonych. Adresatami tej pracy, obok pracowników instytucji naukowo badawczych

zajmujących się obróbką plastyczną oraz przedstawicieli przemysłu, mogą być również studenci wyższych lat studiów technicznych zajmujących się technologią obróbki metali.

Na zakończenie wyrażamy podziękowanie wszystkim osobom i instytucjom mającym wpływ na ostateczny kształt opracowania. Wykonanie tak szerokiego zakresu badań eksperymentalnych nie było by możliwe bez środków finansowych przyznanych przez Komitet Badań Naukowych w ramach Promotorskiego Projektu Badawczego nr 3T08B 031 26. Za cenne uwagi i spostrzeżenia wniesione do opracowania jesteśmy wdzięczni Recenzentowi pracy w osobie prof. dr hab. inż. Jana Kazaneckiego. Werońskiego. Wdzięczni jesteśmy także firmie „SIMPTEST – Lublin” za współudział w przygotowaniu stanowiska badawczego i narzędzi. Osobne podziękowania kierujemy także do pracowników Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, którzy wzięli udział w prowadzonych pracach badawczych.

*Autorzy*

## 2. ELEMENTY DRAŻONE I ICH ZASTOSOWANIA

Ciągłe obniżanie masy konstrukcji stanowi w ostatnich latach jeden z głównych priorytetów produkcyjnych w różnych dziedzinach przemysłu. W konsekwencji drażone odpowiedniki elementów pełnych, zdobywają coraz to szersze obszary zastosowań.

Na rys. 2.1 przedstawiono podstawowe dziedziny techniki, w których wykorzystywane są części tego rodzaju. W budownictwie lądowym odpo-



*Rys. 2.1. Obszary zastosowań przemysłowych elementów drażonych [102]*

wiednie zastosowanie profili rurowych pozwala na zaakcentowanie architektury i wyeksponowanie piękna fasad budynków. W różnego rodzaju wymiennikach ciepła, czy w energetyce, profile drążone, o skomplikowanej, często żebrowanej budowie, pozwalają na znaczne zwiększenie efektywnej powierzchni roboczej tych elementów. Odpowiednia sztywność tego typu konstrukcji pozwala stosować je jako np. dachowe panele słoneczne, które przy zachowaniu dużej lekkości mogą być łączone w dowolnie długie pakiety. W przemyśle wydobywczym i górnictwym profile tego typu sprawdzają się jako bardzo sztywne i odporne na długotrwałe obciążenia przewodnice głowic roboczych, spełniając równoległe rolę rurociągów i konstrukcji nośnych. W budowie maszyn i konstrukcji stalowych, gdzie występują naprężenia i obciążenia skręcające oraz wieloosiowe momenty gnące, bardzo istotne są korzyści statyczne wynikające z zastosowania tego typu elementów. Na ogół profile te spawane są ze sobą, co pozwala na wyeliminowanie stosowania dość pracochłonnych łączników węzłowych i usztywnień.

Szerokie zainteresowanie wielu dziedzin techniki tego typu wyrobami znalazło odzwierciedlenie m.in. w powstaniu Międzynarodowego Komitetu dla Badań i Rozwoju Konstrukcji z Profili Rurowych – CIDECT (*Comité International pour le Développement et L'Etude de la Construction Tubulaire*) [101]. Organizacja ta zrzesza światowych producentów wyrobów rurowych oraz wyznacza nowe kierunki rozwoju technik wytwarzania i obszarów wdrożeń z nimi związanych. Przykłady zastosowania tego typu elementów w inżynierii budowlanej pokazano na rys. 2.2.



**Rys. 2.2.** Elementy drążone stosowane w konstrukcjach budowlanych [114]



*Rys. 2.3. Przykłady zastosowań elementów drążonych w konstrukcjach morskich platform wydobywczych, dźwigów i masztów [114]*

Wysoką sztywność konstrukcji rurowych wykorzystuje się w budowie m. in. platform wiertniczych, dźwigów, masztów itp. (rys. 2.3). Dodatkowe możliwości optymalizacji tego typu rozwiązań stwarza stosowanie elementów o zmiennym przekroju i to zarówno w zakresie zmian średnicy zewnętrznej, jak i grubości ścianki stosowanych wyrobów. Bardzo bogaty wybór oferowanych, standardowo i w drodze zamówienia, profili pozwala na skuteczną realizację bardzo szerokiego zakresu konstrukcji, wypierając tak powszechne dotychczas pręty, belki i kształtowniki. Zestawienie porównawcze tak popularnego przekroju jakim jest dwuteownik z profilem rurowym pozwala na wykazanie dodatkowych zalet tego ostatniego. Składa się na nie mniejsza i łatwiejsza do równomiernego pokrycia powierzchnia malarska oraz nieporównywalnie niższa wrażliwość na podmuchy wiatru, czy prądy wodne.

W konstrukcji maszyn i urządzeń, elementy wykonane z profili rurowych, oprócz braku ostrych krawędzi (zmniejszenie skutków przypadkowych urazów), pozwalają również na łatwiejsze utrzymanie czystości i przeprowadzanie zabiegów konserwacyjnych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku stanowisk roboczych mających kontakt z produktami spożywczymi i ich półproduktami.

Tak silny rozwój konstrukcji rurowych znalazł również swoje odzwierciedlenie w systemach komputerowych wspomagających prace projektowe. Powstało wiele programów specjalistycznych i nakładek do popularnych programów projektowych i symulacyjnych, dedykowanych wyłącznie do modelowania konstrukcji rurowych. Jeden z wiodących producentów profili

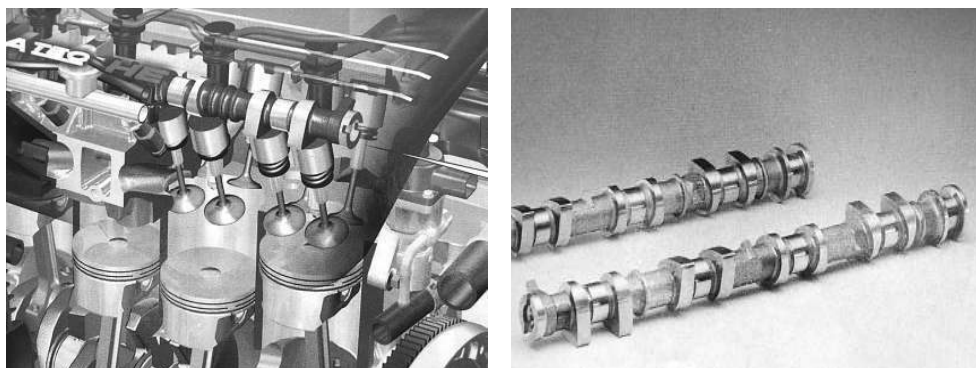


rurowych jakim jest Vallourec & Mannesmann Tubes udostępnia nawet nieodpłatnie, na swoich stronach internetowych [114], specjalistyczny pakiet oprogramowania „MSH - Stacom” służący do właściwego doboru profili spełniających zakładane wymagania konstrukcyjne i technologiczne.

Powszechniejsze wdrożenie nowoczesnych technik kształtowania otwiera przed elementami drążonymi nowe zastosowania, niedostępne do tej pory z przyczyn technologicznych. Elementy te zdobywają rynki motoryzacyjne, lotnicze i maszynowe [100, 102 – 104]. Znaczący postęp w dziedzinie kształtowania metali pozwala na wykorzystanie tego typu elementów, jako części maszyn i urządzeń. Technologiczny wyścig pomiędzy producentami samochodów i samolotów, napędzany stale rosnącym na nie popytem, pozwala oczekiwać na wciąż nowe rozwiązania przyczyniające się do poprawy ich własności użytkowych i warunków eksploatacyjnych. Obniżenie masy konstrukcji przekłada się wprost na zmniejszenie zużycia materiałów wytwórczych, paliwa oraz ograniczenie emisji spalin i hałasu. Tak więc zastosowanie elementów drążonych jest również proekologiczne.

## 2.1. Wyroby drążone w budowie maszyn

Przyglądając się szerzej zagadnieniu produkcji rur i wałków drążonych można zauważyć stałą tendencję coraz rozleglejszego stosowania tego typu elementów. To kształtowane przez rynki zbytu zapotrzebowanie na rury i wałki drążone wymuszało z biegiem czasu coraz szybszy rozwój technologii wytwórczych, pozwalający sprostać wysokim wymaganiom konkurencyjności [89]. Ponieważ głównym odbiorcą elementów drążonych w budowie maszyn jest przemysł motoryzacyjny, to zalety zmniejszania masy konstrukcji możemy bezpośrednio przełożyć na poprawę dynamiki pojazdów, zmniejszenie zużycia paliwa oraz, co za tym idzie, na ograniczenie emisji zanieczyszczeń. Dobrym przykładem może być tu wytwarzanie wałów i półosi napędowych. Jednym z ostatnich zastosowań elementów drążonych są wałki rozrządu – rys. 2.4. Takie właśnie rozwiązanie spotyka się w silnikach produkowanych w grupie General Motors [23] lub BMW [99]. Obniżenie masy elementów ruchomych zespołu napędowego gwarantuje podniesienie zakresu obrotów niebezpiecznych oraz poprawę osiągnięć napędzanego nim pojazdu.



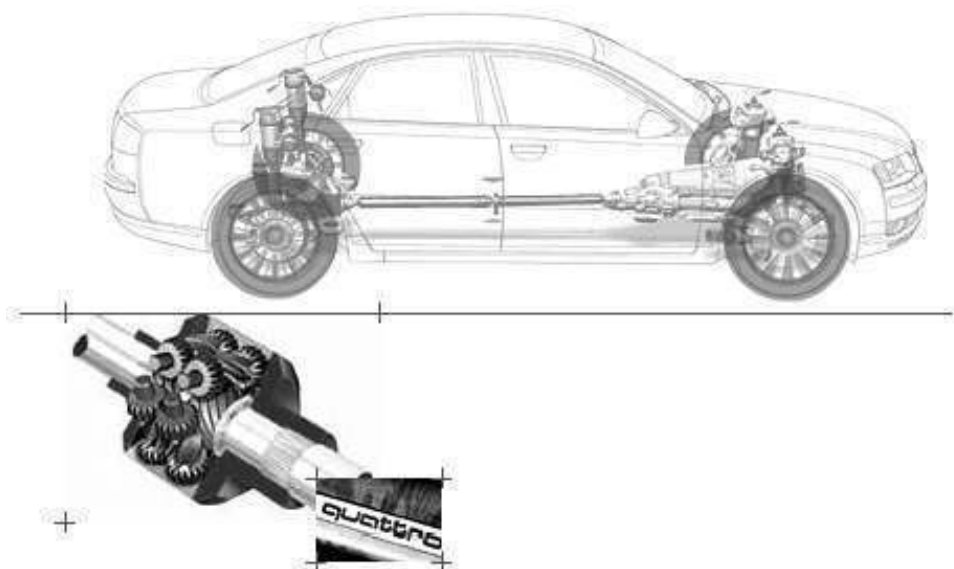
*Rys. 2.4. Wnętrze silnika z linii Duratec firmy Ford oraz stosowane w nim drążone wałki rozrządu [23]*

Z prowadzonych obecnie badań nad nowymi obszarami zastosowania elementów drążonych na uwagę zasługują wyniki uzyskane przez badaczy japońskich [118], którzy pracują nad wdrożeniem do produkcji drążonych zaworów silnikowych. Elementy te wytwarzane są poprzez wytlaczanie z jednoczesnym wewnętrznym prasowaniem i kalibrowaniem trzonu. Przykład tak wykonywanego zaworu, w kolejnych stadiach procesu, pokazano na rys. 2.5.

Zwracając uwagę na światowy rynek motoryzacyjny, kształtujący popyt na nowoczesne technologie wytwórcze, należy zasygnalizować o jak



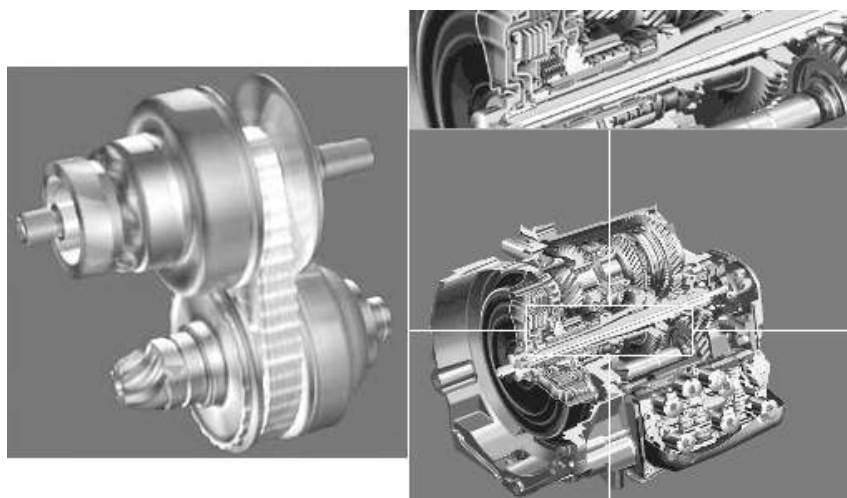
*Rys. 2.5. Kolejne etapy wykonywania zaworów drążonych wytwarzanych poprzez wytlaczanie z wewnętrznym prasowaniem i kalibrowaniem trzonu [118]*



**Rys. 2.6.** Rozwiązanie napędu 4 x 4 (quattro) z czterema półosiami i dzielonym wałem napędowym [96]

wielkim rynku zbytu mówimy. Wystarczy podać za przedstawicielami GKN Automotive A.G. z Niemiec [27], że produkcja samochodów w skali globalnej przekroczyła już w 1995 roku liczbę 40 milionów sztuk. Biorąc pod uwagę, że każdy z samochodów osobowych dysponuje minimum dwoma półosiami napędowymi (coraz popularniejsze ostatnio pojazdy z napędem na cztery koła posiadają odpowiednio cztery półosie), to tylko rynek samochodów osobowych jest w stanie wchłonąć w ciągu roku około 80 milionów elementów tego typu. Dodatkowo konieczne w tym przypadku przekazanie napędu do drugiej osi realizowane jest wałem napędowym o konstrukcji dzielonej, uwzględniającej instalację międzyosiowego mechanizmu różnicowego. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 2.6, gdzie przedstawiono układ napędowy „quattro” występujący w samochodach grupy Audi.

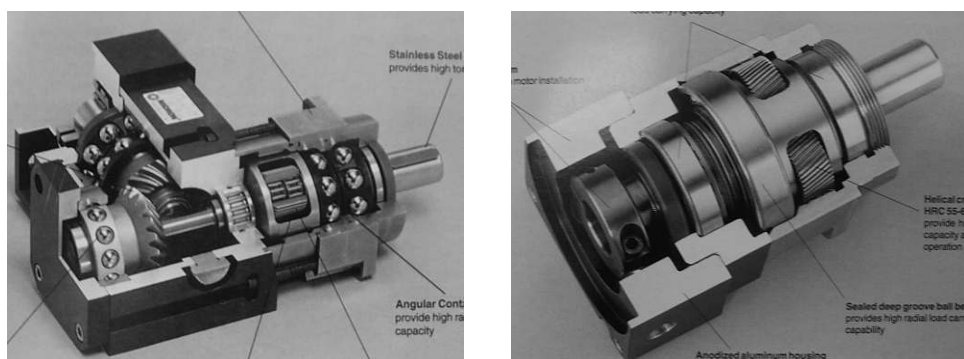
Innym obszarem zastosowań elementów drążonych są coraz bardziej wysublimowane konstrukcje przekładni napędowych, w których ograniczając gabaryty jednostki podnosi się jednocześnie przenoszony przez nie zakres mocy. Skracanie czasów reakcji tych przekładni na zmiany obciążenia i obrotów znacznie podnosi poziom obciążenia dynamicznego jakim poddawane są współpracujące ze sobą elementy.



**Rys. 2.7.** Modele przekładni napędowych Multitronic (z lewej) i DSG (z prawej), w których wykorzystano wałki drążone [7]

Przykładem mogą być tu przekładnie: bezstopniowa „Multitronic” i automatyczna „DSG”, o bardzo krótkim czasie reakcji na zmiany obciążenia lub sygnał kierowcy. Modele obu tych przekładni, montowanych w samochodach jako wyposażenie opcyjne, pokazano na rys. 2.7.

W przemyśle lotniczym masa konstrukcji oraz zużycie paliwa są jeszcze ściślej powiązane ze sobą, a co za tym idzie efekty ekonomiczne i ekologiczne mogą być jeszcze bardziej znaczące. Ostatnie rozwiązania z zastosowaniem osiowo – symetrycznych elementów drążonych to przekładnie proste i kątowe, służące m.in. do napędu skrzydłowych kłap sterujących, pomp paliwowych itp. Przykłady takich przekładni pokazano na rys. 2.8,



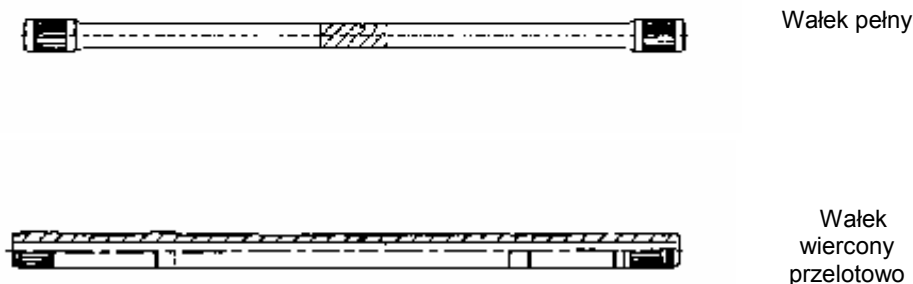
**Rys. 2.8.** Przekładnie firmy Thomson stosowane w przemyśle lotniczym [81]

przedstawiającym produkty firmy Thomson. Jednym z szerokiego grona ich odbiorców i użytkowników jest koncern EADS, będący producentem samolotów Airbus.

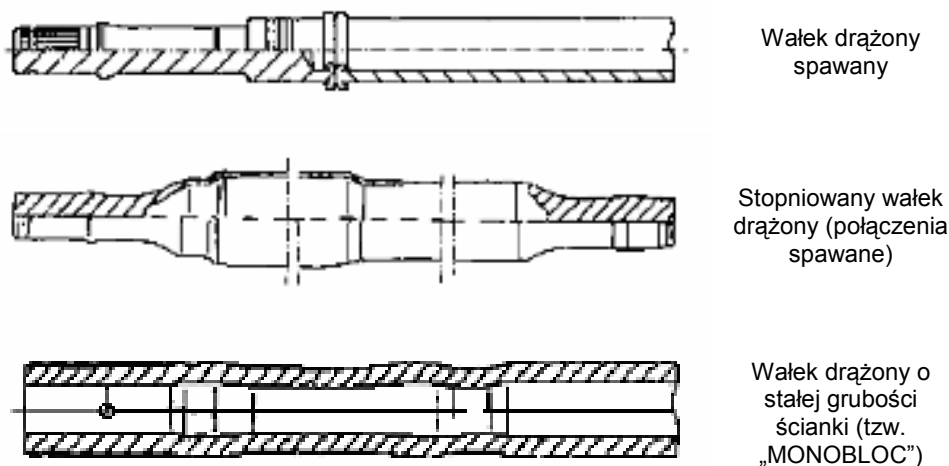
Należy również zwrócić uwagę na zastosowanie elementów drążonych, o niekiedy dość skomplikowanym kształcie, w ażurowych konstrukcjach lotniczych struktur nośnych. Stopniowe wypieranie z nich elementów obrabianych mechanicznie (dotyczy struktur „fail safe”), pozwala w przypadku katastrofy na uniknięcie tworzenia się sztywnych i ostrych krawędzi groźących zarówno krytycznym podzespołom samolotu czy śmigłowca, jak i pasażerom i załodze. Ponadto, konstrukcje drążone pozwalają na zastosowanie łączonej budowy elementów metalowych i kompozytowych, stosowanych tak chętnie w celu obniżenia ciężaru statków powietrznych.

W przemyśle motoryzacyjnym najpowszechniej stosowane do niedawna półosie o przekroju pełnym zastępowane są obecnie wyrobami drążonymi, wykonywanymi przy wykorzystaniu różnych technologii wytwórczych i montażowych. Najprostszą z nich jest przelotowe wiercenie wałków pełnych, dokonywane w celu obniżenia ich masy i momentu bezwładności – rys. 2.9.

Następną możliwą do zastosowania technologią jest wytwarzanie wałków drążonych z dwóch lub trzech półfabrykatów łączonych później w jedną całość. Części składowe mogą być w tym wypadku wykonywane głównie na drodze obróbki mechanicznej i wyciskania przeciwbieżnego. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 2.10.



**Rys. 2.9.** Walek pełny i walek wiercony przelotowo[1]



*Rys. 2.10. Przykłady konstrukcyjne wałków drążonych wykonywanych z półfabrykatów [1]*

Stosowanie technologii wytwórczych związanych z obróbką plastyczną pozwala na zachowanie ciągłego układu włókien kształowanego materiału. Porównanie przebiegu włókien w materiale po obróbce skrawaniem i po obróbce plastycznej przedstawiono na rys. 2.11. W wyrobach kształtowanych plastycznie struktura zewnętrzna warstw materiału (w kształtowaniu na zimno), zostaje polepszona i umocniona wskutek zgniot. Większa jest więc również wytrzymałość materiału, szczególnie u podstawy kształowanego profilu [31].

### 2.1.1. Porównanie charakterystyk mechanicznych wyrobów drążonych oraz wyrobów tradycyjnych, pełnych

Analizując tendencje światowe w zakresie stosowania elementów drążonych nie można nie zastanowić się, jakie konkretne i wymierne korzyści niesie ich wprowadzenie w nowoczesnych konstrukcjach. Porównując właściwości mechaniczne wyrobów drążonych stosowanych w miejsce, tak popularnych do niedawna, elementów pełnych można sprawdzić proste równanie. Rozpatrujemy zależność (2.1):

$$\frac{M_s}{\tau} = W_o = Const. = \frac{2J}{D} \quad (2.1)$$

gdzie:  $M_s$  – moment skręcający,  $\tau$  – naprężenia styczne,  $W_o$  – wskaźnik wytrzymałościowy przekroju wyrobu,  $J$  – moment bezwładności przekroju.

Przyjmując, że dla wałka pełnego moment bezwładności przekroju wynosi:

$$J_p = \frac{\pi D_p^4}{32}, \quad (2.2)$$

zaś dla przykładowego wyrobu drążonego o łącznej grubości ścianek równej  $1/3$  średnicy wyrobu mamy:

$$J_d = \frac{\pi}{32} \left( D_d^4 - \left( \frac{2}{3} D_d \right)^4 \right) = \frac{\pi}{32} \frac{65}{81} D_d^4, \quad (2.3)$$

gdzie:  $D_p$  – średnica zewnętrzna wyrobu pełnego,  $D_d$  – średnica zewnętrzna wyrobu drążonego. Jeżeli porównamy teraz:

$$\left( \frac{2J_p}{D_p} \right) = \left( \frac{2J_d}{D_d} \right), \quad (2.4)$$

to po podstawieniu za  $J$  wyrażen (2.2) i (2.3) otrzymujemy równanie:

$$\frac{\pi D_p^3}{16} = \frac{\pi}{32} \frac{65}{81} D_d^3, \quad (2.5)$$

z którego ostatecznie uzyskujemy:

$$D_d = 1,075 D_p. \quad (2.6)$$

Zatem wzrost średnicy wyrobu drążonego o łącznej grubości ścianek wynoszącej  $1/3$  jego średnicy, w stosunku do odpowiednika pełnego, wynosi 7,5%. Ta niewielka zmiana średnicy zewnętrznej wyrobu, gwarantuje porównywalną wytrzymałość mechaniczną, zapewnia wymierne korzyści w zakresie obniżenia ciężaru wyrobu oraz zużycia materiału niezbędnego do jego wyprodukowania. Dla ilustracji zmiany ciężaru wyrobu drążonego w stosunku do, analogicznego wytrzymałościowo, odpowiednika pełnego porównujemy ciężar obu wałków przypadający na jednostkę długości:

$$\frac{S_d}{S_p} = \frac{\left( D_d^2 - \left( \frac{2}{3} D_d \right)^2 \right)}{D_p^2} = 0,642, \quad (2.7)$$

gdzie:  $S_d$  – pole przekroju wyrobu drążonego,  $S_p$  – pole przekroju wyrobu pełnego.



*Rys. 2.11. Przebieg włókien materiału po obróbce mechanicznej (po stronie lewej) i po procesie kształtowania plastycznego (po stronie prawej) [31]*

Otrzymujemy zatem rezultat w postaci 35,8 % redukcji ciężaru porównywalnego elementu drążonego w stosunku do zamiennika pełnego. Stąd bardzo łatwo zauważyć jak duże (i wprost proporcjonalne do gabarytów wyrobów i wielkości serii produkcyjnej) możliwości ekonomiczne drzeją w takiej modyfikacji. Oszczędności te doceniają szczególnie ci, dla których ograniczenie kilogramów konstrukcji oznacza wymierne efekty ekonomiczne tj. głównie przemysł lotniczy i kosmiczny. Nie można też zapominać i o tych, którzy dosłownie „dźwigają” konstrukcje mechaniczne na plecach, a więc o wspinaczach górskich korzystających ze specjalistycznych ławeczek, stopni, śrub lodowych i innego niezbędnego osprzętu wykonanego w ultralekkich technologiach [109, 111].

## **2.2. Przegląd metod wytwarzania wałków drążonych**

### **2.2.1. Metody wytwarzania**

Wytwarzanie wałków drążonych i rurowych elementów konstrukcyjnych jest jednym z trudniejszych procesów kształtowania plastycznego. W obecnej sytuacji rynkowej i przy jednoczesnym uwzględnieniu wymogów ekonomiczno-jakościowych stawianych produkcji, dobór właściwej technologii wytwarzania staje się dosyć trudny. Uwzględniając możliwe do poniesienia przez producenta nakłady inwestycyjne należy brać również pod uwagę stabilność odbioru dostaw umożliwiającą ich amortyzację, jak i możliwość elastycznego dostosowania się do, często nieprzewidywalnych a koniecznych, zmian profilu produkcyjnego. Kształtowe wyroby drążone, w tym stopniowane wałki, mogą być wykonane na wiele różnych sposobów. Wśród obecnych na rynku technologii wytwórczych wyrobów drążonych na uwagę zasługują przede wszystkim:

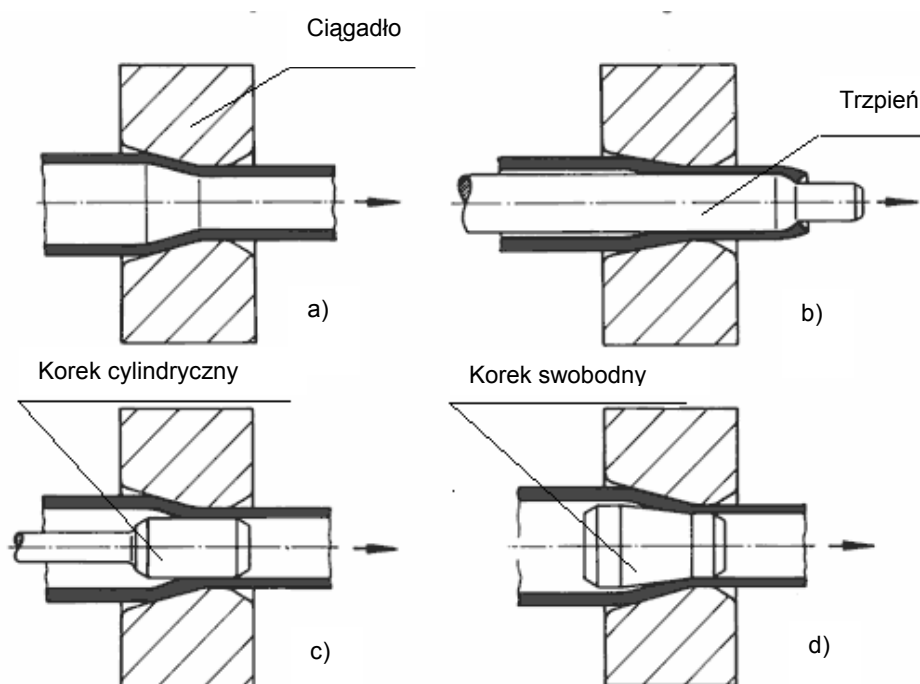


- ciągnięcie i wyoblanie;
- kucie tradycyjne i przebijanie;
- kucie na kowarkach;
- kucie obrotowe;
- wysokociśnieniowe kształtowanie wewnętrzne;
- wyciskanie na zimno;
- wyciskanie na zimno z głębokim wierceniem.

Przy wyborze jednej z powyższych technologii decydujące znaczenie odgrywają oczywiście 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 brany pod uwagę element drążony ma spełniać rolę wysokoobrotowego wałka maszynowego, to zakładanej (wysokiej) dopuszczalnej prędkości obrotowej, odpowiada bardzo niewielkie pole tolerancji wymiarowej wyrobu gotowego. Wyroby spełniające takie wymagania można uzyskiwać technologią ciągnięcia którą cechuje bardzo wysoka jakość powierzchni zewnętrznej, porównywalna z powierzchniami polerowanymi oraz bardzo wąskie tolerancje wymiarowe. 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 [53]. Niewątpliwymi ograniczeniami technologii ciągnięcia są niewielkie, związane z charakterystyką procesu, możliwości produkcyjne w zakresie kształtu wytwarzanych wyrobów. Elementy drążone uzyskiwane w procesie ciągnięcia muszą posiadać niezbyt skomplikowany kształt, ograniczający się do ewentualnie jednego kołnierza w skrajnej części wyrobu. W połączeniu z zachowaniem stałej grubości ścianki kształtowanych wyrobów, bardziej celowym wydaje się zastosowanie tak otrzymywanych półwyrobów drążonych 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 drążonych w stosunkowo

wąskim zakresie, jednakże półwyroby uzyskiwane tą technologią często są dalej przetwarzane innymi metodami. Podstawowe schematy procesu ciągnięcia realizowanego różnymi metodami podaje się na rys. 2.12.

Połączenie technologii ciągnięcia z wyoblaniem (w przypadku elementów cienkościennych) lub zgniataniem obrotowym (dla elementów bardziej masywnych) pozwala znacznie poszerzyć zakres wykorzystywania tych technologii. Zastosowanie wyoblania pozwala na skuteczniejsze zgrzewanie tarciove kołnierzy wyrobów cienkościennych. Ponadto, w różnych nietypowych zastosowaniach, możliwe jest dzięki tej metodzie uzyskanie pożądanego, zaokrąglonego kształtu skrajnych fragmentów wyrobu. Jest to szczególnie ważne przy prowadzeniu, tak wszechobecnych w różnych konstrukcjach, wiązek kabli elektrycznych chronionych w ten sposób przed załamaniem lub przypadkowym przecięciem. Możliwość wytwarzania osiowo-symetrycznych elementów cienkościennych o bardzo wysokiej

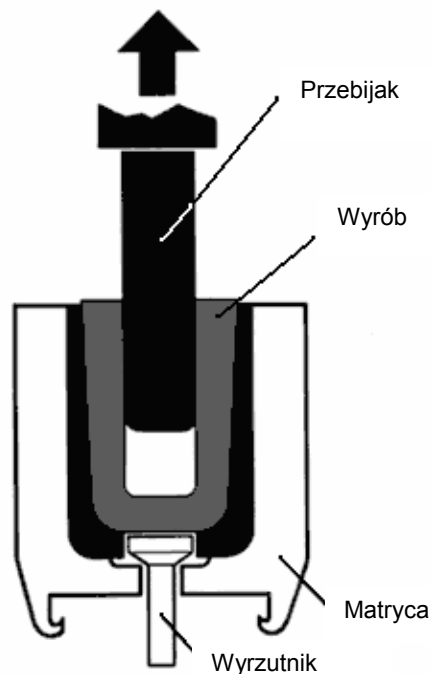


**Rys. 2.12.** Podstawowe schematy procesu ciągnięcia elementów drążonych: a) ciągnięcie swobodne, b) ciągnięcie na długim trzpieniu, c) ciągnięcie na korku cylindrycznym, d) ciągnięcie na korku swobodnym [102]

dokładności wykonania i skomplikowanych kształtach predysponuje te technologie do zaawansowanych zastosowań, wykorzystywanych np. w ażurowych konstrukcjach lotniczych struktur nośnych, części silników i sterowań, itp. [104, 113].

Technologia kucia tradycyjnego 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. Schemat procesu przebijania tulei grubościennej pokazano na rys. 2.13.

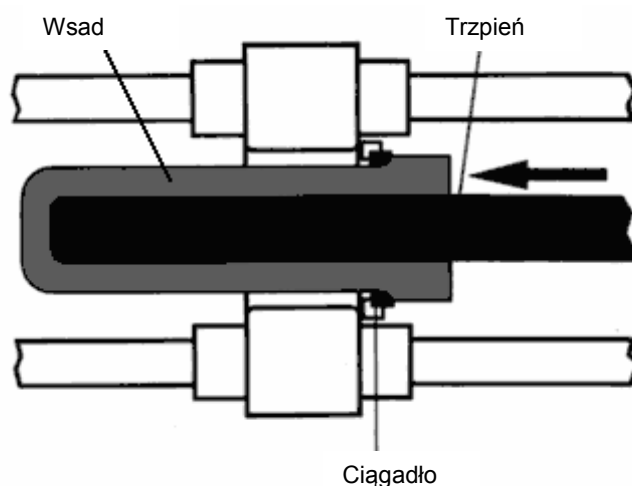
Metoda przebijania pozwala uzyskać bardzo korzystną strukturę materiału. Niestety, tolerancje grubości ścianki (zarówno w przekroju poprzecz-



Rys. 2.13. Schemat procesu przebijania tulei grubościennej [102]

nym, 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. 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 [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. 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. 2.14.

Kucie na kowarkach jest metodą pozwalającą na redukcję średnic prętów i rur. Właściwym jest stosowanie tej metody w warunkach obróbki na



Rys. 2.14. Schemat procesu przepychania tulei systemem Ehrhardta [102]

zimno, co pozwala zachować bardzo ściśle tolerancje wymiarowe i korzystne płynięcie warstw kształtowanego tą metodą metalu. Dodatkowym atutem tej technologii jest także wysoka jakość powierzchni wyrobu, uzyskiwanego przy jednoczesnym jej utwardzeniu. Sprzyja to podniesieniu własności mechanicznych wyrobu oraz podnosi granicę wytrzymałości zmęczeniowej.

Proces kucia na kowarkach pozwala na uzyskiwanie dużych wartości pochyleń, a także znacznych redukcji średnic [91]. Stosując dodatkowy trzpień można wykonać w kształtowanym elemencie bardzo dokładne otwory cylindryczne i stożkowe. Jednym z dodatkowych wariantów jest możliwość uzyskania wewnętrznego profilowania wyrobu. Agregat stosowany do wytwarzania tą metodą elementów drążonych wraz z przykładami wyrobów pokazano na rys. 2.15.

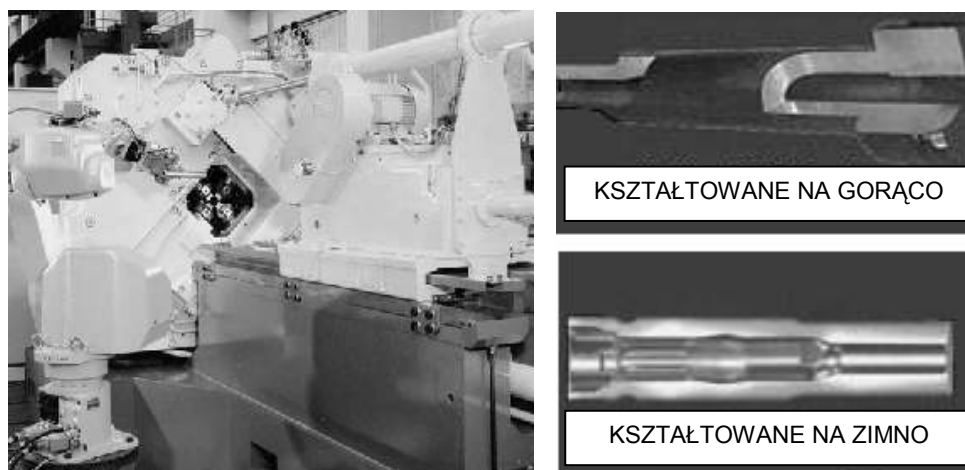
Wałki stosowane w skrzyniach biegów, posiadające duże pogrubienia ścianek na kołnierzach, mogą być wykonywana w kilku zabiegach na specjalistycznych agregatach umożliwiających również spęczanie. Ten proces, określony terminem „axial-radial-forming”, został rozwinięty przez Uniwersytet w Darmstadt we współpracy z HMP Pforzheim [107]. W procesie tym rury są nagrzewane tylko w strefie spęczania kołnierzy i ta część półfabrykatu podlega kształtowaniu. Ekonomia wytwarzania tą metodą jest daleka od doskonałości. Bardzo wiele czasu pochłaniają bowiem trzy kolejne operacje:

- nagrzewanie i spęczanie;
- redukcja kolejnych średnic;
- kucie części wyrobu na kowarce.

Możliwe jest zastosowanie maszyn wykonujących wszystkie te kroki jednocześnie. Związane jest to jednak z bardzo ścisłym ukierunkowaniem produkcji. W obecnej dobie, gdzie wymaga się jak najkrótszego czasu przezbierania maszyn i produkowania krótkich, zmieniających się często serii, jest to raczej ryzykowne i możliwe do wdrożenia tylko w największych koncernach, zapewniających długofalowy i bardzo stabilny odbiór produkowanych wyrobów. Metoda kształtowania promieniowo-osowego znajduje

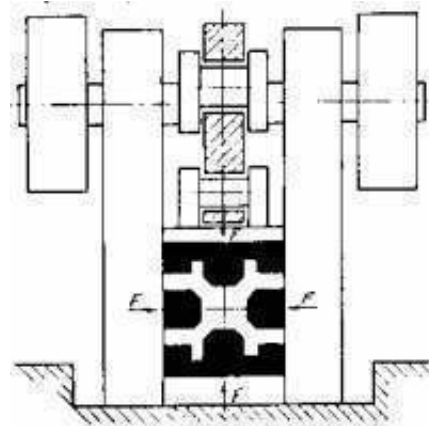
zastosowanie głównie w produkcji stalowych obręczy kół samochodowych i kolejowych [84]. Rynek tych wyrobów jest bardzo stabilny, a prognozowanie jego potrzeb stosunkowo łatwe do przewidzenia.

Podstawową różnicą pomiędzy kuciem obrotowym, a kuciem na kowarkach jest fakt, że w przypadku kucia obrotowego obraca się kształtowany materiał, a nie narzędzia. Narzędzia przeznaczone do realizacji tego procesu składają się najczęściej z dwóch części. Możliwe jest także za ich pomocą prowadzenie operacji spęczania. Średnica cienkościennej stalowej rury może zostać w tym procesie z łatwością podwojona. Tolerancje wymiarowe wyrobów uzyskiwanych w ten sposób liczone są w dziesiątych częściach milimetra [48].

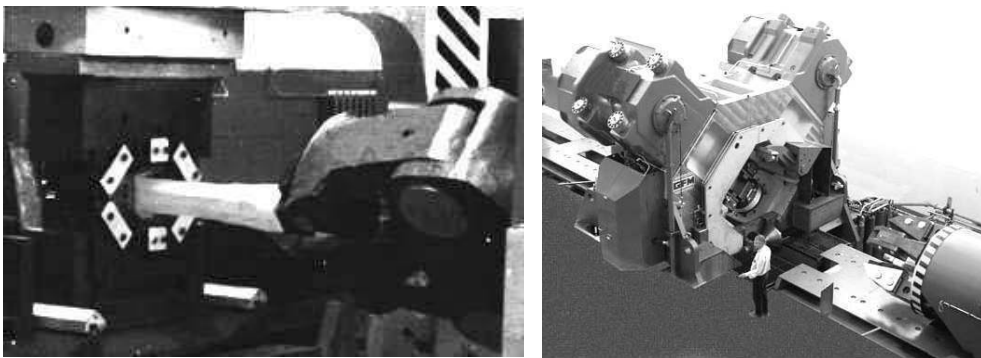


*Rys. 2.15. Zdjęcie kowarki (AGFM) oraz przykładowe wyroby drążone wykonywane w warunkach obróbki na zimno i na gorąco [95]*

Przedstawione na schemacie procesu (rys. 2.16) oraz zdjęciu (rys. 2.17) maszyny umożliwiają wytwarzanie wyrobów zarówno okrągłych jak i kwadratowych przy zmiennym profilu wzdłużnym. Dokładność wymiarowa produktów wytwarzanych tą metodą jest od 30 do 50 % wyższa niż w przypadku kucia tradycyjnego [48]. Niewątpliwą zaletą tej metody kucia jest możliwość przystosowania do niej większości dostępnych na rynku pras korbowych, co umożliwia poniesienie względnie niskich nakładów finansowych, niezbędnych do przygotowania maszyny do tego rodzaju produkcji.

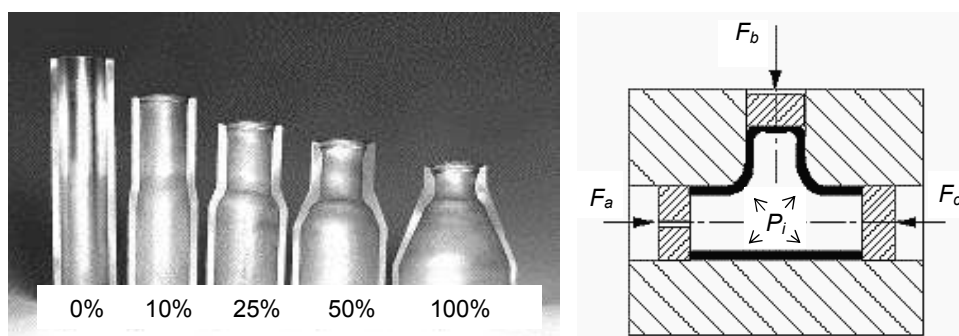


*Rys. 2.16. Schemat ideowy procesu kucia obrotowego [48]*



*Rys. 2.17. Przykład procesu kucia obrotowego oraz zdjęcie agregatu firmy AGFM [48, 105]*

Jeszcze inną metodą wykonywania wałków rurowych jest metoda wytłaczania hydrostatycznego lub hydro- mechanicznego [55, 108, 110]. Pierwsza z nich określana jest często w literaturze anglojęzycznej skrótem IHPF (skrót od „internal high pressure forming”). Przy zastosowaniu tej technologii wytwórczej wyrób jest kształtowany pod wpływem wysokiego ciśnienia, wytworzonego wewnątrz elementu. Zewnętrzna średnica wprowadzanego do matrycy wsadu rurowego odpowiada najmniejszej średnicy kształtowanego finalnie wyrobu. Wewnętrzna geometria stosowanych w procesie matryc jest odwzorowaniem zewnętrznej powierzchni wyrobu wytwarzanego. Schemat ideowy tej metody kształtowania, wraz z przykładem kolejnych etapów formowania podano na rys. 2.18. W przypadku kombinowanym, gdy metoda kształtowania hydrostatycznego zostanie połą-



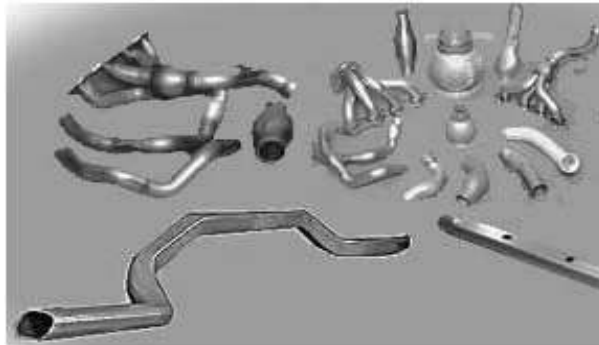
**Rys. 2.18.** Kolejne fazy kształtowania hydrostatycznego i schemat ideowy tego procesu [97]

czona z procesem spęczania wzdłużnego, możliwe staje się wykonawstwo wałków z kołnierzem w centralnej, lub w innej dowolnej ich części [18]. Ograniczenia tej metody wynikają z geometrii kształtowanego wyrobu. Najważniejszym parametrem charakteryzującym możliwości wykorzystania kształtowania hydrostatycznego jest stosunek średnicy do grubości ścianki materiału wsadowego. Najmniejszy możliwy do wykonania promień kształtowanego wyrobu określa się jako  $1,5g$ , gdzie  $g$  – grubość ścianki. Tolerancje wytwórcze wyrobów wytwarzanych tą metodą zawierają się pomiędzy 10 a 14 klasą dokładności [47]. Jest to jednak w znacznej mierze uzależnione od własności sprężystych materiału z jakiego kształtowany jest wyrób.

Metoda wewnętrznego kształtowania wysokociśnieniowego pozwala na formowanie elementów o geometrii złożonej. Czasami w ten sposób produkowane są wałki rozrządu. Wałki do skrzyń biegów pozostają raczej poza obszarem zastosowania tej metody ze względu na wysokie wartości naprężeń i odkształceń. Technologia ta jest za to z powodzeniem stosowana w produkcji elementów zawiesznień samochodowych (wahacze, belka tylnego zawieszenia) czy też elementów strukturalnych drzwi, ram foteli, układów wydechowych i elementów różnego typu wzmocnień. Przykładowe elementy uformowane za pomocą tej metody pokazano na rys. 2.19.

Szczególnym obszarem zastosowań tej odmiany wytłaczania mogą być struktury foteli lotniczych i podłóg śmigłowców, gdzie specjalne, ściśle zamodelowane elementy typu „sandwich” posiadają ogromną zdolność pochłaniania energii uderzenia. Ukształtowane w ten sposób elementy osiągają

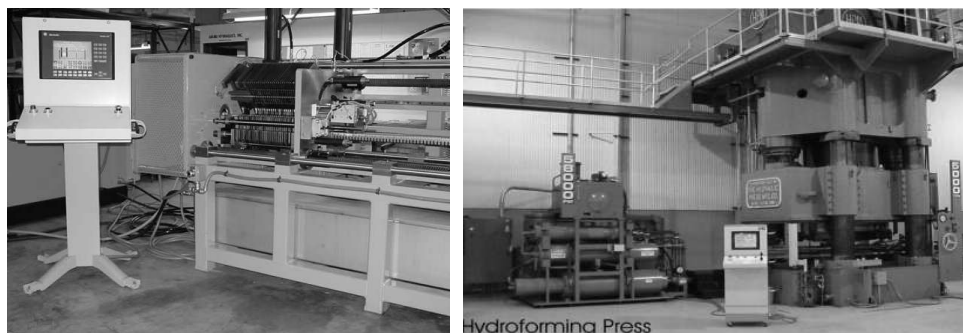




*Rys. 2.19. Przykładowe wyroby uzyskane za pomocą wylaczenia hydrostatycznego [105]*

czasami bardzo skomplikowane kształty, ale zbudowane na ich podstawie konstrukcje dokładnie odpowiadają stawianym im bardzo wysokim wymaganiom. Wprost z lotnictwa rozwiązania te adaptowane są do nowoczesnych konstrukcji samochodowych, gdzie z powodzeniem sprawdzają się u bardziej masowego odbiorcy. Przykłady maszyn przeznaczonych do kształtowania wysokociśnieniowego pokazano na rys. 2.20.

Obecnie większość wałków do skrzyń biegów wykonywana jest w technologii obróbki plastycznej na zimno. Szczególnie w przypadku dużych serii metoda ta ma znaczną przewagę nad procesami prowadzonymi na gorąco. Obok znacznie mniejszych naddatków na obróbkę mechaniczną w procesach prowadzonych na zimno nie jest wymagana końcowa obróbka cieplna. Przykładowe elementy wytwarzane przy zastosowaniu tej technologii pokazano na rys. 2.21.



*Rys. 2.20. Przykłady pras przeznaczonych do kształtowania wysokociśnieniowego [37]*



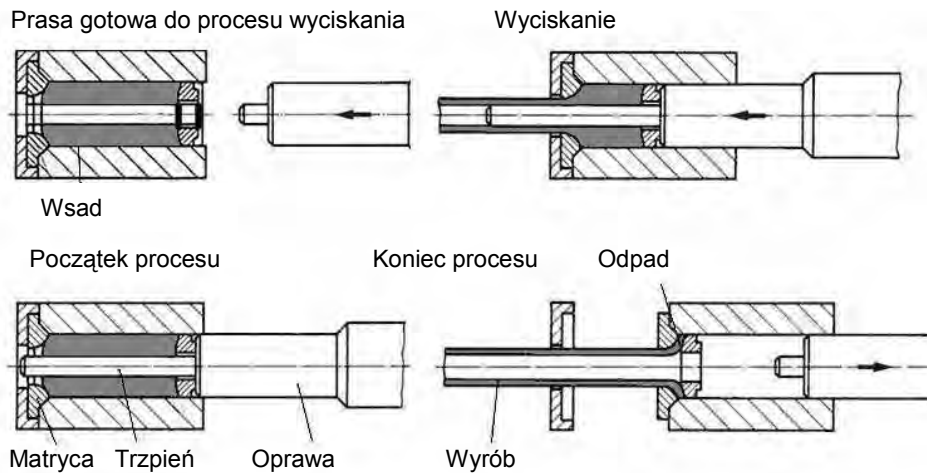
*Rys. 2.21. Niektóre części mechaniczne wykonywane metodą wyciskania na zimno [103]*

Połączenie metody wyciskania na zimno ze zgrzewaniem tarciovym, bądź głębokim wierceniem pozwala na znaczne poszerzenie zakresu wykorzystywania tej metody. Schemat ideowy procesu wyciskania na zimno podano na rys. 2.22.

Jak podaje literatura specjalistyczna [2], pełne wały do ciężkich pojazdów ważące około 20 kg mogą zostać zastąpione przez analogiczne rurowe cechujące się masami poniżej 5 kg. W tym przypadku wał wykonywany jest w dwóch połowach otrzymywanych metodą wyciskania na zimno. Z powodu wysokiego stopnia przerobu plastycznego konieczne jest w tym wypadku stosowanie wyżarzania pośredniego. Po operacji usuwania nadmiaru materiału, wpływającego w procesie wyciskania, następuje zgrzewanie tarciove. Porównując na koniec koszty wytworzenia wałka rurowego powyższą metodą okazuje się, że koszt jednostkowy jest tu wyższy niż dla wałka pełnego o takim samym kształcie, wykonanego w procesie kucia tradycyjnego. Przyczynami tego są:

- konieczność wyciśnięcia dwóch połówek wałka;
- niezbędne wyżarzanie międzyoperacyjne i obróbka powierzchni;
- konieczność dodatkowego toczenia i zgrzewania tarciovego.

Podsumowując: koszty wytworzenia wałka drążonego tą metodą są wyższe niż możliwe do uzyskania oszczędności materiałowe [1].



**Rys. 2.22.** Schemat procesu wyciskania na zimno [102]

Wałki rurowe mogą być także wytwarzane w sposób tańszy. Jest nim połączenie technologii wyciskania na zimno z głębokim wierceniem. Półwyroby uzyskane w procesie wyciskania są następnie wiercone i po obróbce końcowej trafiają do odbiorcy. Metoda ta stosowana jest raczej tylko doraźnie ponieważ wprowadzenie dodatkowej operacji jaką jest wykonanie otworu wewnętrznego po procesie wyciskania nie znajduje uzasadnienia ekonomicznego. Wyjątkiem są skomplikowane kształtem elementy (np. silnikowe wałki rozrządu), gdzie producentom bardzo zależy na ograniczeniu masy elementów ruchomych. Przekłada się to pośrednio na wzrost użytecznego zakresu obrotów silników i osiągów pojazdów nimi napędzanych. Zestawienie porównawcze prezentujące zalety i wady wybranych metod wytwarzania wałków drążonych podano w tabeli 2.1.

Z przedstawionego w tabeli 2.1 zestawienia wynika, że najkorzystniejsze z uwagi na dokładność i jakość wykonywanych wyrobów są technologie wyciskania na zimno oraz kucia na kowarkach. Biorąc pod uwagę masowość produkcji, o której mówimy w przypadku rynku motoryzacyjnego, właściwsze pod względem wydajności produkcji i powtarzalności kształtów są technologie wyciskania na zimno połączonego ze zgrzewaniem lub głębokim wierceniem. Łączenie elementów za pomocą zgrzewania pozwala w łatwy sposób na uzyskanie zróżnicowania asortymentu proponowanych wyrobów.

Tab. 2.1. Porównanie jakościowe różnych metod produkcji wałków drążonych[42]

Metody wytwórcze / Parametry	Kucie na kowarkach	Kucie obrotowe	Wysokociśnieniowe kształtowanie wewnętrzne	Wyciskanie na zimno i zgrzewanie tarciove	Wyciskanie na zimno z głębokim wierceniem
Materiał wsadowy	przedkuwka rurowa	przedkuwka rurowa	przedkuwka rurowa	przedkuwka	przedkuwka
Temperatura kształtowania	głównie na zimno	głównie na gorąco	na zimno	na zimno	na zimno
Smarowanie	brak	częściowo	częściowo	tak	tak
Ilość operacji	kilka	kilka	jedna	kilka	kilka
Obrabialność	■ ■ ■	■	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
Dokładność wykonania	■ ■ ■	■	■	■ ■ ■	■ ■ ■
Jakość powierzchni	■ ■ ■	■	■	■ ■ ■	■ ■ ■
Ograniczenia procesu	średnica kołnierza	stosunek średnica/grubość ścianki	stosunek średnica/grubość ścianki	średnica wewnętrzna	----
Minimalna wielkość produkcji	■ ■ ■	■ ■ ■	■	■ ■	■ ■
Wydajność	■	■ ■	■	■ ■ ■	■ ■ ■

■ ■ ■ korzystne
  ■ niekorzystne

Przy oferowanym przez dealerów samochodowych bogactwie modeli, wariantów silnikowych skojarzonych ze skrzyniami biegów, czy nawet wersji napędu (napęd na jedną lub więcej osi pojazdu) jest to konieczne i znacznie uatrakcyjniamy proponowaną ofertę. Przy zachowaniu wysokiego poziomu jakości technologia kucia na kowarkach zapewnia opłacalność również w przypadku wykonawstwa krótszych (w porównaniu z przemysłem samochodowym) serii wyrobów. Niższe koszty uruchomienia produkcji wraz z szerszymi możliwościami kształtowania (ograniczonymi jedynie średnicami kołnierzy zewnętrznych) sprawiają, że technologia ta znajduje

częste zastosowanie przy produkcji stopniowanych wałów, w tym ostatnio wałów drążonych.

### **2.2.2. Zagadnienia jakości wyrobów i stosowane tolerancje wytwórcze**

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 powierzchni zewnętrznej kształtowanego elementu 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 [115]. 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 [10, 60, 117].

W wytwarzaniu wyrobów drążonych jako części maszyn, a w szczególności wałków 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 którego wyniku uzyskujemy finalny kształt wytwarzanego wyrobu często bez przeprowadzania dodatkowych operacji. Wyciskanie z zastosowaniem trzpienia wewnętrznego pozwala na uzyskanie wy-

robów 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. Tym też podyktowana była m.in. decyzja o zastosowaniu tak otrzymywanych wsadów drążonych do dalszego kształtowania w procesie walcowania poprzeczno – klinowego.

Stosunkowo najgorzej w porównawczym zestawieniu metod wytwórczych wypada technologia kształtowania hydrostatycznego. Trudno jest w tym przypadku utrzymać wąskie tolerancje wymiarowe, a powierzchnia wyrobu pozostaje chropowata i często pofałdowana (szczególnie w narożach). Stąd też technologia ta nie znajduje raczej zastosowania w produkcji stopniowanych wałków drążonych. Wykorzystywana jest za to z dużym powodzeniem przy wytwarzaniu różnych elementów, o niekiedy bardzo skomplikowanym kształcie, takich jak: części struktur nośnych, wręgi lotnicze, wahacze samochodowe, kolektory wydechowe, fragmenty stelażu foteli, itp.

Z uwagi na różnorodność stosowanych norm i oznaczeń dotyczących wyrobów drążonych w tabeli 2.2 przedstawiono zestawienie światowych norm obejmujących procesy wytwarzania i warunki dostaw wyrobów drążonych, produkowanych zarówno w procesach obróbki plastycznej na zimno jak i na gorąco.

Korzystając z obowiązujących w Unii Europejskiej norm „EN” w tabeli 2.3 zestawiono niektóre tolerancje wytwórcze wyrobów drążonych, kształtowanych na zimno. Do zestawienia dołączono dla porównania przykład wcześniej stosowanych w Polsce dokumentów, odpowiadających w zasadzie nowo wprowadzonym normom europejskim „EN”.

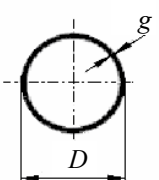
Korzystając z obowiązującej normy uwagę zwraca dosyć szeroka tolerancja grubości ścianki, kształtowanej w warunkach obróbki plastycznej na zimno, sięgająca w przypadkach skrajnych do 20 % - tabela 2.3. W zakresie oferty wyrobów kształtowanych na gorąco, tolerancje wymiarowe pozostają jeszcze szersze, czyniąc je mało przydatnymi do kształtowania stopniowanych wałków drążonych. Dodatkowym ograniczeniem procesów przeróbki plastycznej na gorąco jest występowanie, podawanej przez producentów, minimalnej grubości ścianki uzależnionej od średnicy kształtowanego wyrobu. Uznaje się stąd, że technologia kucia obrotowego, tak jak i kucia tradycyjnego, może zostać wykorzystana jedynie w przypadku jednostkowego

kucia masywnych, wielkogabarytowych wyrobów drążonych znajdujących zastosowanie w przypadku najcięższych pojazdów, maszyn i jednostek pływających. Ze względu na szeroki zakres tolerancji wymiarowych wykorzystanie wytwarzanych tą metodą wyrobów jako przedkuwek rurowych do dalszej obróbki plastycznej mającej na celu uzyskanie stopniowanych wałków drążonych jest raczej niewskazane.

**Tab. 2.2.** Zestawienie światowych norm obejmujących produkcję kształtowników drążonych [101]

KRAJ	Kształtowane na zimno	Kształtowane na gorąco
Australia	AS 1163-1191	AS 1163-1191
Kanada	CAN/CSA-G40.20-M92	CAN/CSA-G40.20-M92
Stany Zjednoczone	ASTM A500-93	ASTM A501-89
Europa	EN 10219-1 & 2	EN 10210-1 & 2
Japonia	JIS G3466-1988 JSS II-10-1998 JASS 6	JIS G3444-1998

**Tab. 2.3.** Wybrane tolerancje wytwórcze dla wyrobów drążonych walcowanych na zimno wg normy EN 10219, w porównaniu z Tymczasowymi Warunkami Technicznym „Stalexport” S.A. [59, 88]

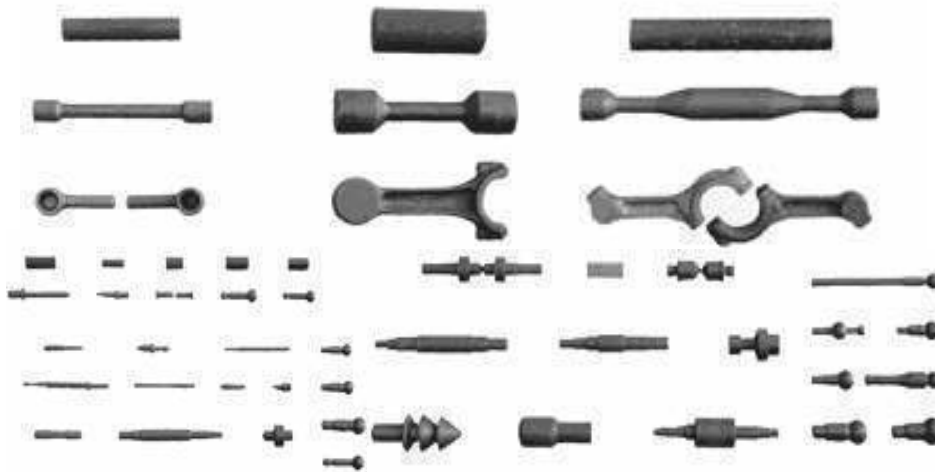
	Tolerancje według normy	
	PN-EN 10219	TWT P2-165
Średnica zewnętrzna [D]	1%, jednak co najmniej $\pm 0,5$ mm i najwyżej 10 mm	Przy $d \leq 50$ mm: $\pm 0,25$ mm Przy $50 \text{ mm} < D \leq 127$ mm: $\pm 0,5$ mm
Owalność średnicy	2%, przy $D/g \leq 100$	jw.
Grubość ścianki [g]	Przy $d \leq 406,4$ mm: $\pm 10\%$ przy $s \leq 5$ mm	10%
Prostoliniowość	0,20% całkowitej długości	2,5 mm/m, max 0,25% całkowitej długości
Masa	Pojedyncza rura: $\pm 6\%$	-
Długość	$\geq 4000$ mm: $-0/+50$ mm	Przy długości 3 ÷ 18 m: $-0/+50$ mm

### 3. PRZEGLĄD LITERATURY W ZAKRESIE WPK

Walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) jest technologią, która znalazła już swoją stałą, ugruntowaną pozycję w przemyśle światowym [44, 62, 86, 93]. W ten sposób wykonywane są obecnie przedkuwki osiowo - symetryczne różnego typu (półwyroby do kucia korbowodów, panewek, kluczy maszynowych, widełek, dźwigni itp.) [12, 17], wyroby gotowe (rdzenie izolatorów, sworznie, wałki) [36, 54] oraz odkuwki przeznaczone do dalszej obróbki mechanicznej (stopniowane osie, elementy zawiesznień samochodowych i układów kierowniczych) [26, 35]. Technologia WPK pozwala na uzyskiwanie wysokiej jakości i dokładności kształtowanych wyrobów. Przy dopuszczalnych tolerancjach odchyłki średnicy wyrobu mierzonych w dziesiątych częściach milimetra i chropowatości 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 % [54]. 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) [21, 54]. Przykłady zastosowań technologii WPK podano na rys. 3.1 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 [12, 39]. Przegląd metod kształtowania WPK podano na rys. 3.2.



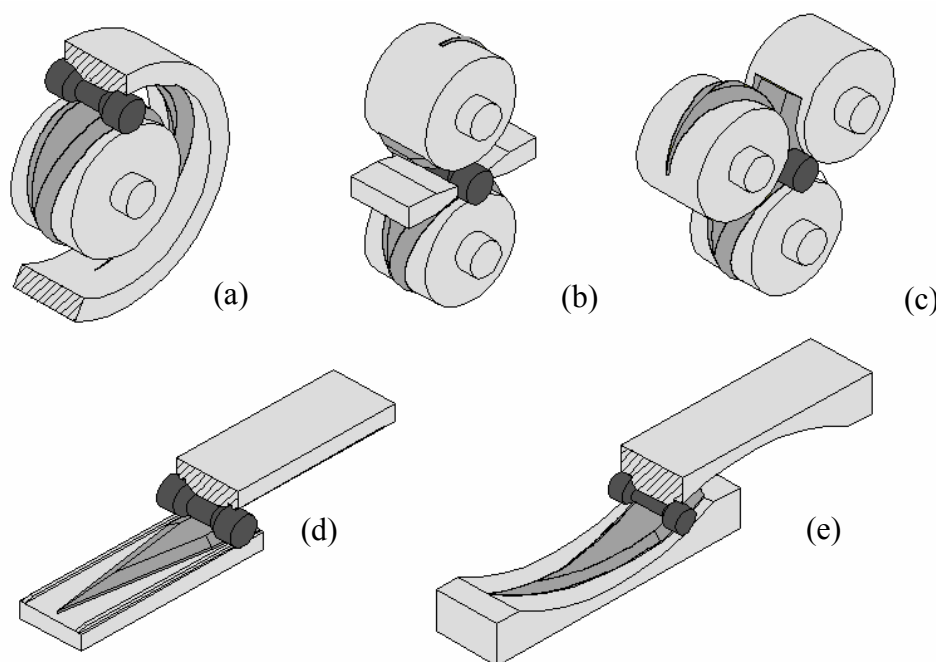


*Rys. 3.1. Przykłady wyrobów wykonywanych w technologii WPK przez firmę Beltechnologia & M [98]*

Z przedstawionych metod najczęściej stosowaną w przemyśle jest metoda walcowania narzędziami płaskimi, umieszczonymi w układzie pionowym lub poziomym [116]. Niewątpliwą zaletą tej metody jest mniejszy, niż w przypadku (drugiej pod względem popularności) metody dwuwalcowej, koszt wytworzenia narzędzi. Metoda trójwalcowa, z uwagi na złożoną budowę agregatu oraz ograniczenia średnic walców nie znalazła jeszcze szerszych zastosowań przemysłowych.

Biorąc pod uwagę przebieg procesu kształtowania WPK wyróżnia się następujące, pokazane schematycznie na rys. 3.3, metody kształtowania:

- WPK metodą redukcji średnic (rys. 3.3a). W początkowej fazie procesu segment narzędziowy wcina się we wsad tworząc na jego obwodzie rowek w kształcie litery V. Następnie rowek ten jest poszerzany w kierunku od środka wyrobu na żądaną długość w wyniku oddziaływania bocznych ścianek narzędzia. Redukcji przekroju poprzecznego wyrobu towarzyszy jego swobodne wydłużanie w kierunku osiowym;
- WPK metodą wsteczną (rys. 3.3b). W metodzie tej odwalcowany rowek w kształcie litery V jest rozszerzany w kierunku do środka wyrobu. Przy dwóch oddziałujących w ten sposób klinach możliwe jest osiągnięcie (w środkowych stopniach odkuwki) naprężeń ściskających przekraczających wartość naprężenia uplastyczniającego i dzięki temu możliwe jest spęczanie tych części wyrobu;



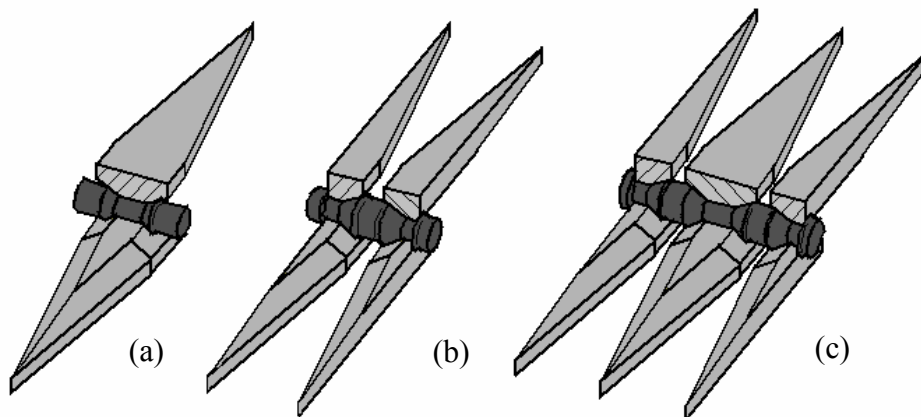
**Rys. 3.2.** Klasyfikacja metod WPK ze względu na konstrukcję narzędzi: a) walcowanie poprzeczne w układzie segment-walec; b) walcowanie poprzeczne w układzie dwóch walców; c) walcowanie poprzeczne trzema walcami; d) walcowanie poprzeczne klinowymi narzędziami płaskimi; e) walcowanie poprzeczne w układzie dwóch wklęsłych segmentów narzędziowych [29]

- WPK metodą równoległą (rys. 3.3c). W tym przypadku wykonywane jest równoczesne kształtowanie wyrobu za pomocą kilku par segmentów narzędziowych o zróżnicowanym kształcie. Zaletą tej metody jest możliwość nawet trzykrotnego skrócenia długości narzędzi, któremu towarzyszy jednakże znaczny wzrost sił walcowania.

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

projektowanych 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 [26, 34, 66, 69, 72, 74, 75, 87, 93, 94].

Wśród najbliższych geograficznie ośrodków zajmujących się produkcją walcerek 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. 3.4. Agregat ten zestawiono wraz ze współpracującym indukcyjnym urządzeniem nagrzewającym i podajnikiem. 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.

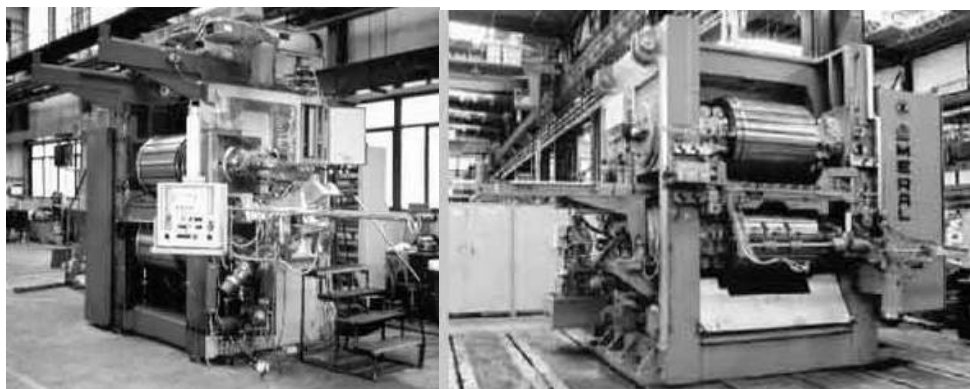


**Rys. 3.3.** Podział metod WPK ze względu na przebieg procesu: a) walcowanie poprzeczno – klinowe metodą redukcji średnic (zwykłe); b) wsteczne walcowanie poprzeczno - klinowe (ze spęczaniem); c) równoległe walcowanie poprzeczno-klinowe [62]



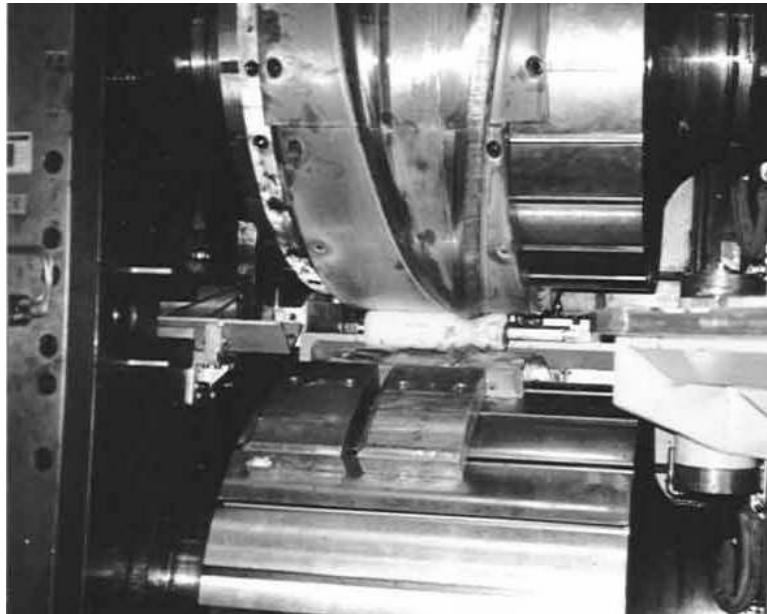
**Rys. 3.4.** Walcarka płaskoklinowa firmy Beltechnologia & M (Białoruś) [98]

Czeska firma Šmeral produkuje walcarki z dwoma walcami roboczymi, o średnicach wynoszących 700 lub 1000 mm - rys. 3.5. 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).



**Rys. 3.5.** Dwuwalcowa walcarka poprzeczno – klinowa firmy Šmeral - Czechy [112]

Zdjęcie klatki walcowniczej walcarki dwuwalcowej, w trakcie procesu kształtowania wyrobu pokazano na rys. 3.6.



*Rys 3.6. Kształtowanie wyrobu w dwuwalcowej walcarce ULS (Šmeral - Czechy) [112]*

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. 3.7.

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



*Rys 3.7. Wyroby wykonywane w układzie podwójnym (WPK) [112]*

nich 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 rozdzielania wyrobów wykonywanych w układzie podwójnym. Przykład wyrobu kształtowanego w technologii WPK z odcinaniem odpadów czółowych, z charakterystycznymi lejami, pokazano na rys. 3.8.



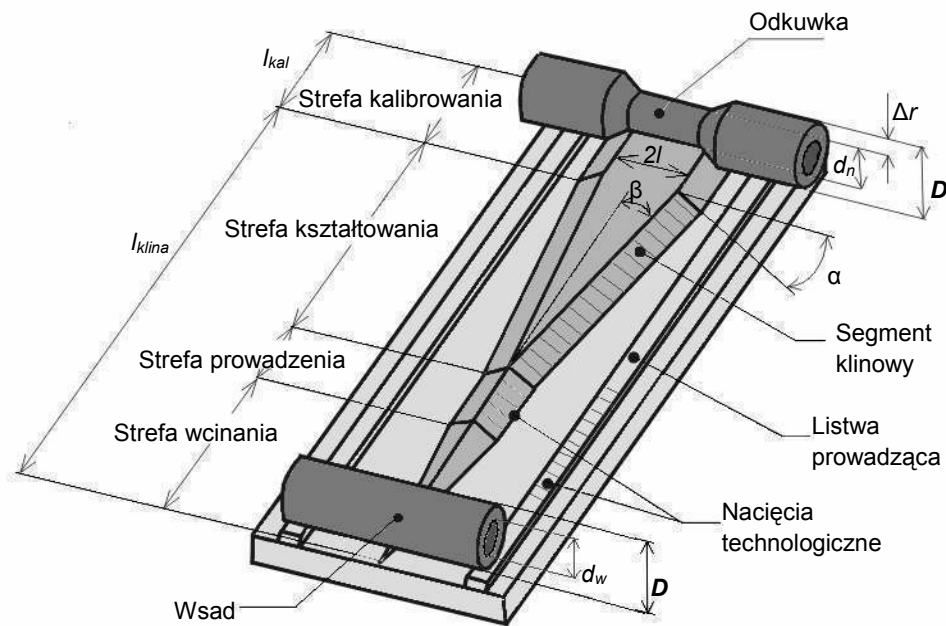
**Rys 3.8.** Odkuwka wałka pośredniego wraz z odpadami końcowymi odcinanymi w trakcie procesu WPK [66]

Walcowanie wyrobów z wsadów drażonych pozwala na znaczne ograniczenie ilości metalu, który tworzy odpady końcowe. Zatem zastosowanie wsadów drażonych pozwala na znaczne zmniejszenie materiałochłonności procesu i czyni technologię WPK bardziej przyjazną dla środowiska.

Budowę typowego segmentu narzędziowego do WPK przedstawiono na rys. 3.9, na którym wyszczególniono również podstawowe parametry geometryczne tego procesu. Są to: kąt kształtujący  $\alpha$ , kąt rozwarcia klina  $\beta$ , średnica wsadu  $D$ , średnica odkuwki po walcowaniu  $d_n$  oraz długość walcowania  $l$ .

W typowym segmencie narzędziowym można wyróżnić następujące strefy: wcinania, prowadzenia, kształtowania i kalibrowania. W strefie wcinania narzędzie zagłębia się w materiał na zadaną wcześniej głębokość, redukując jego średnicę do finalnie wymaganej wartości. W strefie prowadzenia następuje rozwinięcie tej redukcji na cały obwód wałka. Ta strefa narzędzia jest jednakże często pomijana w rozwiązaniach praktycznych. Następnie na długości strefy kształtowania odwalcowany wcześniej rowek rozszerzany jest na założą wcześniej długości przewężenia  $2l$ . Strefa kalibrowania

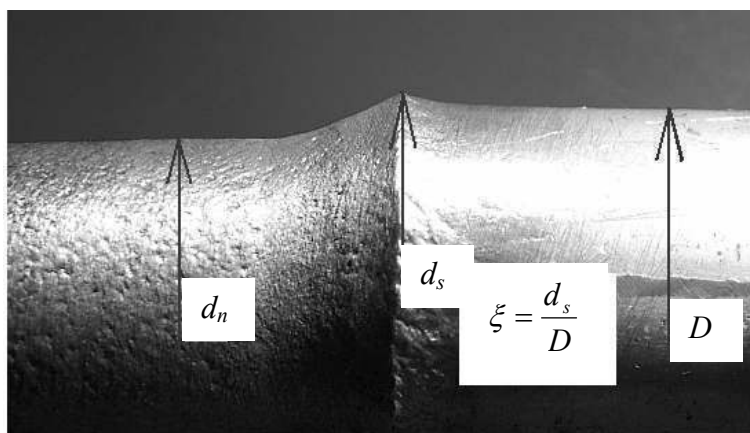
ma za zadanie usunięcie wszelkich powstałych we wcześniejszych fazach procesu krzywizn i nieregularności kształtu. Odkuwka poddawana jest w tej strefie obrotowemu obciskaniu.



**Rys. 3.9.** Segment narzędziowy do WPK oraz główne parametry procesu

Charakterystyczne dla procesu WPK jest występowanie spiętrzenia materiału wchodzącego do strefy odkształcenia. W efekcie średnica wsadu wzrasta z  $D$  do  $d_s$  (rys. 3.10). Spiętrzenie materiału osiąga maksymalną wartość już w początkowej fazie procesu kształtowania, tj. na długości stref wcinania i prowadzenia. Bezpośrednim efektem zwiększenia średnicy wsadu jest wzrost wartości powierzchni kontaktu materiał-narzędzie, co w konsekwencji powoduje wzrost wartości sił i momentów walcowania występujących w procesie kształtowania. Za miarę spiętrzenia materiału podczas WPK przyjmuje się współczynnik wzrostu średnicy  $\xi$ , definiowany jako:

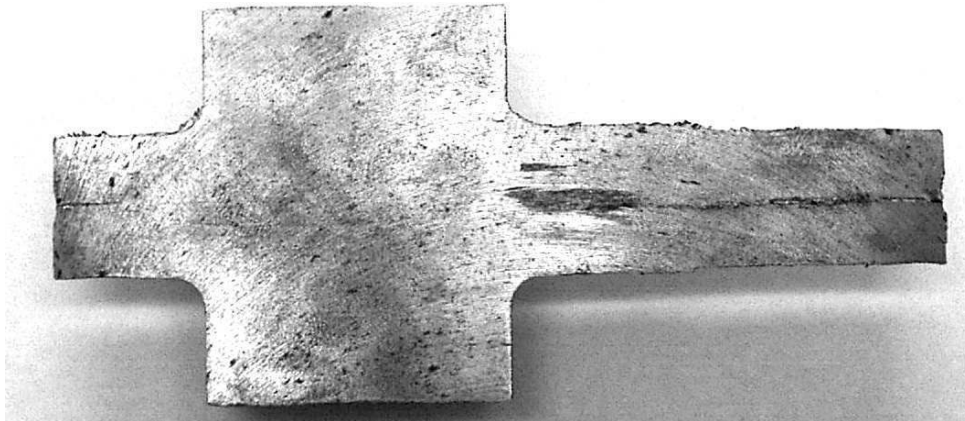
$$\xi = \frac{d_s}{D}. \quad (3.1)$$



**Rys. 3.10.** Spiętrzenie materiału wchodzącego do strefy odkształcenia

W przypadku walcowania z wsadów pełnych stabilność kształtowania może zostać zaburzona przez pojawienie się: niekontrolowanego poślizgu pomiędzy narzędziami a kształtowaną odkuwką, przewężenia rdzenia walcowanego wyrobu (prowadzącego aż do zerwania odkuwki) oraz wystąpienia pęknięć wewnętrznych. Niekontrolowany poślizg występuje w sytuacjach, gdy suma momentów sił sprzyjających obrotowi kształtowanej odkuwki jest mniejsza od sumy momentów sił przeciwnych temu obrotowi. W przypadku tym przemieszczające się w przeciwnych kierunkach segmenty narzędziowe zdzierają wierzchnie warstwy materiału kształtowanej odkuwki, realizując proces skrawania z ujemnym kątem natarcia. Przewężenie rdzenia, walcowanej metodą WPK, odkuwki warunkowane jest wystąpieniem naprężeń rozciągających (wywołanych działaniem składowej osiowej siły walcowania) przewyższających granicę plastyczności metalu. W takim przypadku poosiowemu płynięciu materiału towarzyszy tworzenie się typowej szyjki jak w próbie rozciągania. W trakcie walcowania w materiale powstają silne naprężenia o zmieniającym się (co ćwierć obrotu odkuwki) znaku i wartości. Są to naprzemienne naprężenia ściskające i rozciągające. Podstawowym zagrożeniem płynącym z faktu istnienia takiego stanu naprężenia jest możliwość utworzenia w wyrobie pęknięć wewnętrznych. Powstają one w wyniku niskocyklowego zmęczenia materiału i są zlokalizowane w strefie osiowej odkuwki. Przykład wyrobu kształtowanego metodą WPK, w którym powstały pęknięcia osiowe pokazano na rys. 3.11.





*Rys. 3.11. Przykład wyrobu z pęknięciem osiowym powstałym w trakcie procesu walcowania poprzeczno – klinowego [6]*

W praktyce przemysłowej bardzo często kieruje się całą serią produkcyjną na badania defektoskopowe, mające na celu wyeliminowanie ewentualnych braków powstałych w efekcie niepożądanego pęknięcia osiowego materiału. Wprowadzenie do produkcji wyrobów drążonych skutecznie eliminuje ryzyko tworzenia się pęknięć osiowych.

### **3.1. Dobór kątów narzędzi klinowych**

W praktyce dobór parametrów geometrycznych narzędzi klinowych, stosowanych w procesie WPK, ogranicza się do określenia wielkości kąta kształtującego  $\alpha$  i kąta rozwarcia klina  $\beta$ . W oparciu o wartości tych kątów po uwzględnieniu kształtu odkuwki ustala się dopiero pozostałe wymiary narzędzi. Wpływ przyjętych kątów  $\alpha$  i  $\beta$  na przebieg kształtowania ma charakter złożony. Zwiększenie kąta kształtującego  $\alpha$  powoduje przykładowo silny wzrost wartości sił osiowych rozciągających odkuwkę, co może prowadzić do powstawania przewężenia rdzenia. W pracach [39, 46] postuluje się występowanie tego niekorzystnego zjawiska przy stosowaniu narzędzi z  $\alpha > 40^\circ$ . Inne podejście do tego zagadnienia proponują Andreev i in. [3] oraz Hu [38]. Zalecają oni przyjmowanie maksymalnych wartości kąta kształtującego  $\alpha$ , co minimalizuje z kolei możliwość tworzenia się pęknięć w strefie osiowej walcowanych wyrobów. Postulat ten potwierdzają wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych przez Siguyamę [85]. W pracach [38,

85], jako warunek pozwalający zminimalizować ryzyko powstawania pęknięć wewnętrznych przyjmuje się walcowanie narzędziami o kątach  $\alpha > 15^\circ$ . Zmiana wielkości kąta rozwarcia klina  $\beta$  przekłada się bezpośrednio na długość projektowanego narzędzia. W tym wypadku obok ograniczeń konstrukcyjnych związanych z dopuszczalną długością klina w wielu pracach, np. [38, 39] podaje się, że stosowanie narzędzi klinowych ze zbyt dużymi  $\beta$  może doprowadzić do wystąpienia niekontrolowanego poślizgu pomiędzy odkuwką a narzędziami lub do przewężenia wyrobu. Koizumi i in. [45] proponują przyjmowanie kąta rozwarcia klina  $\beta$  z zakresu  $(5 \div 12)^\circ$ . Kusunoki i in. [46] oraz Sugiyama [85] wykazali doświadczalnie, stosując narzędzia o kącie pochylenia ściany bocznej  $\alpha = 15^\circ$ , że im mniejsza jest wartość kąta  $\beta$  tym większe są rozmiary pęknięć w strefie osiowej kształtowanego wyrobu.

Po raz pierwszy zależność służąca do obliczania kąta rozwarcia klina  $\beta$  została podana przez Balina [4], wg. którego

$$\sin\beta = 0,009 \cdot \frac{\mu}{\sin\alpha}, \quad (3.2)$$

gdzie współczynnik tarcia  $\mu$  należy przyjmować w zakresie  $0,4 \div 0,5$ .

Inne zależności pozwalające na dobór parametrów geometrycznych segmentów narzędziowych, podane w opracowaniach [3, 14] dotyczą walcowania odkuwek ze stali konstrukcyjnych i przedstawiają się następująco:

$$\beta \leq \arctg\left(\frac{0,3 + 0,01d_0}{\delta^3}\right) \quad 3^\circ \leq \beta \leq 15^\circ, \quad (3.3)$$

$$\alpha = 80 \cdot \operatorname{tg}\beta + 15 + \frac{d_0}{4} \quad 15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ. \quad (3.4)$$

W procesie projektowania segmentów narzędziowych do WPK, zgodnie z zaleceniami podanymi w pracach [34, 35], konieczne jest uwzględnienie wielkości odkształcenia. Tamże wprowadza się istnienie krytycznej wartości redukcji przekroju poprzecznego kształtowanej odkuwki, po przekroczeniu której występują pęknięcia w strefie centralnej lub przewężenie rdzenia.

Zgodnie z wynikami badań doświadczalnych [38], wykonanych przy różnych kątach kształtujących  $\alpha$ , redukcja przekroju poprzecznego  $R_p$  powinna się zawierać w przedziale  $55 \div 70\%$ .

Według Andrejewa i in. [3] stosowanie klinów o kątach  $\alpha > 35^\circ$  może doprowadzać do zawałców powierzchniowych. Ponadto może powodować zerwanie rdzenia walcowanej odkuwki [39]. Wynikiem badań doświadczalnych [25] wykonanych na próbkach z plasteliny było stwierdzenie, że w celu uniknięcia zerwania rdzenia oraz ograniczenia nadmiernego skręcania walcowanych poprzecznie odkuwek, stosowane kąty  $\alpha$  i  $\beta$  powinny spełniać następujący warunek:

$$0,04 \leq \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta \leq 0,08. \quad (3.5)$$

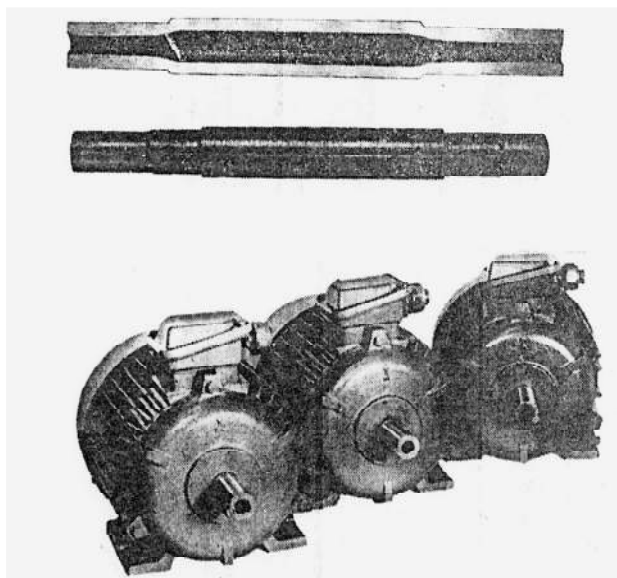
### 3.2. Dotychczasowy stan wiedzy na temat WPK wyrobów drążonych

Pierwsze wzmianki na temat wykorzystania technologii walcowania poprzecznego – klinowego do kształtowania wyrobów drążonych zamieszczone są w literaturze rosyjsko – języcznej [13, 32, 40, 80, 83]. W pracy [13] przedstawiono wyniki prób doświadczalnych, w efekcie których zaproponowano produkcję wałków drążonych stosowanych w silnikach elektrycznych, pokazanych na rys. 3.12.

W pracach [40, 83] przedstawiono w sposób bardzo ogólny potencjalne możliwości jakie daje zastosowanie metody WPK do kształtowania kołnierzy i zakończeń rur. W opracowaniach tych nie podano niestety jakichkolwiek informacji na temat uzyskiwanych dokładności wymiarowych tak produkowanych wyrobów. Brak jest również danych umożliwiających dobór parametrów technologicznych procesu WPK, gwarantujących uzyskanie wyrobów o zakładanej dokładności.

Na szerszą uwagę zasługują rezultaty badawcze uzyskane przez Grigoreva [32] i Celikova [13]. W obu tych pracach zasugerowano stosowanie największych możliwych do przyjęcia, ze względu na stabilny przebieg procesu WPK, kątów rozwarcia klina  $\beta$ . Ponadto, Celikov [13] zaleca stosowanie w przypadku WPK wyrobów drążonych klinów z kątami kształtującymi  $\alpha = 45^\circ$ . Dla uniknięcia niepożądanego wyginania ścianek odkuwki w trakcie walcowania proponuje on również skrócenie strefy

kalibrowania klinów. Dla ustalania maksymalnej wartości kąta rozwarcia klina  $\beta$  autor ten zaproponował stosować nomogram, podany na rys. 3.13.



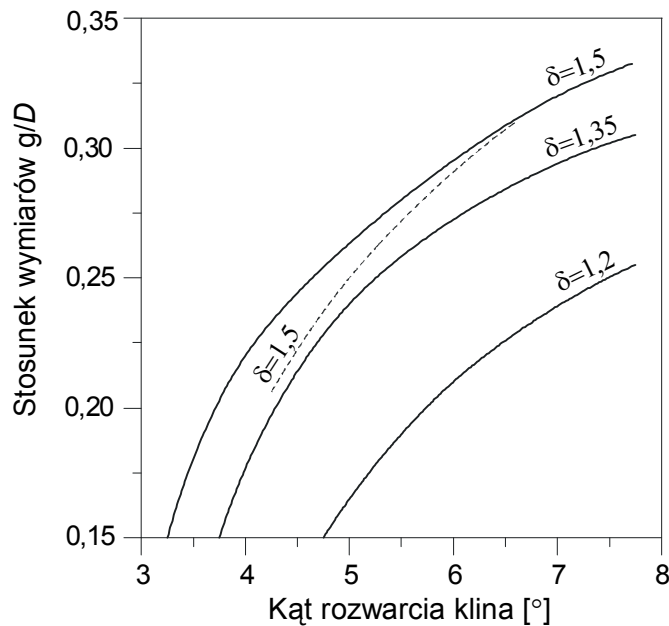
*Rys. 3.12. Walcowane metodą WPK wałki drążone wykorzystane w silnikach elektrycznych [13]*

Celikov ograniczył rozważania do procesów WPK realizowanych przy: stopniu gniotu  $\delta = 1,5; 1,35; 1,2$ , kącie kształtującym  $\alpha = 45^\circ$  i temperaturze procesu  $T = 1150^\circ\text{C}$ . Dobierając kąt  $\beta$  z rys. 3.13 należy pamiętać by był on mniejszy od wartości granicznej. Jest to związane z tym, że w trakcie regeneracji klinów nawiniętych na walce zmniejsza się ich średnica, co powoduje niewielki wzrost wartości tego kąta.

W wyniku prac Grigoreva i in. [32], przeprowadzonych dla procesów WPK przy  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$ , opracowano zależność (3.6) określającą zmianę grubości ścianki wyrobu walcowanego,

$$\frac{D}{g} = 7,65 - 0,127\varepsilon + 0,00095\varepsilon^2, \quad (3.6)$$

w której:  $D$  – zewnętrzna średnica wsadu;  $\varepsilon = 100\% (D - d_n) / D$ ;  $d_n$  – średnica kształtowanej części po walcowaniu;  $g$  – grubość ścianki wsadu. Zgodnie z zaleceniami autorów pracy [32] równanie (3.6) jest słuszne w zakresie  $D/g = 3,4 \div 7,65$ , niezależnie od przyjętych parametrów narzędzi.



**Rys. 3.13.** Dopuszczalne wartości kąta  $\beta$  w zależności od stosunku wymiarów wsadu  $g/D$  oraz stopnia gniotu  $\delta$  (linia kreskowa – rezultaty eksperymentalne) [13]

Z nowszych, aczkolwiek nielicznych, opracowań literaturowych na uwagę zasługują badania dotyczące WPK wyrobów drążonych, które prowadzone są w Chemnitz w Niemczech. Tamtejsi badacze w swoich pracach [28, 57, 58] proponują walcować wyroby drążone z zastosowaniem stałych, bądź ruchomych trzpieni wewnętrznych. Rolą tych narzędzi ma być ograniczenie zaburzeń kształtu, występujących w trakcie WPK wyrobów drążonych. Jednak poza podaniem bardzo ogólnych schematów ideowych procesu w pracach tych nie przedstawia się jakichkolwiek wzmianek na temat przyjmowanych parametrów technologicznych i zastosowanych agregatów roboczych. Brak weryfikacji doświadczalnych lub danych dotyczących aplikacji przemysłowych proponowanych rozwiązań wskazuje na poglądowo – studyjny charakter tych prac. Ośrodki światowe, zajmujące się technologią WPK zlokalizowane w Chinach, Stanach Zjednoczonych, Rosji i Białorusi nie prowadzą obecnie żadnych prac na temat kształtowania wyrobów drążonych.

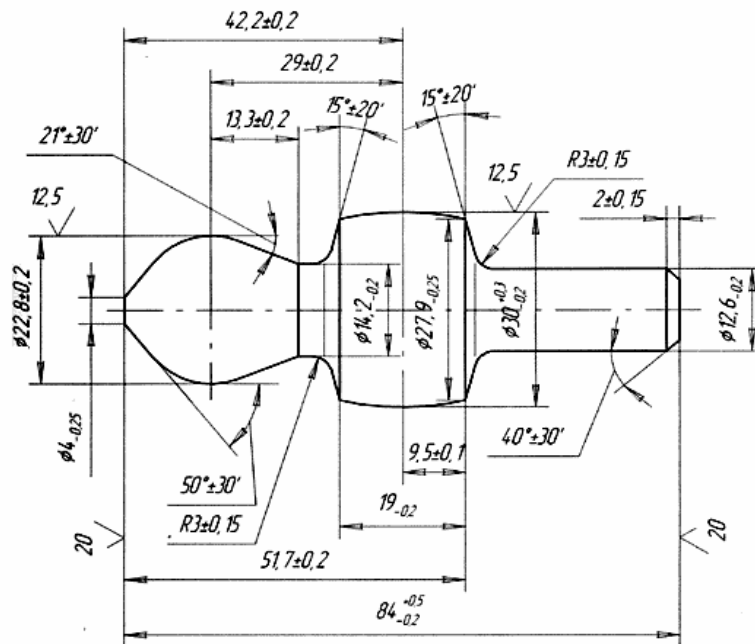
Lukę tę starają się wypełnić autorzy pracy, którzy opublikowali kilka opracowań dotyczących problematyki WPK wyrobów drażonych [6-9, 11, 63, 64]. We wstępnych analizach tego procesu walcowania autorzy wskazują na celowość prowadzenia badań w tym zakresie, zogniskowanych na poszerzeniu obszaru zastosowań technologii WPK. Rezultaty wykonanych badań potwierdzają w części wyniki uzyskane przez badaczy rosyjskich [13, 32], ale wskazują również na potencjalne zagrożenia związane z naruszeniem stabilności przebiegu procesów WPK wyrobów drażonych. Skupiając się na złożonej problematyce doboru parametrów technologicznych procesu, w pracach tych podano użyteczne zakresy parametrów i scharakteryzowano również zagadnienia związane z dokładnością kształtu wyrobów finalnych. Badania te potwierdziły także, że zastosowanie w miejsce wsadów pełnych elementów drażonych eliminuje powstawanie pęknięć wewnętrznych, mogących wystąpić w strefach osiowych wyrobów walcowanych. Wyłączenie tego krytycznego, z punktu widzenia poziomu jakości produkcji, zagrożenia znacznie ułatwia projektowanie procesów technologicznych, a w konsekwencji pomniejsza jednostkowe koszty wytworzenia danego wyrobu. Jak już uprzednio wspomniano, walcowanie wyrobów drażonych pozwala także na ograniczenie ilości metalu stanowiącego niezbędny odpad technologiczny. Reasumując stwierdza się, że zastosowanie wsadów drażonych pozwala na uproszczenie technologii i czyni ją bardziej proekologiczną.

Ponieważ technologia WPK nie znalazła dotąd szerszego, przemysłowego zastosowania w kształtowaniu wyrobów drażonych, trudno jest bezpośrednio odnieść się do przemysłowych tolerancji wytwórczych tego rodzaju odkuwek. Za porównanie mogą tu jedynie posłużyć przykłady walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów pełnych, dla których tolerancje wymiarowe zostały stabilaryzowane i są podane w literaturze specjalistycznej, np. pozycja [66]. Przykład odkuwki ilustrujący dokładności wykonawcze, możliwe do uzyskania walcowaniem poprzeczno – klinowym, pokazano na rys. 3.14.

### 3.3. Podsumowanie przeglądu literatury

Analiza procesów kształtowania wyrobów drażonych oraz określenie ekonomiczno – technologicznych aspektów uzasadniających dobór właściwej technologii wytwórczej było przedmiotem wielu prac, zarówno o charakterze teoretycznym, jak i doświadczalnym, popartym praktyką przemy-

słową. Prezentowane w literaturze rozwiązania z zakresu wytwarzania rurowych elementów konstrukcyjnych pokazują możliwości wykonawstwa coraz to nowszych, często zaskakujących form, lekkich konstrukcji ażurowych, dzięki którym osiągnię są również znaczne oszczędności materiałowe. Nie bez znaczenia jest także fakt, że technologie te są proekologiczne, a poprzez zmniejszenie kosztów materiałowych, także bardziej rentowne.



**Rys. 3.14.** Tolerancje wytwórcze przykładowego wyrobu kształtowanego w technologii WPK [98]

Szeroki wachlarz zastosowań technologii rurowych we wszelkiego rodzaju konstrukcjach budowlanych przemawia za zasadnością stosowania elementów tego typu w przemyśle maszynowym. Jednak zastosowanie 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 poprzednim 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. Zestawienie tabelaryczne (tab. 2.1), omówionych metod wytwórczych, przedstawia wady i zalety technologii stosowanych do wytwarzania wyrobów drążonych. Za najkorzystniejsze, na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego, techniki wytwarzania stopniowanych wałków drążonych uznawane są: kucie na kowarkach oraz metody wyciskania na zimno, łączone ze zgrzewaniem tarciovym lub głębokim wierceniem [1, 2].

Na tle dotychczas stosowanych technologii 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 [6, 64], nie można stosować reguł projektowych, wykorzystywanych przy projektowaniu technologii walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów pełnych, bezpośrednio w trakcie opracowywania procesów WPK wyrobów drążonych. Tym samym występuje konieczność podjęcia prac badawczych zmierzających do opracowania wytycznych pozwalających na dobór parametrów technologicznych procesu WPK z wsadów drążonych, gwarantujących stabilność walcowania i uzyskanie wyrobów o zakładanej dokładności.



## **4. MODELOWANIE NUMERYCZNE WPK WYROBÓW DRAŻONYCH**

### **4.1. Zastosowana metoda obliczeń**

Do modelowania numerycznego procesów WPK z wsadów drażonych, wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Metoda ta obecnie stanowi standard w analizie wszelkich zadań z zakresu mechaniki. O ogromnym zainteresowaniu tą metodą świadczy np. liczba konferencji naukowych poświęconych tematyce wykorzystania MES w analizie różnych problemów naukowych i technicznych. Wzrasta również liczba pakietów programów komputerowych przeznaczonych do projektowania i optymalizacji procesów kształtowania plastycznego. Ważniejsze z tych programów to: MSC.SuperForm, Deform, Forge3, Qform, Optris, Indeed.

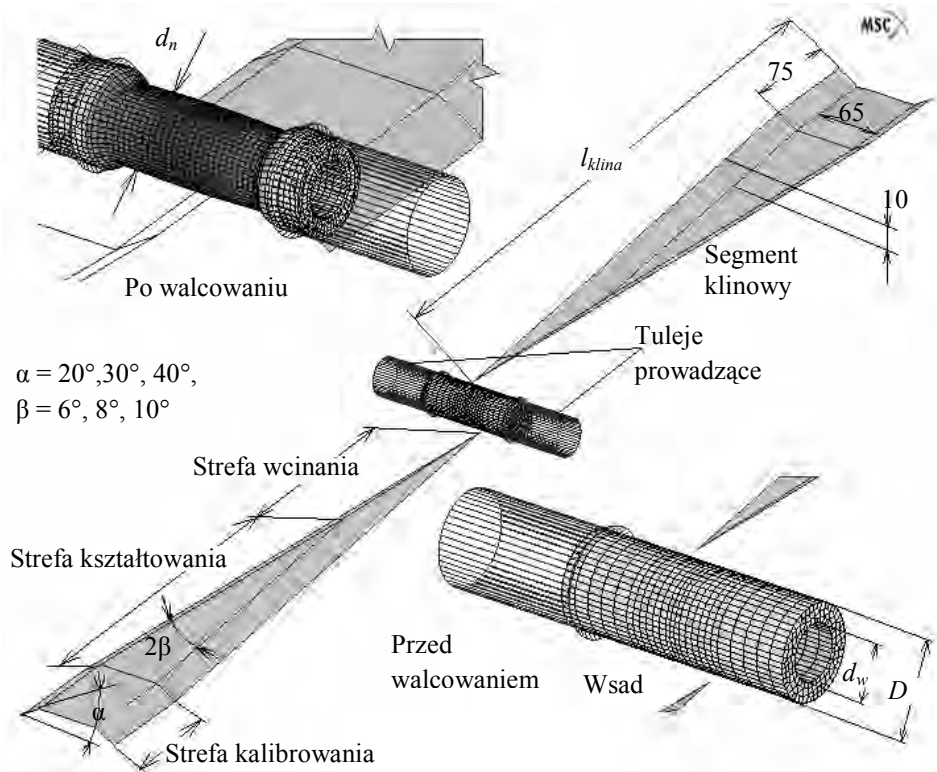
Metoda elementów skończonych była już wielokrotnie z powodzeniem stosowana do analizy procesów WPK z wsadów pełnych [19, 20, 24, 28, 49-52, 78, 79, 90]. Autorzy tych opracowań korzystając z MES obliczali rozkłady odkształceń i naprężeń w wyrobach, wyznacжали parametry siłowe, analizowali zjawiska zakłócające stabilność kształtowania, a nawet badali nowe metody walcowania poprzecznego.

W bieżącej analizie wykorzystano program MSC.SuperForm 2002, bazujący na reprezentacji przemieszczeniowej MES, a następnie jego nowszą wersję MSC.SuperForm 2004. Program ten może być stosowany do mechanicznej lub termo – mechanicznej symulacji procesów kształtowania metali, realizowanych w warunkach: płaskiego, osiowo – symetrycznego lub przestrzennego stanu odkształcenia [56]. Możliwość zastosowania opcji przebudowy siatki elementów, opisujących analizowaną geometrię wyrobu, pozwala na prowadzenie badań numerycznych w szerokim (często hipotetycznym) zakresie parametrów badanych procesów kształtowania plastycznego.

Ze względu na złożoność zagadnienia proces WPK wyrobów drążonych może być symulowany wyłącznie w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D). Fakt ten w powiązaniu z występującymi nieliniowościami (materiałowymi, geometrycznymi, warunków brzegowych) oraz dużym – w stosunku do rozmiarów wsadu – skokiem narzędzi powoduje, że czas obliczeń jest bardzo długi. W wielu przypadkach, w obliczeniach wykonywanych na komputerze osobistym PC z procesorem Pentium 2,0 GHz, wynosił on nawet 3÷6 dni. Dla skrócenia czasochłonności analiz numerycznych można zastosować następujące postulaty:

- założyć, że kształtowanie metodą WPK przebiega w warunkach izotermicznych;
- w przypadku procesów symetrycznych analizę ograniczyć do jednej połowy wyrobu;
- stosować narzędzia w kształcie klinów płaskich z pominięciem strefy prowadzenia oraz zaokrągleń krawędzi;
- przyjmować stałą wartość czynnika tarcia na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami;
- przyjmować, że narzędzia są sztywne i nie odkształcają się w trakcie walcowania;
- nie uwzględniać tarcia pomiędzy materiałem a tulejami prowadzącymi.

Uwzględniając powyższe postulaty, na potrzeby obliczeń, opracowano szereg modeli geometrycznych procesów WPK z wsadów drążonych, z których jeden pokazano na rys. 4.1. W skład każdego modelu wchodzi dwa kliny płaskie (poruszające się w kierunkach przeciwnych, z prędkością 0,06 m/s każdy), wsad modelowany za pomocą 8-węzłowych elementów prostopadłościennych oraz dwie tuleje ustalające pozycję odkuwki w trakcie walcowania. Jako wsad przyjmowano rury o średnicy zewnętrznej  $\varnothing 30$  mm oraz średnicach wewnętrznych równych odpowiednio:  $\varnothing 9$ ,  $\varnothing 12$ ,  $\varnothing 15$  i  $\varnothing 18$  mm. Długość wsadu wynosiła 180 mm. Wymiary narzędzi i wsadu przyjęto w ten sposób, by istniała możliwość skonfrontowania wyników obliczeń z rezultatami prowadzonych eksperymentów.



**Rys. 4.1.** Model geometryczny procesu WPK klinami płaskimi, wraz z zaznaczonymi ważniejszymi parametrami geometrycznymi

Ze względu na bardzo duże odkształcenia w symulacji procesu WPK dochodzi do znacznych zniekształceń siatki elementów. Kontynuacja obliczeń wymaga przebudowy tej siatki, czyli tzw. remeshing'u. Wykorzystywane w obliczeniach oprogramowanie MSC.SuperForm uzależnia moment, w którym następuje przebudowa siatki od liczby wykonanych iteracji obliczeniowych (narzuconej przez użytkownika) lub określonego arbitralnie przyrostu intensywności odkształcenia. W bieżącej analizie stosowano opcję odkształceniową, a przebudowując siatkę korzystano z elementów prostopadłościennych oraz walcowego układu współrzędnych.

## 4.2. Zakres obliczeń

Projektowanie narzędzi do WPK w praktyce ogranicza się do doboru kątów klina (kształtującego  $\alpha$  i rozwarcia  $\beta$ ), na podstawie których, po uwzględnieniu geometrii odkuwki, oblicza się pozostałe wymiary klinów.

Metodyce doboru narzędzi w przypadku WPK poświęcono wiele prac badawczych (cytowanych w podrozdziale 3.1 niniejszej pracy). W efekcie tych prac ustalono, że kąt kształtujący  $\alpha$  należy dobierać w zakresie  $15^\circ \div 45^\circ$ , zaś kąt rozwarcia klina  $\beta$  powinien wynosić  $5^\circ \div 15^\circ$ . Uwzględniając te wytyczne oraz korzystając z doświadczeń Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej dobrano następujące kąty klinów:  $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  oraz  $\beta = 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ . Zestawiając ze sobą poszczególne kąty uzyskano 9 par klinów (tabela 4.1), które wykorzystywano w obliczeniach numerycznych.

Trzecim zmienianym w trakcie obliczeń parametrem był stopień gniotu  $\delta$ , uznawany za podstawową miarę odkształcenia plastycznego w procesach WPK [62]. Parametr ten definiowany jest jako stosunek średnicy zewnętrznej wsadu  $D$  do średnicy po walcowaniu  $d_n$ , czyli:

$$\delta = \frac{D}{d_n}. \quad (4.1)$$

Założono, że symulacje procesów WPK będą dotyczyć przypadków walcowania w których średnica nominalna kształtowanego przewężenia  $d_n$  będzie równa: 26; 24; 22 oraz 20 mm. Zatem po uwzględnieniu, że średnica wsadu  $D = 30$  mm, można podać, że przyjmowane w obliczeniach (dla każdej pary klinów) stopnie gniotu  $\delta$  wynosiły: 1,15; 1,25; 1,36 oraz 1,5.

Dla każdego zestawu parametrów procesu (tj. przy określonym  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\delta$ ) rozważano cztery przypadki kształtowania, odpowiadające stosowaniu wsadu o średnicy wewnętrznej  $d_w$  równej 18, 15, 12 i 9 mm. Reasumując w ramach analizy numerycznej przebadano 144 przypadki kształtowania klinami płaskimi odkuwek walcowanych z wsadów drążonych.

Dodatkowo w ramach pracy przeanalizowano następujące przypadki WPK wyrobów drążonych:

- walcowanie klinami płaskimi z wykorzystaniem trzpieni stałych,
- walcowanie za pomocą trzech walców klinowych,
- walcowanie za pomocą jednego klina płaskiego i dwóch rolek profilowych,
- walcowanie korpusu noża obrotowego z uwzględnieniem zjawisk cieplnych występujących podczas kształtowania.

**Tab. 4.1.** Kąty  $\alpha$  i  $\beta$  klinów, przyjmowane w obliczeniach numerycznych

Lp.	Kąt kształtujący $\alpha$	Kąt rozwarcia klina $\beta$	Iloczyn $\text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\beta$
1	20°	6°	0,0382
2	20°	8°	0,0511
3	20°	10°	0,0642
4	30°	6°	0,0607
5	30°	8°	0,0811
6	30°	10°	0,1018
7	40°	6°	0,0882
8	40°	8°	0,1179
9	40°	10°	0,1479

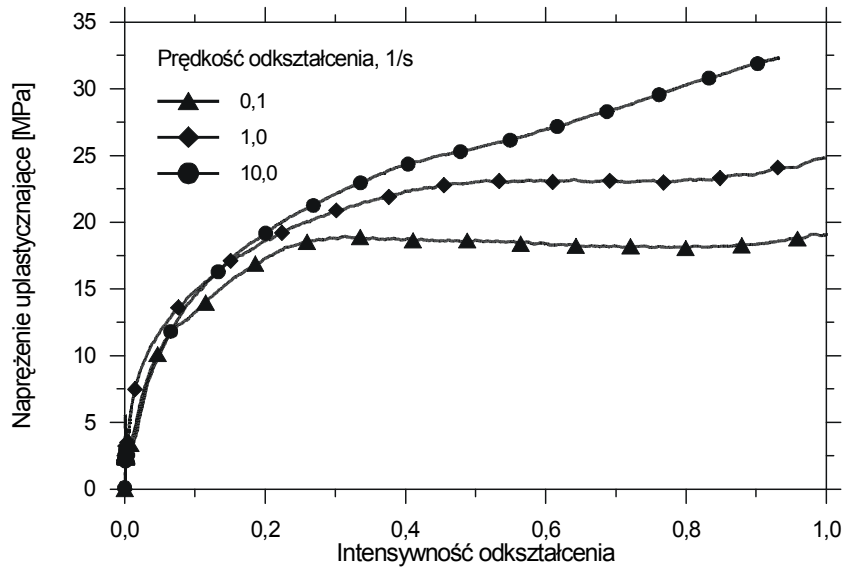
### 4.3. Model materiałowy

Analizując procesy WPK z wsadów drażonych założono, że kształtowanie jest realizowane w temperaturze pokojowej, a walcowanym materiałem jest ołów w gatunku Pb1. Zastosowany materiał dobrze odtwarza w tych warunkach zachowanie stali na gorąco [77]. W celu wprowadzenia do programu niezbędnych danych dotyczących modelu materiałowego zastosowanego ołowiu, wykonano badania plastometryczne na dylatometrze DIL 805 A/D, znajdującym się w Politechnice Częstochowskiej. W rezultacie tych prac wyznaczono krzywe płynięcia ołowiu Pb1 w temperaturze 20°C, które zamieszczono na rys. 4.2.

Praktyczne wykorzystanie wyników z badań plastometrycznych w programie MSC.SuperForm wymagało opisanie otrzymanych krzywych płynięcia funkcją (równaniem konstytutywnym). Do tego celu zastosowano program komputerowy „Krzywe” znajdujący się na wyposażeniu Katedry. Na podstawie serii obliczeń ustalono następującą postać równania konstytutywnego, dla badanego ołowiu w gatunku Pb1:

$$\sigma_p = 2,78 + 19,31 \varepsilon^{0,209} \dot{\varepsilon}^{0,066} [\text{MPa}], \quad (4.2)$$

gdzie:  $\sigma_p$  – naprężenie uplastyczniające,  $\varepsilon$  – odkształcenie,  $\dot{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia.



Rys. 4.2. Krzywe płynięcia dla ołowiu Pb1 w temperaturze 20°C [77]

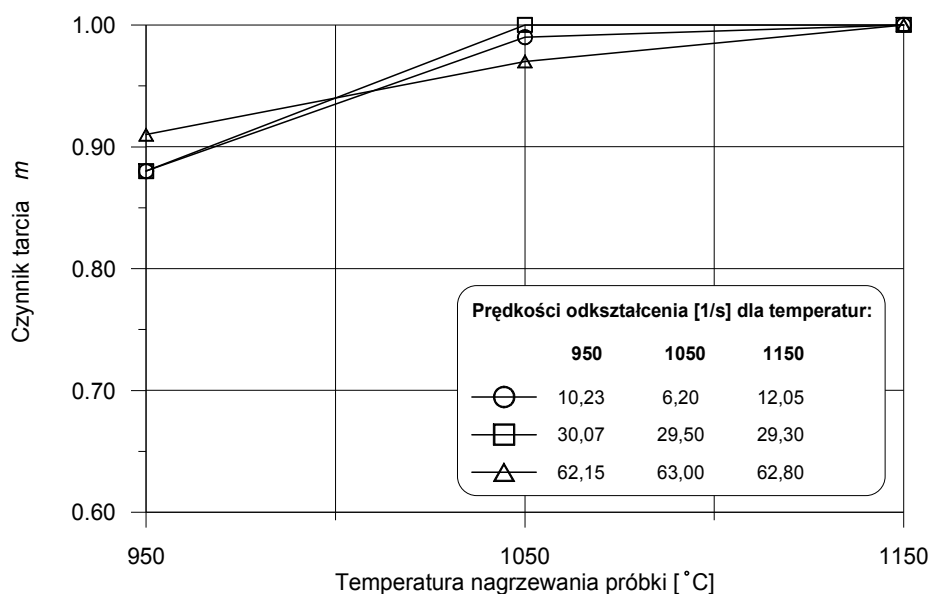
Pozostałe, przyjmowane w obliczeniach numerycznych dane materiałowe to: gęstość  $\rho = 11200 \text{ kg/m}^3$ , moduł Young'a  $E = 18000 \text{ MPa}$  i współczynnik Poisson'a  $\nu = 0,42$ .

Analizując przypadki walcowania korpusu noża obrotowego stosowano termo – mechaniczny schemat obliczeń MES przyjmując, że kształtowany materiał to stal w gatunku C45. Pełny model materiałowy tej stali wczytywano z biblioteki programu MSC.SuperForm, wykorzystywanego w obliczeniach numerycznych.

#### 4.4. Model tarcia

Z uwagi na zmiany kierunku sił tarcia na powierzchni kontaktu materiał – narzędzie w analizach numerycznych przyjęto model tarcia stałego, uzależniony od prędkości poślizgu metalu względem narzędzia, opisany równaniem:

$$\tau = -m k \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_p}{a_p}\right) \frac{v_p}{|v_p|}, \quad (4.3)$$



**Rys. 4.3.** Zależność czynnika tarcia od temperatury nagrzewania próbki wyznaczona w próbie spęczania przy prędkościach odkształcenia podanych na rysunku [29]

gdzie:  $m$  – czynnik tarcia;  $v_p$  – wektor prędkości poślizgu;  $a_p$  – współczynnik o kilka rzędów mniejszy niż prędkość poślizgu,  $k$  – granica plastyczności materiału przy czystym ścinaniu.

W obliczeniach numerycznych przyjmowano graniczną wartość czynnika tarcia  $m = 1$ . W przypadku stali kształtowanej na gorąco bez smarowania w pracy [29] wykazano, że współczynnik tarcia  $\mu$  i czynnik tarcia  $m$  zwiększają swoją wartość wraz ze wzrostem temperatury próbki. Równocześnie nie obserwuje się wyraźnego wpływu prędkości odkształcenia na te wielkości. Na podstawie tych badań stwierdzono, że współczynnik tarcia  $\mu$  wzrasta od wartości  $\mu = 0,38 \div 0,40$  przy temperaturze próbki równej  $950^\circ\text{C}$  do  $\mu = 0,5$  przy temperaturze równej  $1150^\circ\text{C}$ . Natomiast czynnik tarcia  $m$  osiąga wartość graniczną już przy temperaturze  $1050^\circ\text{C}$  – rys. 4.3.

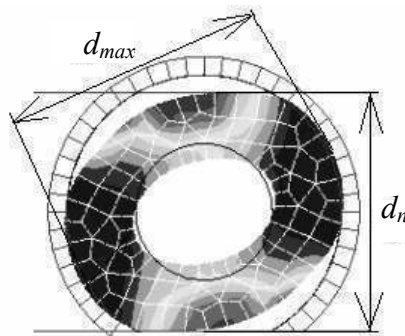
Za przyjmowaniem granicznych wartości czynnika tarcia w procesach WPK przemawia również sposób przygotowania powierzchni kształtujących narzędzi. Mianowicie na powierzchniach tych celowo nacina się rowki, zabezpieczając się w ten sposób przed niepożądanym poślizgiem.

Dodatkowo, aby zbadać wpływ zmian wielkości czynnika tarcia na proces WPK z wsadów drążonych, przeprowadzono szereg symulacji numerycznych, w których zmieniano  $m$  w zakresie od  $m = 1$  do  $m = 0,3$ .

#### 4.5. Przykładowe wyniki obliczeń

Na podstawie wykonanych obliczeń numerycznych analizowano wpływ poszczególnych parametrów geometrycznych na przebieg procesu WPK oraz na kształt wyrobu finalnego (wałka drążonego z centralnie ukształtowanym przewężeniem). Analizę dotyczącą kształtu wałka ograniczono do pomiarów zewnętrznych średnic, oceny odchyłek kołowości oraz pomiarów grubości ścianek odkuwki – w przekrojach wzdłużnych i poprzecznych. Ze względu na kinematykę płynięcia materiału w trakcie kształtowania, przekrój poprzeczny wyrobu ulega silnej owalizacji, która powinna być usuwana w strefie kalibrowania. Częstokroć jednakże owalizacja ta nie jest usunięta w sposób zadowalający. W celu umożliwienia dokonania analizy porównawczej wpływu poszczególnych parametrów WPK na wielkość owalizacji wprowadzono parametr  $\Delta$  (rys. 4.4), który zdefiniowano jako różnicę średnic: maksymalnej  $d_{max}$  i nominalnej  $d_n$  kształtowanego stopnia odkuwki.

$$\Delta = d_{max} - d_n. \quad (4.4)$$

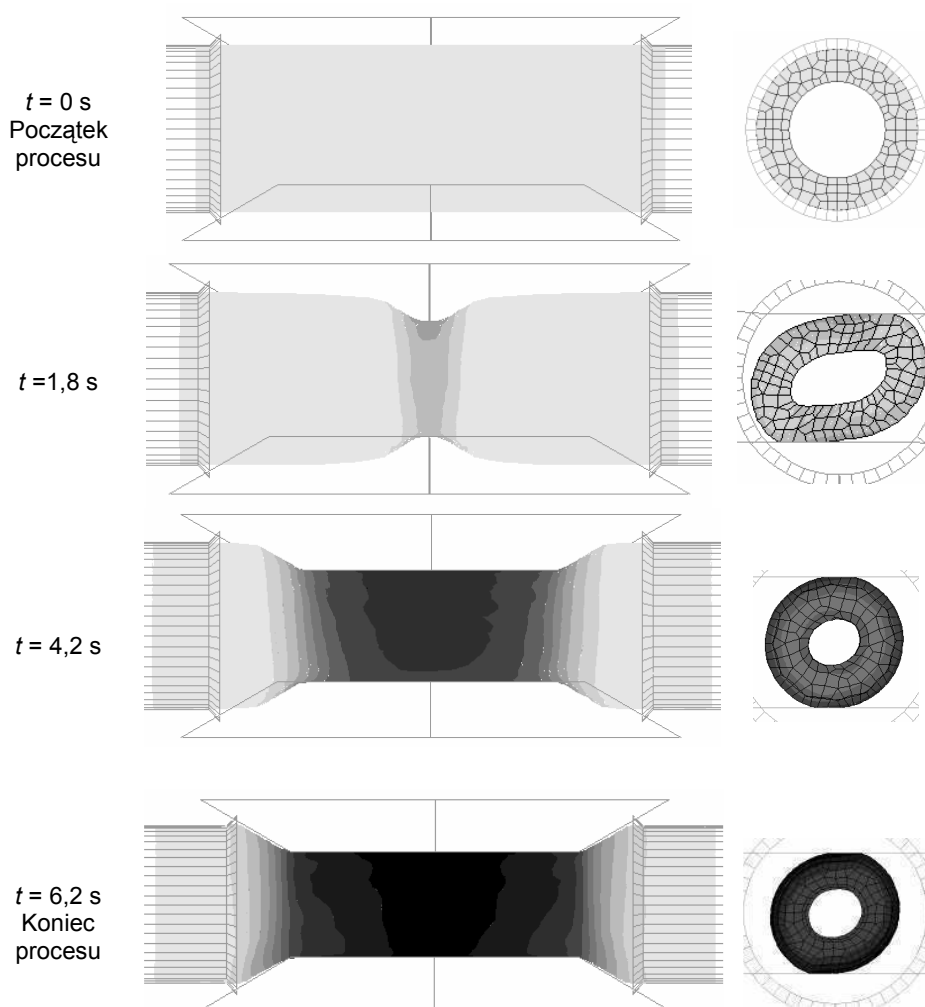


Rys. 4.4. Schemat ilustrujący sposób wyznaczania owalizacji przekroju poprzecznego wyrobu

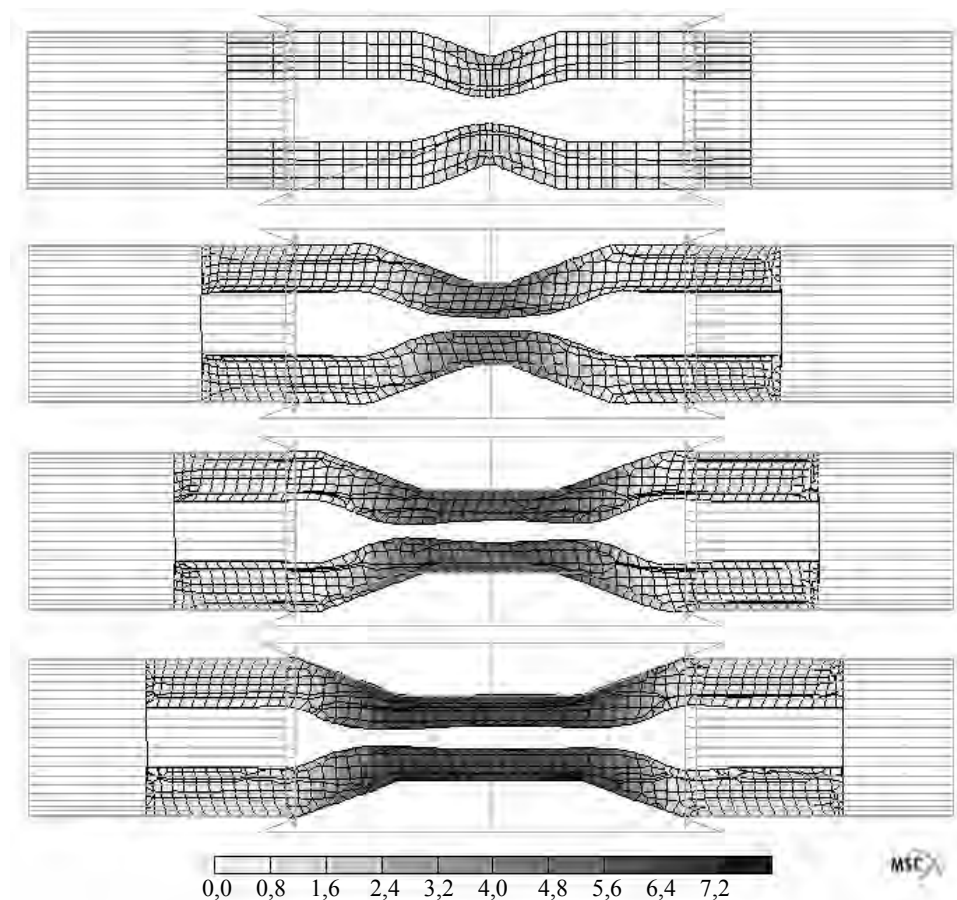


W trakcie obliczeń analizowano również progresję kształtu odkuwki w trakcie walcowania – rys. 4.5, głównie ze względu na określenie tych parametrów procesu, przy których zaburzona zostanie stabilność kształtowania.

Analizując kształt przekroi wzdłużnych zamodelowanych numerycznie wyrobów stwierdzono, że grubości ścianek odkuwek ulegają zmianie. Mianowicie kształt wewnętrzny odkuwki jest lekko beczkowaty – rys. 4.6. Poza tym grubość ścianek wyrobu, w zależności od użytych parametrów może się zwiększać lub zmniejszać i to w szerokim zakresie.



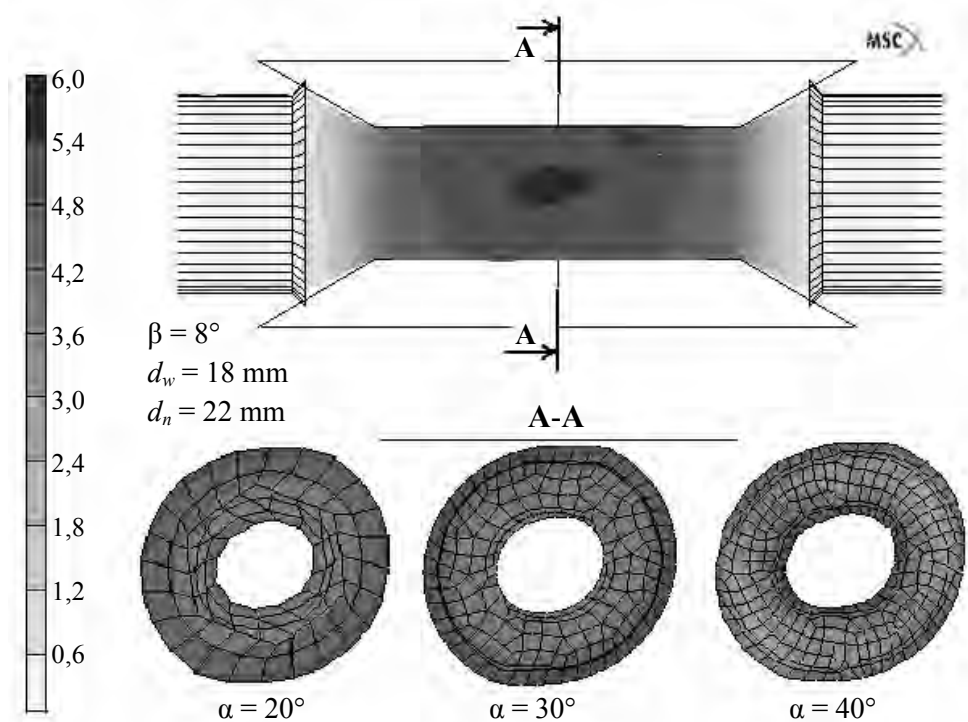
**Rys. 4.5.** Zmiany kształtu odkuwki wałka drążonego w procesie WPK przy:  
 $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ ,  $d_w = 18$  mm,  $d_n = 20$  mm



**Rys. 4.6.** Rozkłady intensywności odkształcenia w przekroju wzdłużnym kształtowanego wałka przy zaawansowaniu procesu (od góry) 25%, 50%, 75% i 100% oraz  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=6^\circ$ ,  $\delta=1,36$ )  $d_w=12$  mm

Na podstawie analizy danych uzyskiwanych dla przekroi wzdłużnych (rys. 4.6) i poprzecznych (rys. 4.7) wnioskowano o wpływie podstawowych parametrów procesu WPK na uzyskiwany rozkład odkształcenia.

Ponadto, analizując wyniki obliczeń, dużo uwagi poświęcono parametrom siłowym procesu, w szczególności sile wciskającej klin oraz sile rozporowej, która przyjmuje największe wartości (spośród wszystkich składowych siły walcowania) [30].



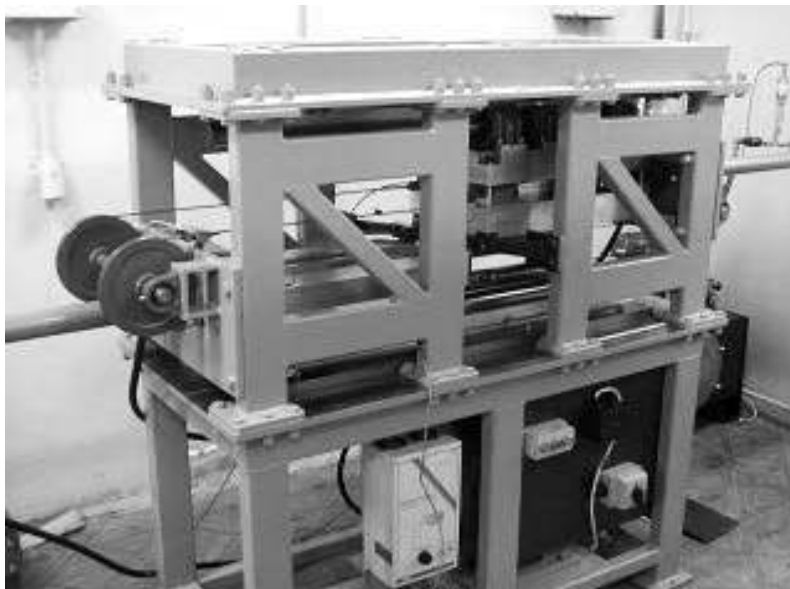
**Rys. 4.7.** Przykłady rozkładów odkształceń w przekroju poprzecznym odkuwki w procesach WPK realizowanych przy parametrach podanych na rysunku

## 5. BADANIA DOŚWIADCZALNE

### 5.1. Stanowisko badawcze

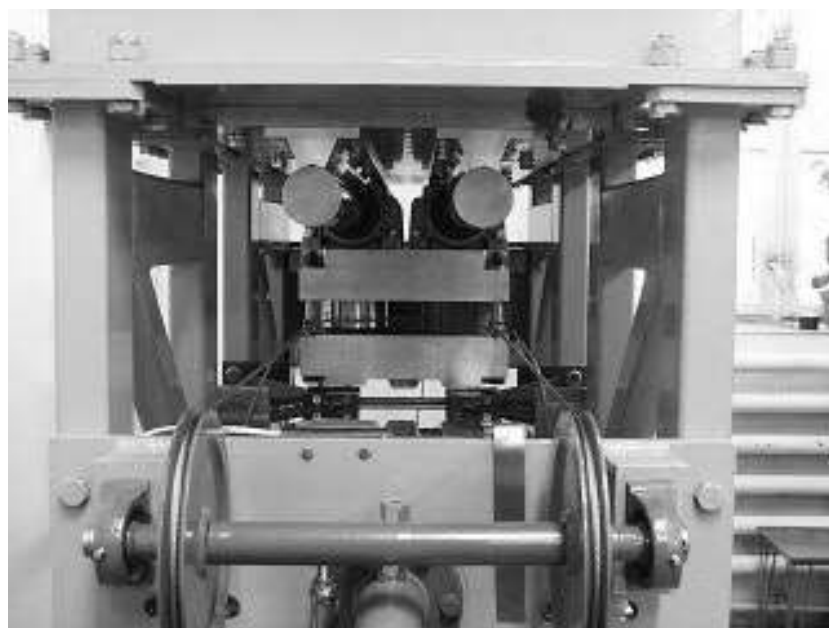
Badania doświadczalne wykonywano wykorzystując płasko – klinową walcarkę laboratoryjną LUW-2 (przedstawioną na rys. 5.1), znajdującą się na wyposażeniu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.

Walcarka LUW-2 składa się z klatki roboczej, suwaka górnego i dolnego, zespołu napędowego oraz korpusu. Całość wykonana jest jako konstrukcja skręcana, a klatka robocza składa się z dwóch ażurowych płyt połączonych za pomocą ośmiu kolumn. Do płyt przytwierdzono prowadnice z wałkami, po których przesuwają się suwaki ułożyskowane w 8 łożyskach



*Rys. 5.1. Walcarka laboratoryjna LUW-2*

każdy. Suwaki zbudowane są z dwóch płyt (górnej i dolnej) połączonych śrubami łącznikowymi. Łożyska przykręcane są do płyty dolnej, zaś narzędzia klinowe do płyty górnej. Pomiar siły rozporowej realizowany jest za pośrednictwem dwóch czujników nacisku typu FT-5304, które umieszczono pomiędzy płytami suwaka górny w sposób zgodny z rys. 5.2.

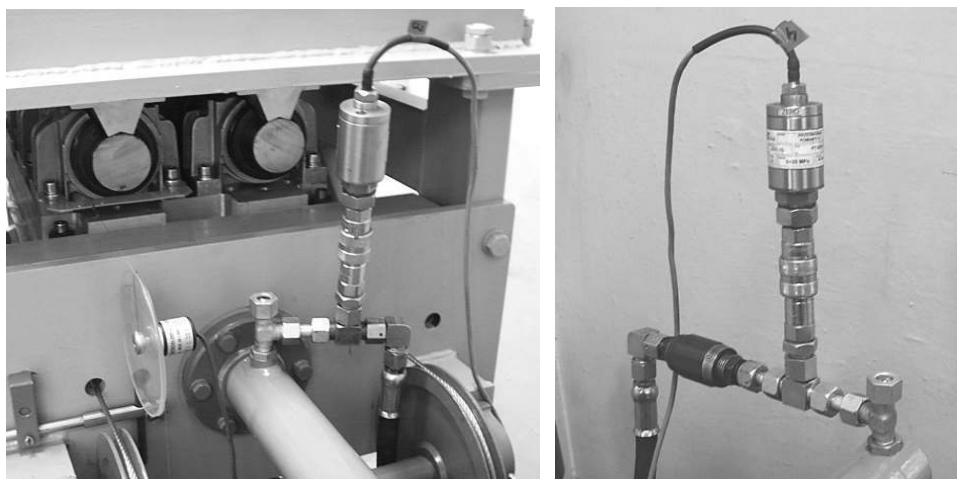


**Rys. 5.2.** Mierniki siły FT-5304 zainstalowane w suwaku górnym

Ruch suwaków realizowany jest za pomocą dwóch siłowników hydraulicznych o skoku maksymalnym 630 mm, napędzanych zasilaczem hydraulicznym wyposażonym w silnik elektryczny o mocy 11 kW.

Przy maksymalnym ciśnieniu roboczym wynoszącym 20 MPa siła uzyskiwana na każdym z siłowników osiąga wartość 39 kN. Jeden z siłowników wyposażony został w dwa przetworniki ciśnienia PT-5261, umieszczone w sposób zgodny z rys. 5.3. Umożliwiło to w sposób pośredni wyznaczyć wartości siły stycznej (wciskającej klin) w trakcie procesu WPK. Niezbędny do prawidłowej realizacji procesu kształtowania jednoczesny ruch suwaków został uzyskany przez zastosowanie synchronizującego układu linowego. Walcarkę wyposażono w specjalny cyfrowy układ pomiarowy, szczegółowo opisany w opracowaniu [43]. Układ ten umożliwia reje-

stracę w trakcie walcowania: prędkości liniowej klina, prędkości obrotowej walcowanego wyrobu, siły stycznej i siły rozporowej. Pomiar wszystkich parametrów został zsynchronizowany z ruchem klina górnego i był dokonywany co 1 mm przemieszczenia tego narzędzia.

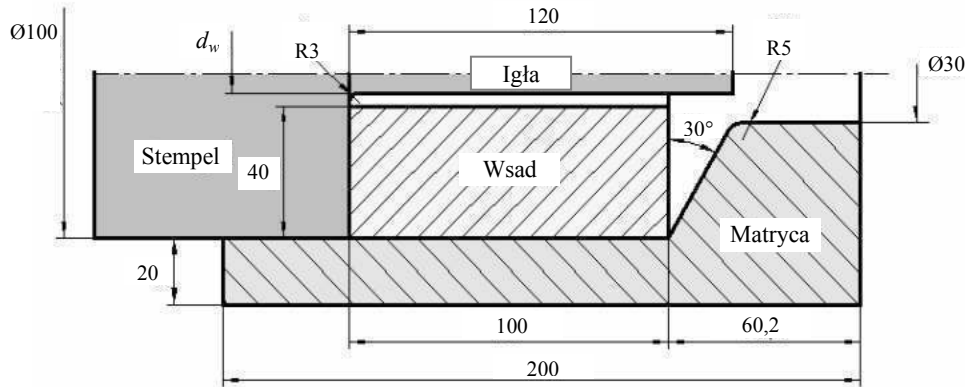


*Rys. 5.3. Przetworniki ciśnienia PT-5261 zainstalowane na siłowniku hydraulicznym oraz miernik prędkości obrotowej wykorzystywany do wyznaczania prędkości liniowej suwaka górnego (po lewej)*

## 5.2. Przygotowanie próbek do badań

Do wykonania wsadu (tulei) zastosowano metodę wyciskania wspólnego, wg schematu podanego na rys. 5.3, na którym naniesiono również ważniejsze parametry geometryczne procesu. Przyjęty sposób wyciskania wymagający stosowania stempli kształtujących z pilotem jest szczegółowo opisany m. in. w opracowaniu [5].

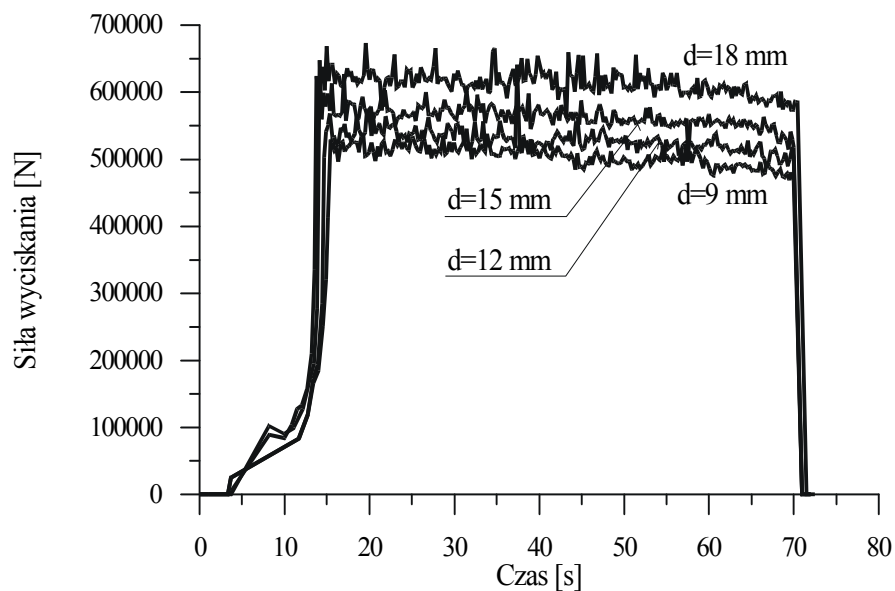
W celu określenia wartości sił niezbędnych do realizacji procesów kształtowania przeprowadzono analizę numeryczną poszczególnych przypadków wyciskania. Obliczenia wykonano w systemie MSC.SuperForm 2002, bazującym na MES. Analizę zagadnienia wykonano przyjmując parametry geometryczne procesu zgodnie z rys. 5.3, prędkość przesuwu stempla  $v = 1,5$  mm/s, czynnik tarcia na powierzchni styku materiał – narzędzie  $m = 0,2$  oraz temperaturę kształtowania  $T = 20^\circ$  C. Ponadto założono, że krzywa płynięcia kształtowanego materiału określona jest zależnością (4.2).



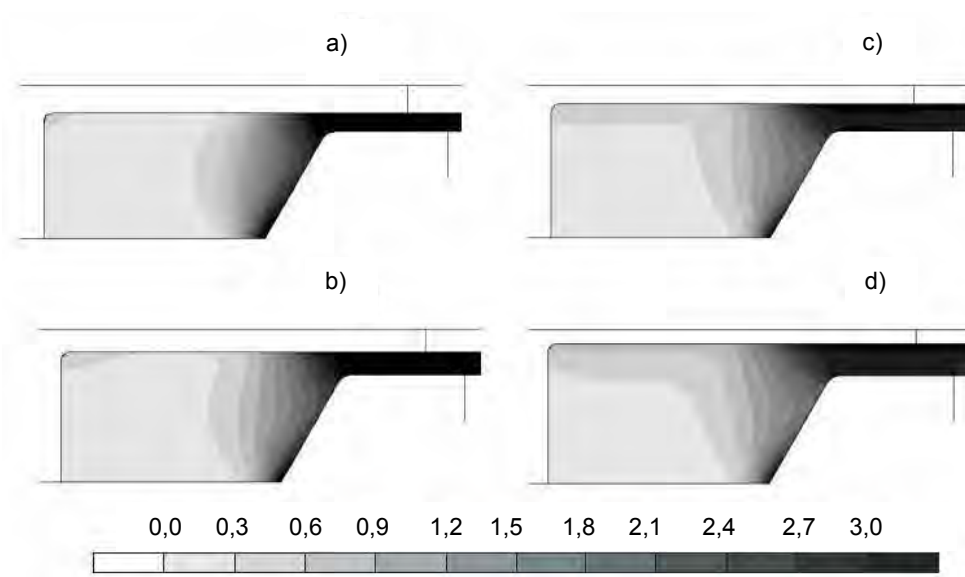
**Rys. 5.3.** Schemat procesu wyciskania wspólnego wsadu drążonego (rury), gdzie:  $d_w = 9, 12, 15$  lub  $18$  mm [5]

Rozkłady sił wyciskania obliczone dla rozważanych przypadków kształtowania zestawiono na rys. 5.4. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że siły kształtowania na stemplu osiągają maksymalne wartości po około 15 s, czyli wówczas, gdy wykrój zostaje całkowicie wypełniony. Dalsza część procesu przebiega w sposób stabilny przy ustalonych wartościach siły wyciskania. Obliczone średnie wartości sił, dla fazy ustalonej procesu wynoszą:  $502 \pm 12$  kN,  $526 \pm 12$  kN,  $563 \pm 11$  kN,  $602 \pm 13$  kN odpowiednio dla wyciskania wałków drążonych o średnicach wewnętrznych  $\varnothing 18$ ,  $\varnothing 15$ ,  $\varnothing 12$  i  $\varnothing 9$  mm. Oznacza to, że dwukrotne zmniejszenie średnicy otworu rury ( $\varnothing 18 \rightarrow \varnothing 9$ ) powoduje wzrost siły o około 12%.

Zastosowanie MES umożliwia również śledzenie zmian w rozkładach odkształceń obserwowanych w przekroju wzdłużnym (osiowym) kształtowanej rury. Na rys. 5.5 pokazano rozkłady intensywności odkształcenia wyznaczone dla analizowanych procesów kształtowania, dla jednakowego czasu  $t = 25$  s, w którym proces ten przebiega w sposób ustalony. Z obliczeń wynika, że zmniejszenie średnicy wewnętrznej rury doprowadza do zwiększenia obszaru stref, w których materiał ulega płynięciu plastycznemu. Jest to efektem bardziej intensywnego spęczania cylindrycznej części tulei, w trakcie którego materiał ulega płynięciu w kierunku promieniowym na całej długości próbki. Po całkowitym wypełnieniu wykroju materiał odkształca się wyłącznie w kierunku wzdłużnym [61].



Rys. 5.4. Obliczone rozkłady siły wciskającej stempel dla analizowanych procesów wyciskania współbieżnego rur [5]



Rys. 5.5. Rozkłady intensywności odkształcenia w kształtowanych tulejach obliczone przy założeniu, że średnica wewnętrzna równa jest: a) 18 mm; b) 15 mm; c) 12 mm; d) 9 mm





*Rys. 5.6. Oprzyrządowanie do kształtowania próbek rurowych (a) oraz przykładowe próbki otrzymane w warunkach laboratoryjnych (b)*

Wyniki obliczeń MES potwierdziły możliwość wykonania (w warunkach laboratoryjnych KKMiTOP) rur z ołowiu. Dlatego też, przyjmując parametry takie jak na rys. 5.3 wykonano oprzyrządowanie, które zabezpieczało wyciskanie tulei w oparciu o prasę hydrauliczną, o maksymalnej sile nacisku 1 MN.

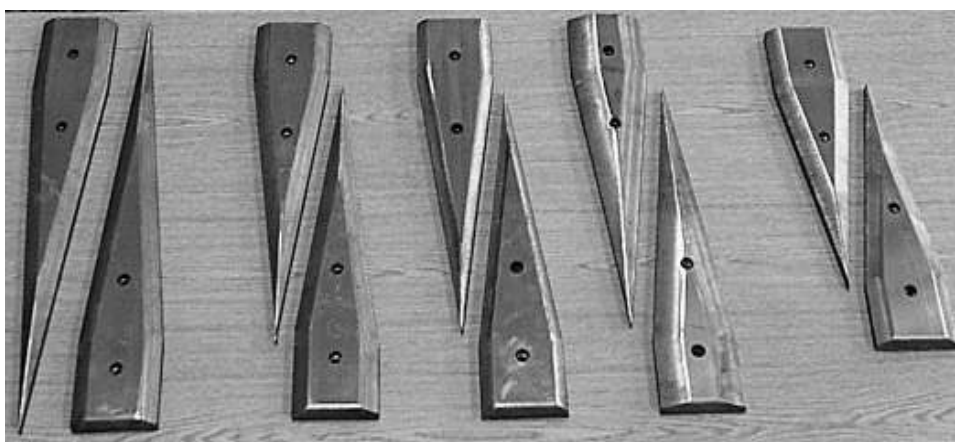
Stosując to oprzyrządowanie (rys. 5.6a) wykonano próby laboratoryjnego wyciskania współbieżnego tulei. Próby te potwierdziły możliwość wykonawstwa próbek rurowych (stosowanych w badaniach doświadczalnych procesów WPK wyrobów drążonych), w warunkach laboratoryjnych Katedry. Przykładowe próbki uzyskane metodą wyciskania pokazano na rys 5.6b.

W celu przeprowadzenia prób walcowania wyrobów drążonych w warunkach obróbki plastycznej na zimno [22, 92] stosowano natomiast próbki wykonane z aluminium, w gatunku A0, o wymiarach identycznych jak próbki z ołowiu. W tym wypadku próbki wykonywano metodami obróbki skrawaniem.

### **5.3. Zakres badań doświadczalnych**

W celu doświadczalnego zweryfikowania wyników obliczeń numerycznych badanego procesu WPK, wykonano zestawy klinów kształtujących o wymiarach takich samych jak przyjęte w obliczeniach. Z uwagi na wysoki koszt wykonania narzędzi w badaniach laboratoryjnych ograniczono się do

zastosowania 5 wybranych zestawów segmentów narzędziowych (rys. 5.7). Przy czym dobór klinów do badań doświadczalnych, zilustrowany graficznie w tabeli 5.1, umożliwił prześledzenie wpływu każdego z głównych parametrów walcowania (tj.  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\delta$ ) na przebieg procesu WPK. I tak przy zachowaniu stałego kąta pochylenia ściany bocznej  $\alpha=30^\circ$  analizowano wpływ zmian wartości kąta  $\beta$ , natomiast przy stałym  $\beta=8^\circ$  badano procesy przy zmieniającym się kącie  $\alpha$ . Badania te przeprowadzono dla pełnego zakresu wartości gniotów i grubości ścianek próbek wykonanych z ołowiu.















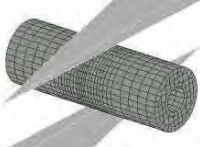



*Rys. 5.7. Zestawy segmentów narzędziowych stosowane w badaniach doświadczalnych procesu WPK*

W przypadku próbek z aluminium badania eksperymentalne wykonano stosując zestaw klinów o kątach:  $\alpha=30^\circ$  i  $\beta=8^\circ$ .

Badania prowadzone na próbkach z ołowiu o różnych grubościach ścianek i przy zmieniających się wielkościach gniotu  $\delta$  pozwoliły na dokładne prześledzenie mechanizmów odkształcenia odkuwek drażonych walcowanych metodą WPK. Za istotne uznano także, czy zróżnicowanie rozkładów grubości ścianek wyrobu finalnego zależy od kształtu walcowanego wyrobu. Dlatego też wykonano serię badań, w których zastosowano kliny o kształcie umożliwiającym walcowanie na wałku dwóch symetrycznych przewężeń. Narzędzia te pokazano na rys. 5.8a. Stosując przedstawione narzędzia wykonano również próby walcowania przy większym gniocie, tj.  $\delta = 1,67$ .

**Tab. 5.1.** Zakres par kątów  $\alpha$  i  $\beta$ , określających jednoznacznie geometrię klinów, stosowanych w badaniach numerycznych i doświadczalnych procesu WPK wyrobów drążonych

$\alpha / \beta$	$\beta = 6^\circ$	$\beta = 8^\circ$	$\beta = 10^\circ$
$\alpha = 20^\circ$		 	
$\alpha = 30^\circ$	 	 	 
$\alpha = 40^\circ$		 	
	 badania numeryczne		 badania doświadczalne

(a)



(b)



**Rys. 5.8.** Segmenty narzędziowe do procesu WPK zapewniające wykonanie dwóch przewężeń (rys. a) oraz trzpienie stosowane w procesie (rys. b)

Przeprowadzono również próby WPK, w których, zgodnie z sugestią badaczy niemieckich [28, 58], zastosowano trzpienie wewnętrzne. W trak-

cie tych badań użyto trzech trzpieni o średnicach równych:  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 10$  i  $\varnothing 12$  mm, które przedstawione na rys. 5.8b. Na uwagę zasługuje fakt, że wyjmowanie trzpieni z próbek po przeprowadzeniu walcowania nie przysparzało żadnych trudności i było wykonywane ręcznie.

#### 5.4. Przykładowe wyniki

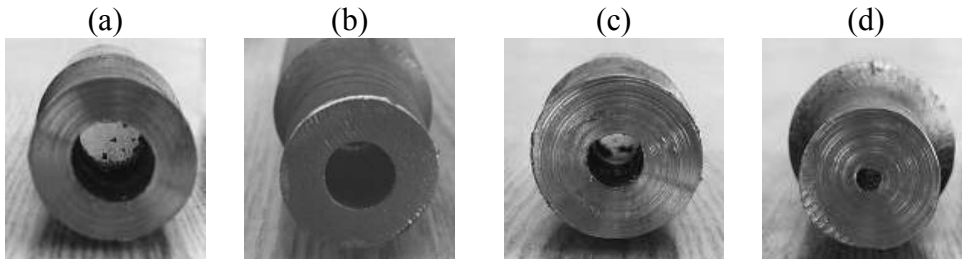
Głównym celem wykonywanych badań doświadczalnych było zweryfikowanie opracowanego, na potrzeby analizy WPK wyrobów drążonych, modelu numerycznego tego procesu kształtowania. W związku z powyższym, w trakcie prób eksperymentalnych, analizowano te same zagadnienia co w symulacji numerycznej. I tak wiele uwagi poświęcono określeniu wpływu parametrów procesu na wielkość owalizacji przekroju poprzecznego na odwalcowanym stopniu wałka. W efekcie wykonanych prób stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie wyrobów z odchyłką  $\Delta$  zawartą w granicach  $0,1 \div 0,4$  mm. Taka wartość  $\Delta$  mieści się w zakresie tolerancji wykonawczych przyjmowanych w procesach WPK wyrobów pełnych (o podobnym kształcie zewnętrznym), stosowanych w rozwiązaniach przemysłowych wdrażanych pod patronatem specjalistycznych firm Beltechnologia & M oraz Šmeral. Przykłady wałków ukształtowanych w sposób prawidłowy pokazano na rys 5.9.



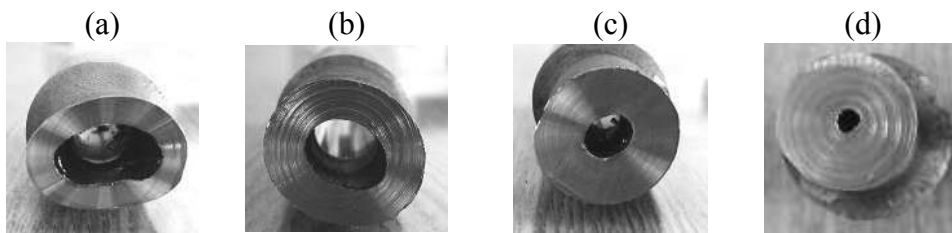
*Rys. 5.9. Odwalcowane próbki z ołowiu, których kształt uznano za prawidłowy*

W celu określenia zmian grubości ścianek będących efektem kształtowania, odwalcowane próbki przecinano wzdłużnie (w płaszczyźnie przechodzącej przez ich oś) oraz poprzecznie (w płaszczyźnie symetrii). Na podstawie obserwacji oraz pomiarów otrzymanego przekroju poprzecznego

stwierdzano, czy próbka ukształtowana jest prawidłowo (rys 5.10), czy też uległa zdeformowaniu w stopniu uniemożliwiającym jej wykorzystanie do celów praktycznych (rys. 5.11).



**Rys. 5.10.** *Prawidłowo ukształtowane w procesie WPK przekroje poprzeczne próbek, wykonanych z wsadu o średnicy wewnętrznej równej:  $\varnothing 18$  mm (a);  $\varnothing 15$  mm (b);  $\varnothing 12$  mm (c) i  $\varnothing 9$  mm (d)*



**Rys. 5.11.** *Zdeformowane w procesie WPK przekroje próbek walcowanych z wsadów drążonych o średnicy wewnętrznej równej:  $\varnothing 18$  mm (a);  $\varnothing 15$  mm (b);  $\varnothing 12$  mm (c) i  $\varnothing 9$  mm (d)*

W próbach walcowania wałków drążonych prowadzonych w warunkach obróbki plastycznej na zimno, stwierdzono występowanie bardzo dużej owalizacji przekroju poprzecznego. Ponadto przewężenia próbek (wykonanych z aluminium A0) przyjmowały beczkowaty kształt (rys. 5.12), co nie miało miejsca w procesach WPK realizowanych w warunkach obróbki plastycznej na gorąco.

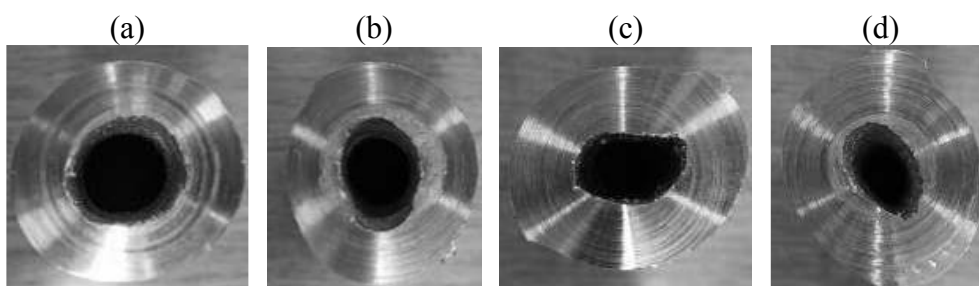
Po przecięciu tych próbek w płaszczyźnie symetrii (rys. 5.13), stwierdzono, że kształt wewnętrzny otworów ulegał silnej deformacji, a grubość ścianek próbek praktycznie nie zmieniała się.

Dążąc do ograniczenia niepożądanego beczkowatości kształtowanych przewężeń wałków, wykonano próby walcowania, w których kształtowano dwa krótsze przewężenia rozdzielone strefą sztywną. Jednakże i te przypadki walcowania, prowadzone w warunkach obróbki na zimno, zakończyły

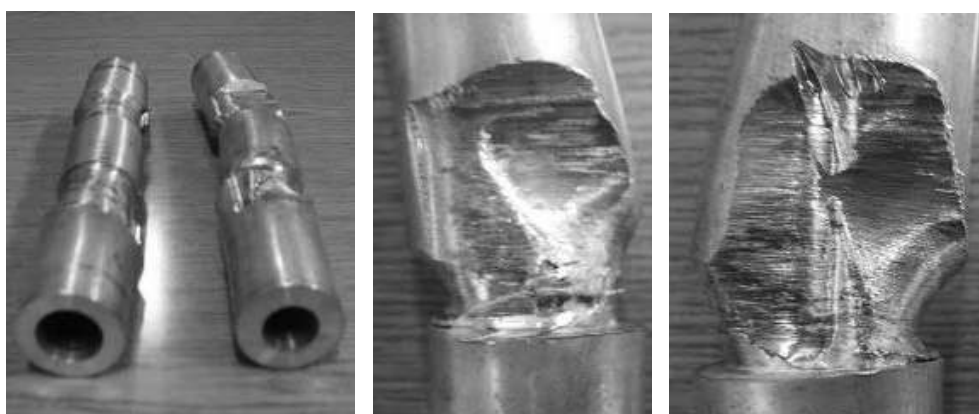
się niepowodzeniem. Mianowicie w procesach tych występował poślizg narzędzi względem materiału, próbka traciła zdolność wykonywania ruchu obrotowego i była zgniatana (rys. 5.14).



*Rys. 5.12. Próbkki aluminiowe zdeformowane w trakcie procesu WPK*



*Rys. 5.13. Zdeformowane w procesie WPK przekroje poprzeczne próbek z aluminium A0, wykonane z wsadów drążonych o otworze wewnętrznym równym: Ø18 mm (a); Ø15 mm (b); Ø12 mm (c) i Ø9 mm (d)*



*Rys. 5.14. Próbkki z aluminium zniszczone w wyniku wystąpienia zjawiska poślizgu mającego miejsce przy WPK dwóch symetrycznych przewężeń*

Tymczasem procesy WPK na gorąco, realizowane za pomocą tych samych narzędzi przebiegały w sposób prawidłowy (rys. 5.15). Zatem nie stwierdzono występowania analogii pomiędzy procesami walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów drążonych w warunkach obróbki plastycznej na zimno i na gorąco.



*Rys. 5.15. Próbki z ołowiu Pb1 uzyskane w stabilnym procesie WPK dwóch symetrycznie rozłożonych przewężeń*

## **6. ANALIZA WYNIKÓW UZYSKANYCH DLA PROCESU WPK KLINAMI PŁASKIMI**

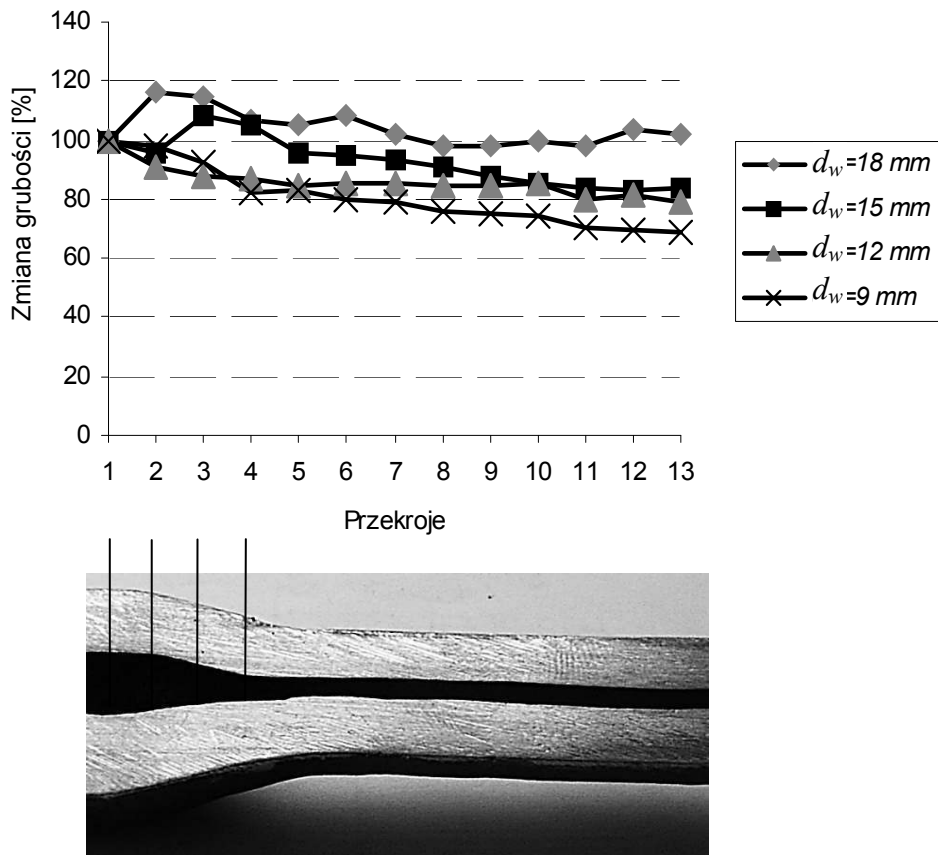
### **6.1. Zmiana grubości ścianki**

W ramach prac badawczych poddano analizie grubości ścianek odkuwek drażonych ukształtowanych metodą WPK. W wyniku tych prac stwierdzono, że w efekcie walcowania zmienia się grubość ścianki zastosowanego wsadu. Przy czym zmiana ta nie jest jednolita w ukształtowanym przewężeniu. Zatem właściwa ocena tego zagadnienia wymaga przeanalizowania rozkładów grubości ścianek na całej długości przewężenia.

Zgodnie z rys. 6.1, na którym przedstawiono wyznaczone doświadczalnie rozkłady grubości ścianki w odkuwkach walcowanych klinami z kątami  $\alpha=20^\circ$  i  $\beta=8^\circ$ , przy różnych średnicach otworu zastosowanego wsadu, ścianka wyrobu po procesie kształtowania z reguły ulega pocienieniu. Przy czym pocienienie to jest tym większe im większa była grubość ścianki wsadu użytego do walcowania. Ponadto zauważono, że w pewnych miejscach (przy wejściach materiału do strefy odkształcenia) może wystąpić pogrubienie ścianki odkuwki. Wydaje się, że efekt pogrubienia jest odpowiednikiem miejscowego zwiększenia średnicy odkuwki, które jest charakterystyczne dla procesów walcowania z wsadów pełnych.

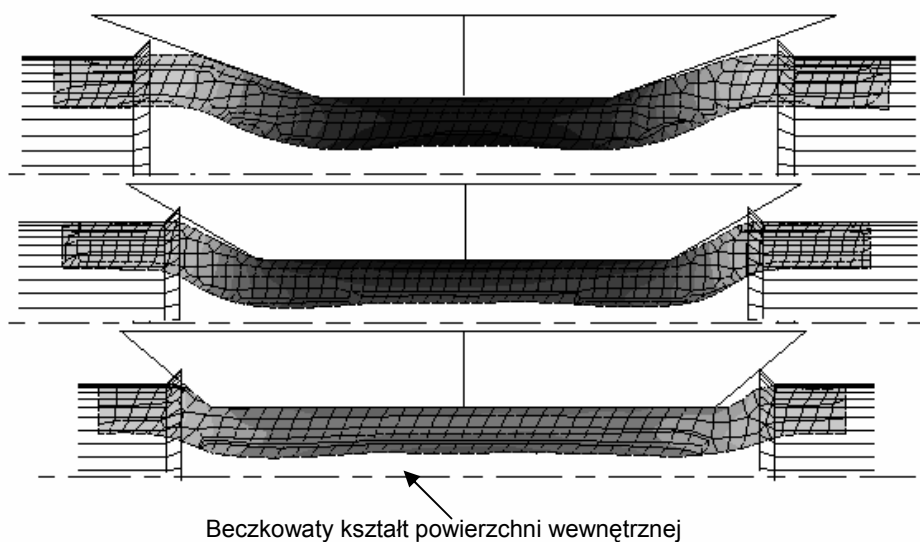
W procesach walcowania poprzeczno – klinowego decydujące dla zmiany kształtu odkuwki jest płynięcie materiału w kierunku osiowym oraz promieniowym. Przy czym udział płynięcia w poszczególnych kierunkach jest uzależniony od zastosowanych parametrów procesu, w szczególności zaś od kątów  $\alpha$  i  $\beta$  oraz stopnia gniotu  $\delta$ . W przypadku WPK wyrobów drażonych zwiększeniu płynięcia materiału w kierunku promieniowym towarzyszyć będzie wzrost grubości ścianki ukształtowanego wyrobu.





**Rys. 6.1.** Wyznaczona doświadczalnie zmiana grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych próbek, kształtowanych metodą WPK, przy:  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=8^\circ$  i  $\delta = 1,5$

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono również, że powierzchnia wewnętrzna w próbkach walcowanych przyjmuje charakterystyczny beczkowaty kształt. Ustalono, że beczkowatość ta uzależniona jest od grubości ścianek wsadu oraz od przyjętego kąta kształtującego  $\alpha$ . Mianowicie zwiększenie grubości ścianek wsadu oraz stosowanie większych kątów kształtujących ( $\alpha = 30^\circ \div 40^\circ$ ) powoduje wzrost beczkowatości - rys. 6.2. Badania doświadczalne wykonywano wykorzystując płasko – klinową walcarkę laboratoryjną LUW-2 (przedstawioną na rys. 5.1), znajdującą się na wyposażeniu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.

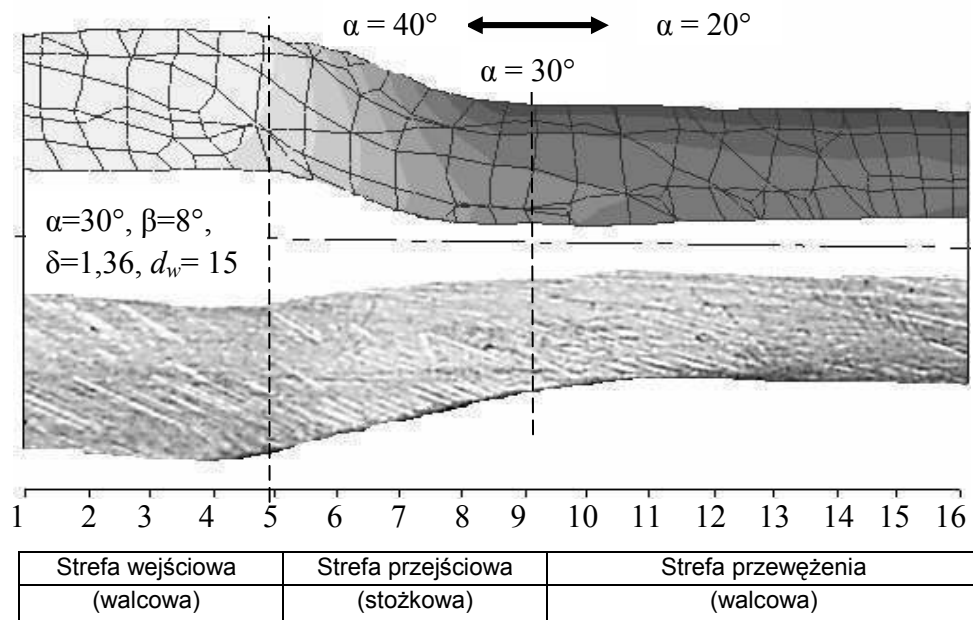


**Rys. 6.2.** Obliczona MES beczkowatość powierzchni wewnętrznej próbek kształtowanych przy:  $d_w = 18 \text{ mm}$ ,  $\beta = 8^\circ$  i  $\delta = 1,5$

Dążąc do ustalenia wpływu przyjętych parametrów procesu WPK na zmiany grubości ścianek wykonano zestawienia porównawcze, w których ujęto zarówno wyniki obliczeń numerycznych jak i badań doświadczalnych. Dla ułatwienia analizy w odwalcowanym wyrobie wyróżniono następujące strefy (rys. 6.3):

- wejściową (o kształcie walcowym),
- przejściową (o kształcie stożkowym),
- przewężenia (o kształcie walcowym).

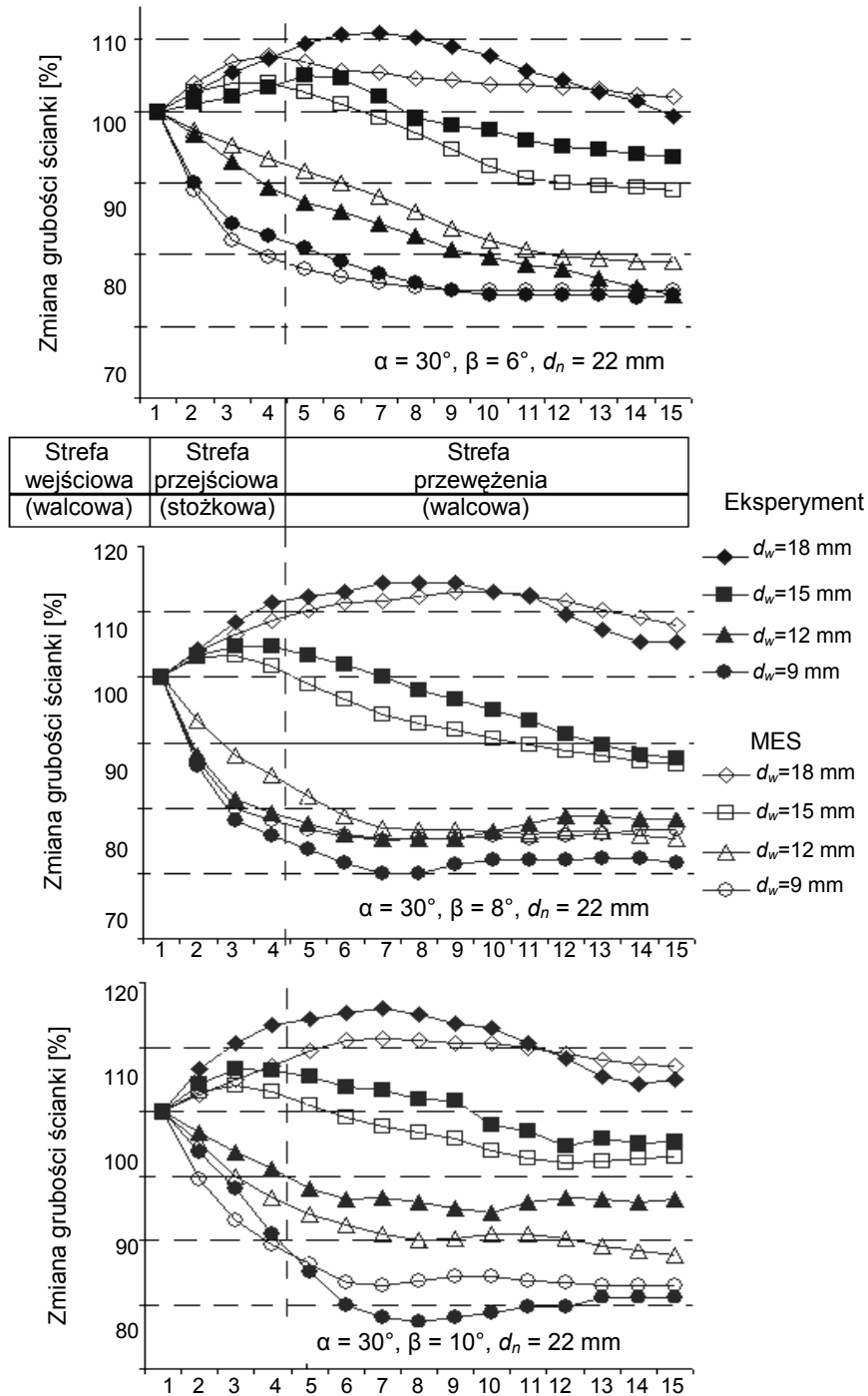
Ponieważ we wszystkich badanych przypadkach kształtowania łączna długość strefy przejściowej i strefy przewężenia (do osi symetrii) wynosiła 45 mm, to płaszczyzna rozgraniczająca strefy wejściową i przejściową była zawsze w tym samym miejscu. Natomiast, ze względu na stosowanie w badaniach trzech różnych kątów kształtujących, umiejscowienie płaszczyzny rozgraniczającej strefy przejściową i przewężenia ulegało zmianie. Jak łatwo zauważyć (rys. 6.3) zmniejszenie kąta kształtującego  $\alpha$  powodowało wydłużenie obszaru stożkowego próbki oraz, w konsekwencji, skrócenie długości odwalcowanego przewężenia.



**Rys. 6.3.** Podział odkuwki na strefy

Na rys. 6.4 zestawiono rozkłady grubości ścianek (obliczone MES oraz wyznaczone doświadczalnie) w przekrojach wzdłużnych próbek kształtowanych na jednakową średnicę  $d_n = 22$  mm, przy stałym kącie kształtującym  $\alpha = 30^\circ$ . Powyższe zestawienie ilustruje wpływ kąta rozwarcia klina  $\beta$  oraz średnicy wewnętrznej wsadu  $d_w$  na uzyskiwaną grubość ścianek  $g$ .

Analiza danych zamieszczonych na rys. 6.4 wykazuje, że niezależnie od zastosowanego kąta  $\beta$  we wszystkich przypadkach walcowania, w których stosowano wsad o najmniejszej grubości ścianki ( $d_w=18$  mm) wystąpiło jej pogrubienie na całej długości kształtowanego przewężenia. Częściowe pogrubienie ścianki (przede wszystkim w strefie przejściowej) występowało również wówczas, gdy stosowano wsady z  $d_w = 15$  mm. Natomiast w pozostałych przypadkach kształtowania (tj. przy  $d_w = 12$  mm lub 9 mm) na całej długości stref przejściowej i przewężenia występowało pocienienie grubości ścianek próbek. Przy czym pocienienie to było tym większe im grubsza była ścianka wsadu. Ponadto, na podstawie danych zamieszczonych na rys. 6.4 stwierdza się, że zmiana kąta rozwarcia klina  $\beta$  (w zakresie  $6^\circ \div 10^\circ$ ) nie wpływa w sposób istotny na otrzymywane rozkłady grubości ścianek.



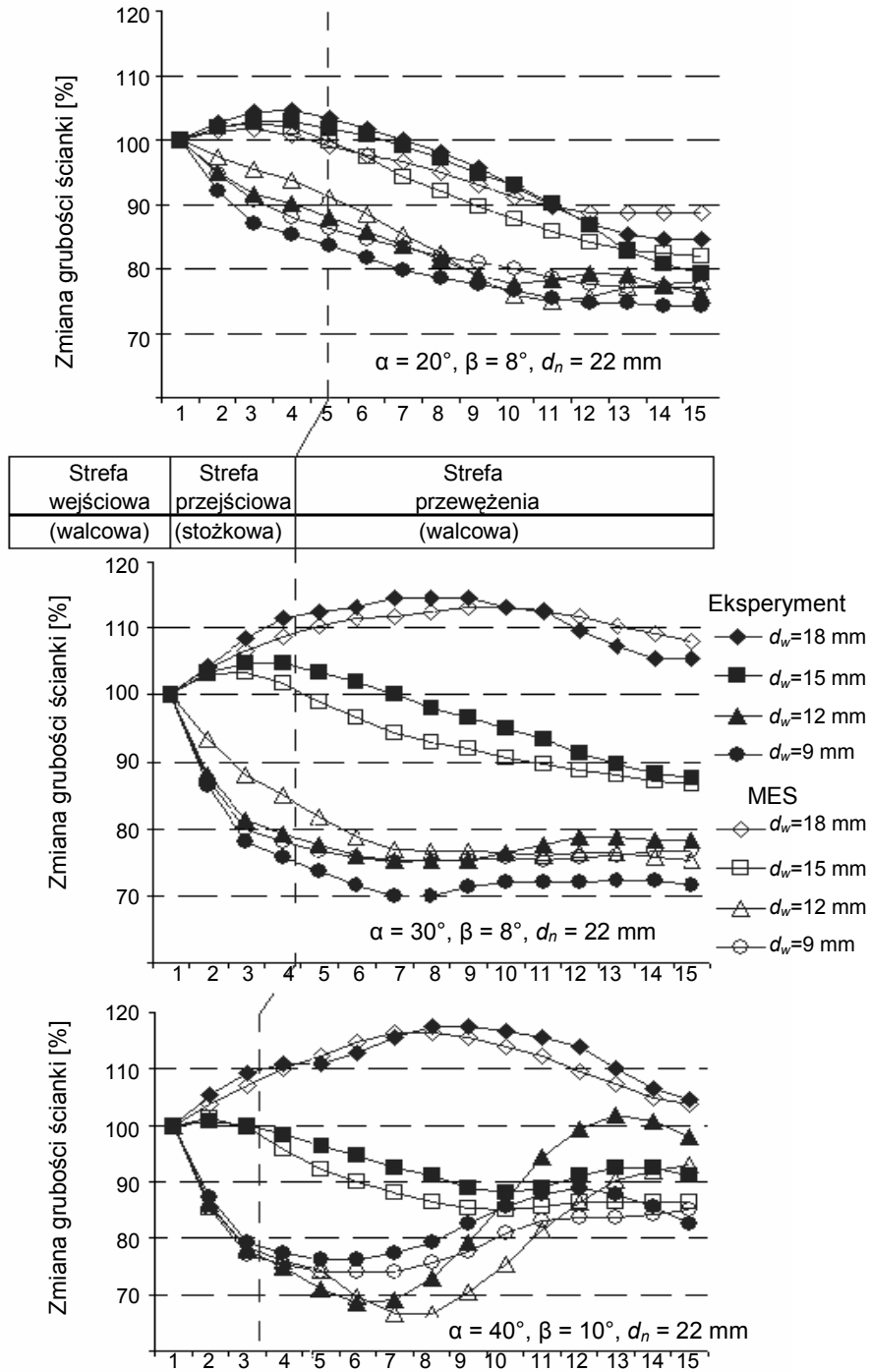
Rys. 6.4. Rozkłady grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych próbek z ołowiu walcowanych na  $d_n = 22$  mm, przy stałym  $\alpha = 30^\circ$

Analiza danych zamieszczonych na rys. 6.4 wykazuje, że niezależnie od zastosowanego kąta  $\beta$  we wszystkich przypadkach walcowania, w których stosowano wsad o najmniejszej grubości ścianki ( $d_w=18$  mm) wystąpiło jej pogrubienie na całej długości kształtowanego przewężenia. Częściowe pogrubienie ścianki (przede wszystkim w strefie przejściowej) występowało również wówczas, gdy stosowano wsady z  $d_w = 15$  mm. Natomiast w pozostałych przypadkach kształtowania (tj. przy  $d_w = 12$  mm lub 9 mm) na całej długości stref przejściowej i przewężenia występowało pocienienie grubości ścianek próbek. Przy czym pocienienie to było tym większe im grubsza była ścianka wsadu. Ponadto, na podstawie danych zamieszczonych na rys. 6.4 stwierdza się, że zmiana kąta rozwarcia klina  $\beta$  (w zakresie  $6^\circ \div 10^\circ$ ) nie wpływa w sposób istotny na otrzymywane rozkłady grubości ścianek.

Na rys. 6.5 przedstawione zostały rozkłady grubości ścianek wyrobu uzyskane przy stałej wartości kąta  $\beta = 8^\circ$  oraz kątach kształtujących  $\alpha = 20^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $40^\circ$ . Rozkłady te wyznaczono dla przypadków kształtowania przewężenia o średnicy  $d_n = 22$  mm, dla całego badanego zakresu średnic wewnętrznych wsadu.

Zgodnie z danymi zamieszczonymi na rys. 6.5 stwierdza się, że w odróżnieniu od kąta  $\beta$  wartość zastosowanego kąta kształtującego  $\alpha$  wpływa w sposób istotny na zmiany grubości ścianki następujące w efekcie walcowania. I tak przy kącie  $\alpha = 20^\circ$  w strefie przewężenia wszystkich próbek obserwuje się pocienienie ścianek. Nieznaczny wzrost grubości ma miejsce tylko w strefie przejściowej i dotyczy przypadków walcowania przy  $d_w = 18$  mm lub 15 mm. Ponadto rozbieżności między uzyskiwanymi zmianami grubości ścianek (odnotowanymi dla różnych  $d_w$ ) są w przypadku stosowania kąta  $\alpha = 20^\circ$  najmniejsze. Zastosowanie klinów z dużymi kątami kształtującymi ( $\alpha = 40^\circ$ ) prowadzi do znacznych nieregularności kształtu powierzchni wewnętrznej próbek. Powierzchnia ta ulega bowiem falowaniu, które jest bardziej widoczne w przypadkach walcowania z wsadów o grubych ściankach ( $d_w = 9$  mm lub  $d_w = 12$  mm). Zatem z punktu widzenia ograniczenia zróżnicowania grubości ścianek w odkuwkach, procesy WPK należy prowadzić z relatywnie małymi kątami kształtującymi  $\alpha$ .

Dane zamieszczone na rys. 6.5 potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenie, że im większa jest grubość ścianki wsadu, tym większe jest jej pocienienie, następujące w efekcie kształtowania wyrobu metodą walcowania poprzeczno – klinowego.



Rys. 6.5. Rozkłady grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych próbek z ołowiu walcowanych na  $d_n = 22 \text{ mm}$ , przy stałym  $\beta = 8^\circ$

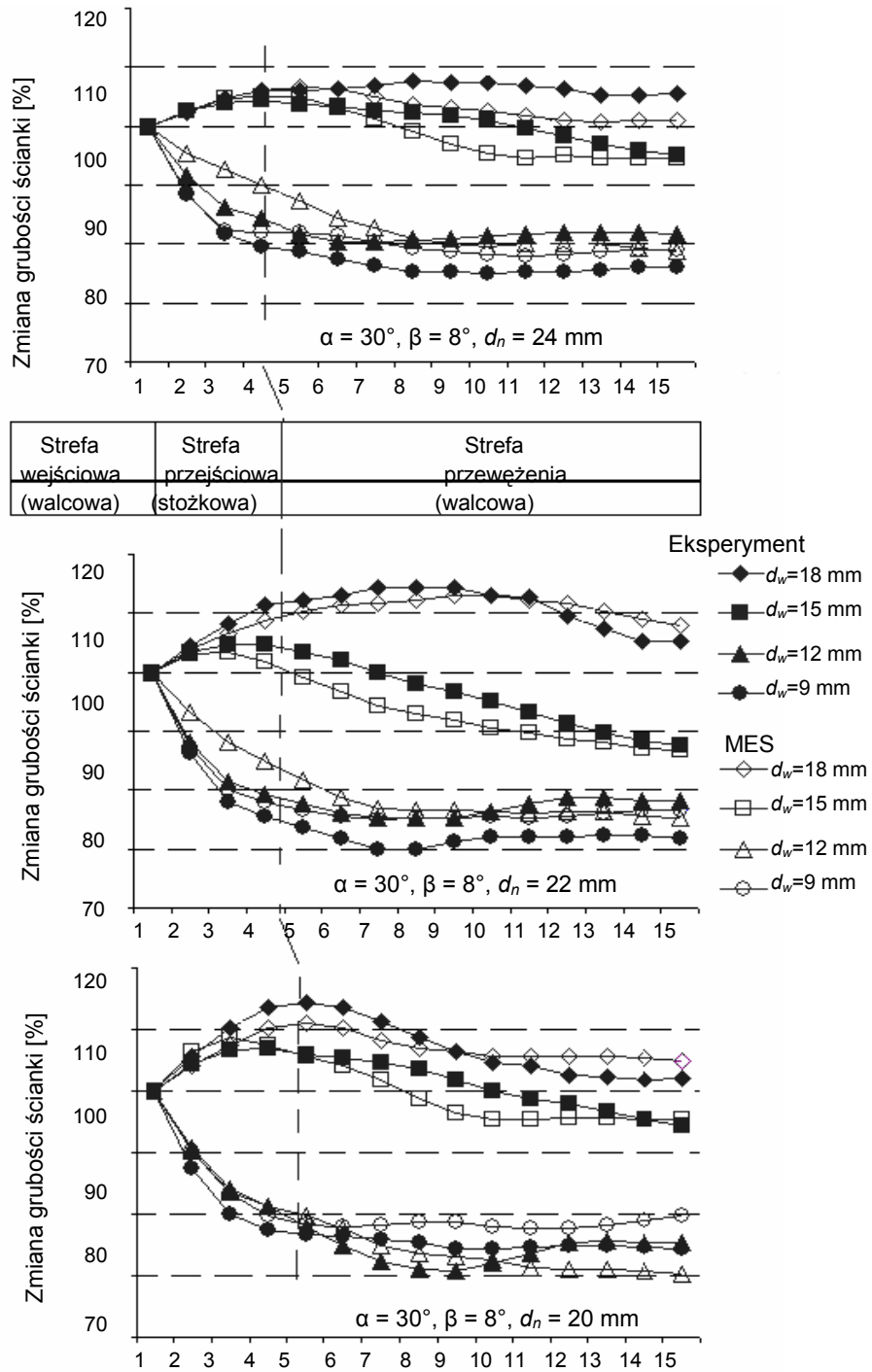
Wpływ zastosowanego stopnia gniotu  $\delta$  na charakter zmian grubości ścianki w obszarze ukształtowanego przewężenia został zilustrowany na rys. 6.6. Przedstawiono na nim rozkłady grubości ścianek, zmierzone i obliczone MES, w odkuwkach przewężonych (przy stałych kątach  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$ ) na średnicę  $\varnothing 24$ ,  $\varnothing 22$  i  $\varnothing 20$  mm.

Odpowiadało to stosowaniu w procesach WPK stopni gniotu  $\delta = 1,25$ ; 1,36 i 1,50. Z rys. 6.6 wynika, że w przypadku walcowania z wsadu o ściance grubej tj. przy  $d_w = 9$  lub 12 mm (niezależnie od zastosowanego stopnia gniotu  $\delta$ ) na całej długości kształtowanego przewężenia występuje pocienienie ścianki. Na uwagę zasługuje fakt, że w tych przypadkach walcowania w strefie przewężenia uzyskuje się względnie stałą grubość ścianki.

Z kolei we wszystkich rozważanych przypadkach WPK dotyczących wsadów o największym otworze ( $d_w = 18$  mm) odnotowano pogrubienie ścianek, które występowało na całej długości kształtowania. Przy czym największe grubości ścianek uzyskiwano w procesie walcowania ze stopniem gniotu  $\delta = 1,36$ . Natomiast wówczas gdy kształtowano próbki z otworem  $d_w = 15$  mm obserwowano pogrubienie ścianek w strefie przejściowej oraz ich przewężenie w środkowej części odwalcowanego przewężenia.

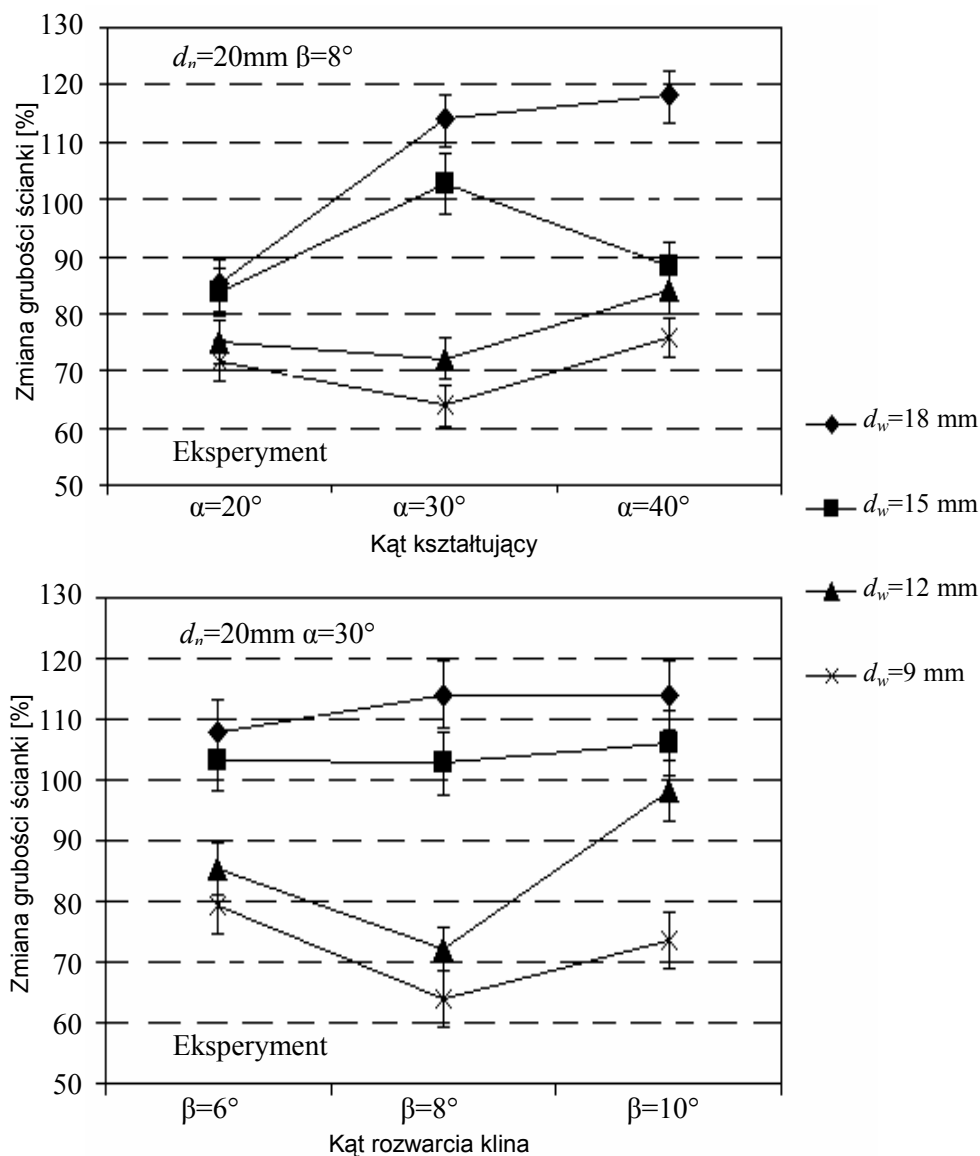
Porównując ze sobą wykresy (rys. 6.4 – 6.6) ilustrujące zmienność grubości ścianki (uzyskane przy tych samych parametrach procesu) stwierdza się również dobrą zgodność jakościową i ilościową między wartościami wyznaczanymi eksperymentalnie i obliczonymi MES. Potwierdza to zasadność stosowania metody elementów skończonych w analizie tak złożonych procesów kształtowania jak walcowanie poprzeczno – klinowe odkuwek drążonych.

Na rys. 6.7 przedstawiono jak średnia grubość ścianki walcowanego wyrobu zmienia się w zależności od zastosowanych kątów  $\alpha$  i  $\beta$ . Wykresy pokazane na tym rysunku opracowano na podstawie danych eksperymentalnych dotyczących kształtowania przewężenia o średnicy  $d_n = 20$  mm, co odpowiadało zastosowaniu stopnia gniotu  $\delta = 1,5$ . Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że podobnie jak w przypadku walcowania na  $d_n = 22$  mm (rys. 6.4 i 6.5) największy wpływ na zmianę grubości ścianki ma średnica wewnętrzna  $d_w$  zastosowanego wsadu. Dla wszystkich stosowanych par kątów  $\alpha$  i  $\beta$  stwierdzono, że im mniejsze było  $d_w$  (większe  $g_o$ ), tym pocienienie ścianek osiągało wyższe wartości.



**Rys. 6.6.** Rozkłady grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych próbek z ołowiu walcowanych na  $d_n = 24, 22$  i  $20 \text{ mm}$ , przy stałym  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$



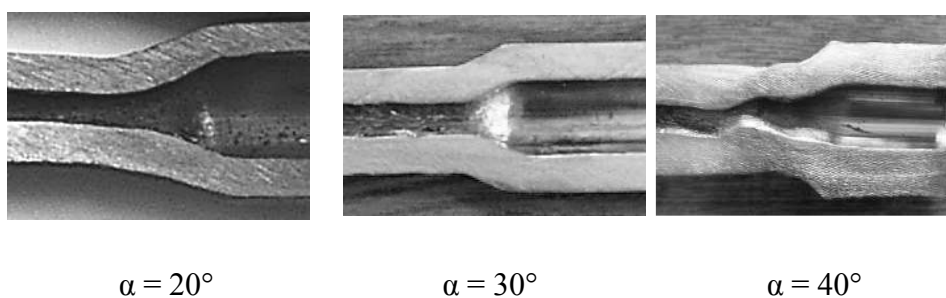


**Rys. 6.7.** Zmiana grubości ścianki w środkowym przekroju poprzecznym próbek z ołowiu, walcowanych na  $d_n = 20\text{ mm}$  przy podanych wartościach kątów  $\alpha$  i  $\beta$

Oceniając wpływ kątów  $\alpha$  i  $\beta$  na analizowane zagadnienie stwierdza się, że największy udział płynięcia materiału w kierunku osiowym w przypadkach walcowania z wsadów o względnie grubych ściankach ( $d_w = 9$  i

$d_w = 12$  mm), zapewnia stosowanie klinów z  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$ . Natomiast wówczas gdy ścianki wsadu były cieńsze ( $d_w = 15$  i  $d_w = 18$  mm) materiał najlepiej płynął w kierunku osiowym w przypadku wykorzystywania klinów z  $\alpha = 20^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$ . Świadczą o tym najmniejsze grubości ścianek uzyskiwanych w procesach WPK przy podanych parametrach klina (rys. 6.7).

Dodatkowo z rys. 6.7 wynika, że stosowanie narzędzi z maksymalnymi kątami  $\alpha$  i  $\beta$  prowadzi do dużych rozbieżności w uzyskiwanych grubościach ścianek wyrobów. W skrajnych przypadkach może wówczas wystąpić niepożądana deformacja powierzchni wewnętrznej. Przykład takiego zaburzenia występującego przy kształtowaniu klinami z  $\alpha = 40^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$  pokazano na rys. 6.8. Dla porównania na rysunku tym pokazano również jak wygląda powierzchnia wewnętrzna w przypadku zastosowania mniejszych kątów kształtujących  $\alpha = 20^\circ$  i  $30^\circ$ , przy utrzymywanej wartości kąta  $\beta = 8^\circ$ . Należy zauważyć, że tak silne zaburzenie kształtu powierzchni wewnętrznej, jakie odnotowano dla przypadku walcowania przy  $\alpha = 40^\circ$ , w żaden sposób nie odbijało się na jakości powierzchni zewnętrznej wyrobu. Jedynym symptomem wskazującym na wystąpienie tego zaburzenia były okresowe, znaczne wahania wartości siły rozporowej. Jednakże ze względu na fakt, że w procesach WPK (realizowanych w warunkach przemysłowych) nie monitoruje się sił kształtowania, to nie ma możliwości wykorzystania tego spostrzeżenia do eliminowania odkuwek ze zdeformowaną powierzchnią wewnętrzną.

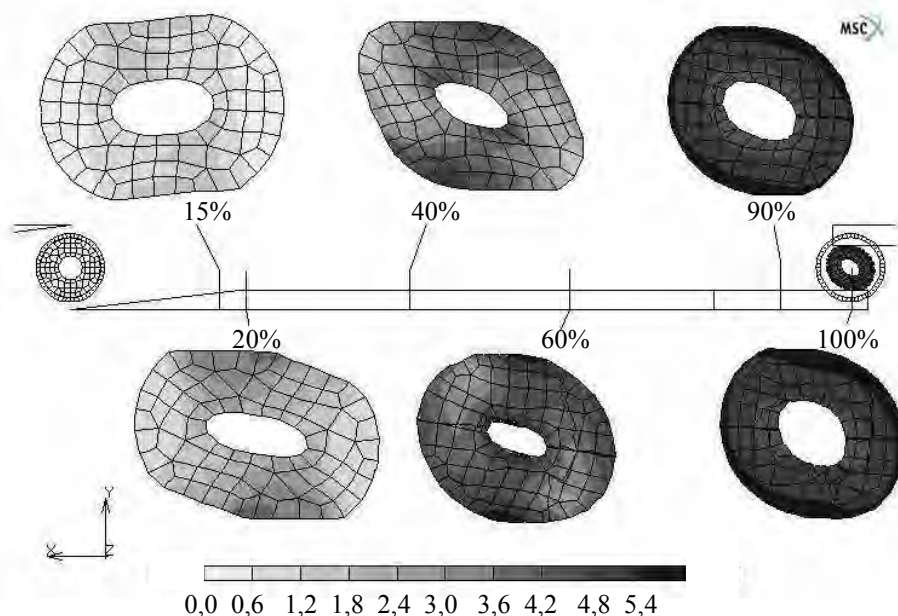


**Rys. 6.8.** Wpływ zmiany wielkości kąta pochylenia ścian bocznych  $\alpha$  narzędzi na grubość ścianki kształtowanego wyrobu ( $\beta = 8^\circ$ ,  $\delta = 1,5$ )

## 6.2. Owalizacja przekroju poprzecznego

W trakcie kształtowania metodą WPK przekrój poprzeczny wyrobu ulega owalizacji, która w prawidłowo zaprojektowanych procesach jest usuwana w wyniku oddziaływania powierzchni kalibrujących narzędzi. W wykonanych badaniach skupiono się na poszukiwaniu takich parametrów procesu, przy których poziom owalizacji przekroju poprzecznego nie przekracza wartości dopuszczalnych, przyjmowanych w procesach WPK wyrobów pełnych. Zgodnie z wytycznymi firmy Šmeral [66] przyjęto, że graniczna wartość parametru owalizacji  $\Delta$  wynosi dla analizowanych odkuwek 0,6 mm. Na podstawie wykonanych obliczeń oraz badań doświadczalnych stwierdzono, że w przeważającej ilości analizowanych przypadków walcowania owalizacja przekroju poprzecznego była większa od wartości dopuszczalnej. Dla jednego z takich przypadków na rys. 6.9 pokazano progresję kształtu przekroju poprzecznego odkuwki walcowanej. Wyróżniony przekrój znajduje się w płaszczyźnie symetrii procesu WPK. Analizując zmiany kształtu tego przekroju stwierdza się, że niewralgicznym momentem procesu (ze względu na owalizację) jest przejście z fazy wcinania do fazy kształtowania. Wówczas bowiem owalizacja przekroju poprzecznego jest największa. W tej chwili procesu (zaawansowanie 20% na rys. 6.9) jest największe prawdopodobieństwo wystąpienia niekontrolowanego poślizgu. Odkuwka traci wówczas zdolność do obracania się dookoła własnej osi. W przedstawionym przypadku ta forma utraty stabilności procesu nie występuje, odkuwka dalej jest kształtowana w sposób typowy dla procesów WPK, a w efekcie oddziaływania powierzchni kalibrujących klinów owalizacja zmniejsza się. Jednakże nie jest ona usuwana w stopniu możliwym do zaakceptowania.

W tabeli 6.1 zestawiono wartości parametru  $\Delta$  wyznaczone dla wszystkich analizowanych przypadków WPK. W zestawieniu tym ujęto zarówno wyniki obliczeń wykonanych metodą elementów skończonych jak i rezultaty badań doświadczalnych. Analiza danych zamieszczonych w tabeli 6.1 wykazuje, że stosowanie klinów o kącie kształtującym  $\alpha = 20^\circ$  powoduje zwiększenie owalizacji przekroju poprzecznego. Dla klinów o takich kątach  $\alpha$  uzyskano bowiem najmniej rozwiązań spełniających warunek  $\Delta \leq 0,6$  mm.



**Rys. 6.9.** Powstawanie nadmiernej owalizacji przekroju poprzecznego, symulowane numerycznie dla procesu WPK przy:  $d_w = 12$  mm,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ$  i  $\delta = 1,5$

Najlepsze usuwanie owalizacji przekroju poprzecznego gwarantuje stosowanie klinów z kątami kształtującymi  $\alpha = 30^\circ$  oraz kątami rozwarcia klina  $\beta = 6^\circ$  lub  $\beta = 8^\circ$ . Zastosowanie większego kąta  $\beta = 10^\circ$  powoduje przekroczenie dopuszczalnej wartości  $\Delta$ , niezależnie od wyboru innych parametrów procesu WPK. Natomiast korzystanie w procesie kształtowania z narzędzi o dużych kątach kształtujących ( $\alpha = 40^\circ$ ) prowadziło do skutecznego usuwania owalizacji wówczas, gdy kąt  $\beta$  wynosił  $8^\circ$ , a średnica otworu wewnętrznego  $d_w = 15$  mm lub  $d_w = 12$  mm. Należy jednakże pamiętać, że przyjęcie w procesie WPK tak dużych kątów  $\alpha$  może doprowadzić do zdeformowania powierzchni wewnętrznej wałka.

Analizując wpływ grubości ścianki na wielkość owalizacji stwierdzono, że stosowanie wsadów z dużymi otworami wewnętrznymi powoduje wzrost owalizacji przekroju poprzecznego. W całym zakresie badanych parametrów ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ) nie znaleziono bowiem takiego ich zestawienia, które gwarantowałyby otrzymanie  $\Delta \leq 0,6$  mm wówczas, gdy  $d_w = 18$  mm. Problem ten znika w przypadku stosowania wsadów o większej grubości ścianek.

**Tab. 6.1.** Wartości owalizacji przekroju poprzecznego  $\Delta$  [mm], wyznaczone na podstawie obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych

$d_w=18\text{mm}$		$\alpha=20^\circ$				$\alpha=30^\circ$				$\alpha=40^\circ$			
		$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$
$\beta=6^\circ$	obl.	1,8	2,1	2,2	1,9	1,8	2,2	1,2	1,8	0,4	0,9	0,7	0,7
	dośw.	---	---	---	---	1,9	2,4	1,5	2,2	---	---	---	---
$\beta=8^\circ$	obl.	1,4	1,6	1,1	1,7	0,8	0,4	1,1	1,4	3,0	3,1	1,6	1,5
	dośw.	1,7	1,9	1,0	1,6	1,0	0,7	0,8	2,1	3,3	2,7	1,8	1,6
$\beta=10^\circ$	obl.	1,7	1,8	1,5	1,9	1,2	1,9	2,0	2,2	2,2	2,3	1,8	1,9
	dośw.	---	---	---	---	1,5	2	1,8	2,3	---	---	---	---
$d_w=15\text{mm}$		$\alpha=20^\circ$				$\alpha=30^\circ$				$\alpha=40^\circ$			
		$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$
$\beta=6^\circ$	obl.	1,4	1,5	1,7	2,0	1,6	0,3	0,2	0,4	0,4	0,9	0,7	0,7
	dośw.	---	---	---	---	1,3	0,7	0,4	1,1	---	---	---	---
$\beta=8^\circ$	obl.	1,3	1,3	1,1	1,2	1,1	0,4	0,6	0,5	0,3	0,6	0,5	0,3
	dośw.	1,7	1,4	0,9	1,1	0,8	0,1	0,3	1,6	0,5	1,0	0,6	0,3
$\beta=10^\circ$	obl.	0,4	1,0	1,5	1,7	0,4	0,5	0,9	1,3	0,6	0,9	1,1	0,8
	dośw.	---	---	---	---	0,9	1,1	1,4	1,7	---	---	---	---
$d_w=12\text{mm}$		$\alpha=20^\circ$				$\alpha=30^\circ$				$\alpha=40^\circ$			
		$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$
$\beta=6^\circ$	obl.	1,4	1,5	1,7	2,1	1,2	1,0	0,8	0,8	0,6	0,9	1,1	1,2
	dośw.	---	---	---	---	1,0	0,7	0,6	0,7	---	---	---	---
$\beta=8^\circ$	obl.	1,5	1,1	0,8	0,8	0,9	0,5	0,9	1,1	0,6	0,6	0,5	0,4
	dośw.	1,4	0,9	0,7	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,5	0,6	0,4	0,3
$\beta=10^\circ$	obl.	0,9	1,2	1,1	1,5	1,8	1,7	1,1	1,4	1,2	1,3	1,5	1,8
	dośw.	---	---	---	---	1,9	1,5	1,2	1,3	---	---	---	---
$d_w=9\text{mm}$		$\alpha=20^\circ$				$\alpha=30^\circ$				$\alpha=40^\circ$			
		$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$	$d_n=26$	$d_n=24$	$d_n=22$	$d_n=20$
$\beta=6^\circ$	obl.	1,8	1,6	1,3	1,4	0,5	0,6	0,9	1,0	0,4	0,7	1,0	1,3
	dośw.	---	---	---	---	0,2	0,5	1,0	1,2	---	---	---	---
$\beta=8^\circ$	obl.	1,1	1,3	0,7	0,6	0,9	0,8	0,5	0,4	1,6	1,4	1,9	2,1
	dośw.	1,3	1,2	0,5	0,3	1,1	1,0	0,7	0,6	1,5	2,0	1,8	1,7
$\beta=10^\circ$	obl.	1,3	1,6	1,4	2,0	1,9	1,6	1,8	2,0	1,5	1,1	0,9	1,2
	dośw.	---	---	---	---	1,5	1,2	1,7	1,9	---	---	---	---
$\Delta \leq 0,6 \text{ mm}$				$0,6 \text{ mm} < \Delta \leq 0,9 \text{ mm}$				Deformacje wewnętrzne					

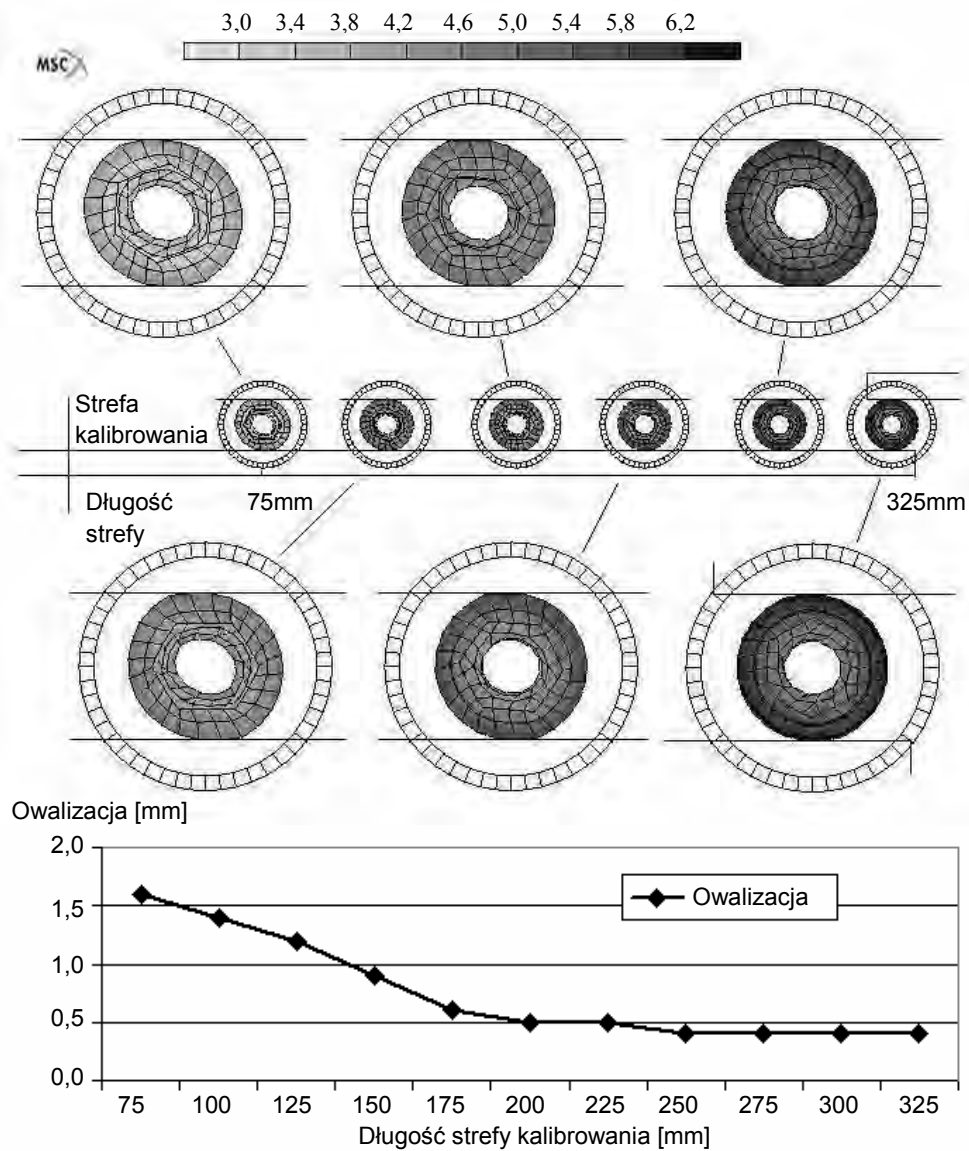
Zastosowane w badaniach kliny zapewniały kalibrowanie odkuwek na długości 75 mm, w czasie którego wykonywały one około 1 obrotu. Należy zauważyć, że w przypadku walcowania wyrobów pełnych zwyczajowo przyjmuje się długość kalibrowania na poziomie zapewniającym wykonanie przez odkawkę minimum  $\frac{1}{2}$  obrotu. Uwzględniając wyniki wykonanych prac badawczych należy zatem stwierdzić, że dwukrotne wydłużenie strefy

kalibrowania nie wystarczyło do skutecznego usunięcia owalizacji przekroju poprzecznego. Dążąc do otrzymania odpowiedzi na pytanie, czy dalsze zwiększanie długości tej strefy narzędzia będzie korzystnie wpływać na uzyskiwanie przez odkuwkę pożądanego przekroju kołowego, wykonano eksperyment numeryczny. Polegał on na ponownym zasymulowaniu jednego z wcześniej przeanalizowanych procesów, w którym stwierdzono dużą owalizację ( $\Delta = 1,6 \div 1,7$  mm). Przy czym w narzędziach zabezpieczających realizację tego procesu wprowadzono zmianę polegającą na wydłużeniu strefy kalibrowania z 75 mm do 325 mm. Na podstawie wykonanych obliczeń uzyskano informacje na temat jak wydłużenie tej strefy narzędzia wpływa na zmiany kształtu przekroju poprzecznego wyrobu, co przedstawiono na rys. 6.10. Stwierdzono, że ostateczna wartość owalizacji (wyrażonej przez parametr  $\Delta$ ) była równa 0,4 mm i została osiągnięta na długości kalibrowania około 225 mm. Zatem wykazano, że owalizację tę można skutecznie usunąć w trakcie wydłużonego kalibrowania, które dla analizowanego przypadku wymagało wykonania przez odkuwkę aż  $3 \div 3,5$  obrotu.

W związku z powyższym stwierdzeniem założono, że możliwy do zaakceptowania w wyrobie finalnym poziom owalizacji – tab. 6.1 – można zwiększyć o 50 % (do  $\Delta = 0,9$  mm). Bowiem w drodze około dwukrotnego wydłużenia strefy kalibrowania parametr ten powinien zmniejszyć się do pierwotnie zakładanej wartości granicznej. Należy jednakże zauważyć, że zwiększając długość klinów podnosimy koszty procesu wytwarzania. Jest to efektem wydłużenia skoku walcowania (często pociąga to za sobą zwiększenie gabarytów walcarki) oraz zmniejszenia wydajności procesu. Zatem poszukiwanie innych rozwiązań pozwalających na skuteczne usuwanie owalizacji i nie wymagających zwiększania wymiarów narzędzi należy uznać za w pełni uzasadnione.

### 4.3. Parametry siłowe

W trakcie badań eksperymentalnych dokonywano rejestracji sił stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (decydującej o obciążeniu walcarki). Siły te obliczano również podczas symulacji numerycznych wykonywanych metodą elementów skończonych. Na podstawie rezultatów uzyskanych z obliczeń i prac doświadczalnych stwierdzono, że siły styczne są dużo mniejsze od sił rozporowych (na ogół 5 do 7 razy). Zatem w dalszej analizie ograniczono się wyłącznie do badania sił rozporowych, odgrywających decydującą rolę w procesie walcowania.



**Rys. 6.10.** Progresja kształtu przekroju poprzecznego próbki w wydłużonej strefie kalibrowania oraz wykres ilustrujący zmiany wartości parametru  $\Delta$ , w funkcji długości tej strefy ( $d_w = 12 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ$  i  $\delta = 1,36$ )

W tabeli 6.2 zestawiono maksymalne wartości tych sił (obliczone i zmierzone) w procesach realizowanych za pomocą 5 zestawów narzędzi klinowych, których parametry również podano w zestawieniu.

**Tab. 6.2.** Zbiornicze zestawienie maksymalnych wartości sił rozporowych w [kN], występujących w badanych procesach WPK wyrobów drążonych

Parametry procesu			Klin 01 $\alpha = 20^\circ$ $\beta = 8^\circ$	Klin 02 $\alpha = 30^\circ$ $\beta = 8^\circ$	Klin 03 $\alpha = 40^\circ$ $\beta = 8^\circ$	Klin 04 $\alpha = 30^\circ$ $\beta = 6^\circ$	Klin 05 $\alpha = 30^\circ$ $\beta = 10^\circ$	
Średnica wewnętrzna $d_w = 18$ mm	$d_n = 20$	Eksp.	9,67	11,10	12,49	10,21	11,68	
		MES	11,23	12,47	14,71	11,50	12,24	
	$d_n = 22$	Eksp.	8,77	10,65	13,81	10,21	10,54	
		MES	9,12	10,90	14,08	10,11	11,04	
	$d_n = 24$	Eksp.	10,06	10,17	13,12	10,75	10,33	
		MES	10,53	10,83	12,77	11,02	10,74	
	$d_n = 26$	Eksp.	9,37	9,18	11,59	10,24	9,78	
		MES	10,05	9,96	12,32	11,71	10,96	
	Średnica wewnętrzna $d_w = 15$ mm	$d_n = 20$	Eksp.	11,91	13,28	13,69	12,22	14,80
			MES	12,84	13,91	14,08	13,11	14,59
$d_n = 22$		Eksp.	11,11	12,03	16,42	12,58	14,92	
		MES	12,07	11,91	15,93	13,81	18,28	
$d_n = 24$		Eksp.	13,62	11,82	17,02	13,30	14,24	
		MES	14,98	13,03	16,70	14,51	14,62	
$d_n = 26$		Eksp.	13,06	11,31	16,54	12,91	13,00	
		MES	13,49	12,58	15,92	13,76	13,24	
Średnica wewnętrzna $d_w = 12$ mm	$d_n = 20$	Eksp.	13,99	17,25	14,92	13,30	16,48	
		MES	13,81	15,25	13,19	14,68	15,72	
	$d_n = 22$	Eksp.	13,02	15,79	17,74	14,39	16,97	
		MES	12,67	15,04	16,76	13,51	16,06	
	$d_n = 24$	Eksp.	15,55	15,93	19,15	17,35	17,62	
		MES	14,74	14,87	18,51	16,27	16,94	
	$d_n = 26$	Eksp.	16,04	16,23	19,48	16,12	17,88	
		MES	15,40	16,23	19,17	16,41	17,31	
Średnica wewnętrzna $d_w = 9$ mm	$d_n = 20$	Eksp.	18,16	22,38	15,82	13,69	17,74	
		MES	15,44	20,86	14,93	13,06	16,12	
	$d_n = 22$	Eksp.	19,31	21,12	19,12	15,34	18,02	
		MES	18,95	20,76	20,24	16,00	17,67	
	$d_n = 24$	Eksp.	18,02	20,36	21,04	17,77	19,33	
		MES	17,41	19,54	20,56	17,32	19,18	
	$d_n = 26$	Eksp.	18,49	19,11	21,43	18,97	19,61	
		MES	18,32	18,79	20,56	18,64	19,01	

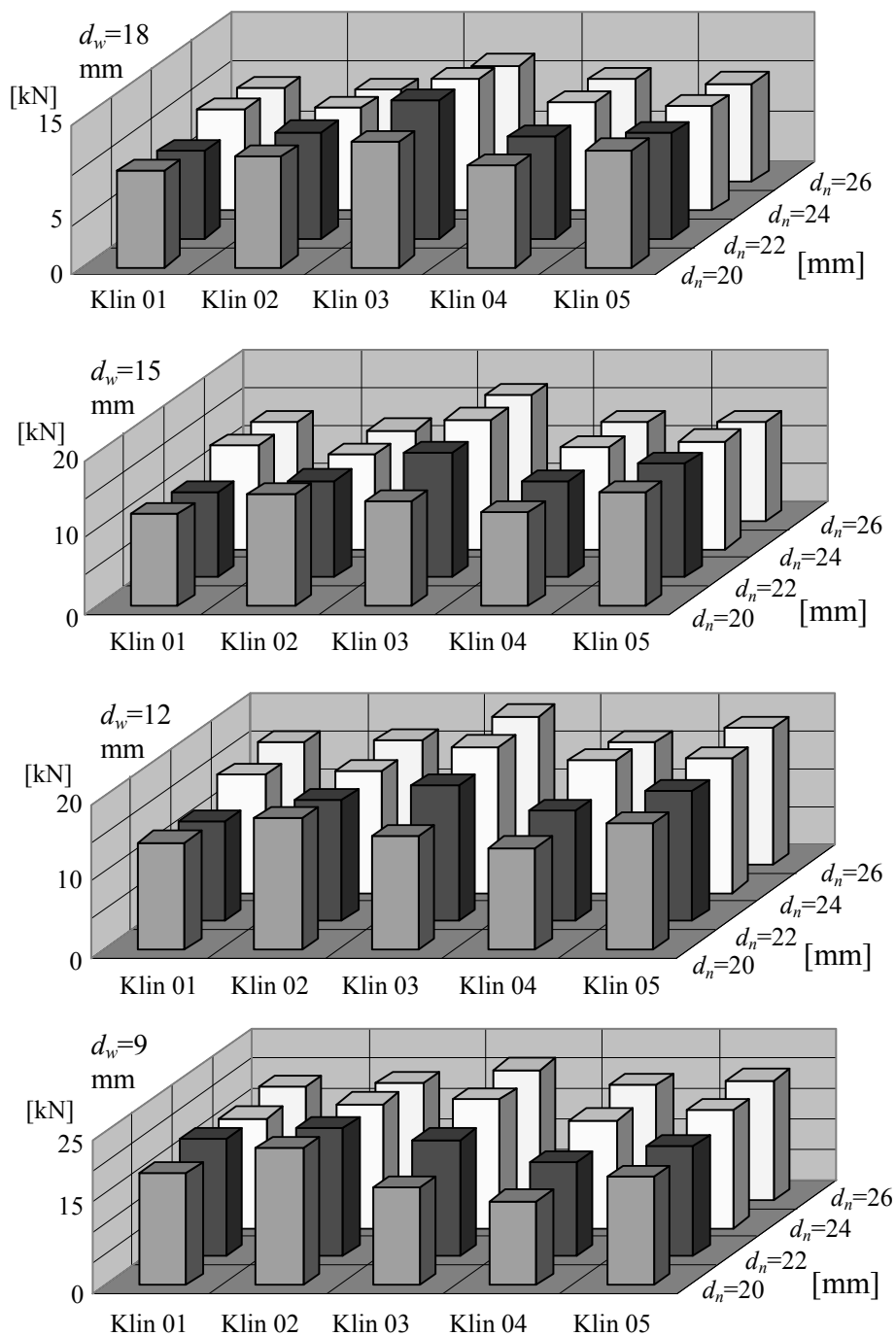


Analiza danych zamieszczonych w tabeli 6.2 wykazuje silną zależność między zastosowanymi parametrami procesu a odnotowanymi siłami maksymalnymi. I tak w przypadku próbek cienkościennych ( $d_w = 18$  mm) największe wartości siły rozporowej występowały przy zastosowaniu klinów z kątami:  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ . Podobne wyniki zarejestrowano również przy walcowaniu z wsadów o średnicy wewnętrznej  $d_w = 15$  mm i  $d_w = 12$  mm, za wyjątkiem kształtowania na najmniejszą średnicę  $d_n = 20$  mm, gdzie maksymalne wartości sił towarzyszyły stosowaniu klinów z:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$ . W procesach walcowania z wsadów o największych grubościach ścianki bocznej ( $d_w = 9$  mm) największe siły rozporowe występowały wówczas, gdy używano narzędzi o kątach  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$  (przy walcowaniu na średnicę  $\varnothing 20$  mm i  $\varnothing 22$  mm) oraz  $\alpha = 40^\circ$  i  $\beta = 8^\circ$  przy  $d_n = 24$  lub  $26$  mm.

Ponadto stwierdza się występowanie silnej zależności między grubością ścianki wsadu a siłami niezbędnymi do realizacji procesu WPK. Na przykład porównanie wartości sił odnotowanych dla WPK z wsadów o  $d_w = 18$  i  $9$  mm, wykazuje że zwiększenie grubości ścianki z  $6$  do  $10,5$  mm niejednokrotnie powodowało nawet dwukrotny wzrost siły rozporowej. Również wzrost stopnia gniotu  $\delta$  z reguły wywołuje zwiększenie siły rozporowej, jednakże nie w tak dużym stopniu jaki odnotowano analizując wpływ grubości ścianki wsadu  $g_o$ .

Dla łatwiejszego porównania wpływu geometrii klinów (kątów  $\alpha$  i  $\beta$ ) na wielkość sił rozporowych, wykonano wykresy słupkowe, które zamieszczono na rys. 6.11. Oznaczenia klinów podane na tym rysunku są zgodne z opisem zamieszczonym w tabeli 6.2.

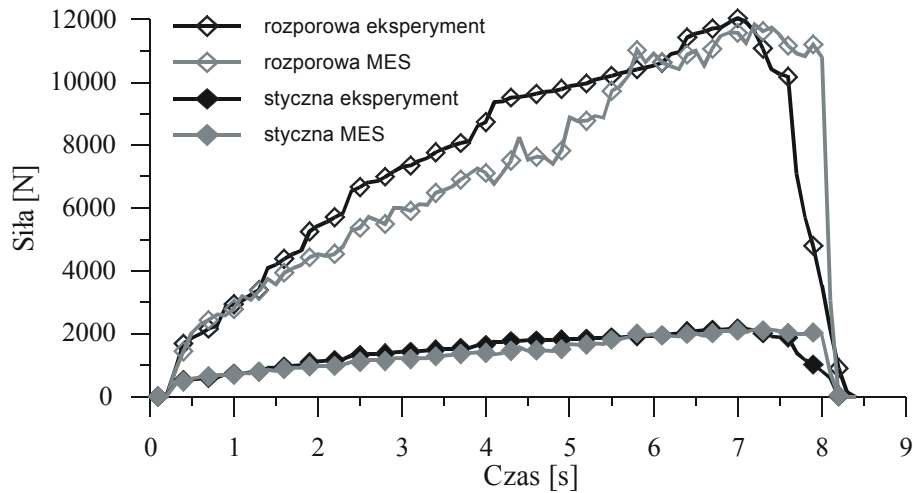
W trakcie badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych analizowano również jak zmieniają się siły styczna i rozporowa w trakcie procesu WPK. Na rys. 6.12 przedstawiono rozkłady tych sił obliczone i zmierzone dla przypadku walcowania przebiegającego stabilnie i gwarantującego wytwarzanie wyrobu, którego przekrój porzecznym ma owalizację mniejszą od dopuszczalnej. Z rysunku tego wynika, że obie siły wraz ze wzrostem zaawansowania procesu zwiększają się. Wzrost ten na długości strefy kształtowania przyjmuje niemalże charakter liniowy. W strefie kalibrowania siły ulegają stabilizacji a następnie zmniejszają się. Należy zauważyć, że uzyskany charakter rozkładów sił, a w szczególności siły stycznej różni się od tych jakie odnotowano dla stabilnych przypadków walcowania z wsadów pełnych [66]. Wówczas bowiem praktycznie na całej długości strefy kształtowania siła styczna utrzymuje jednakową wartość.



**Rys. 6.11.** Maksymalne wartości sił rozporowych zmierzone w badanych procesach WPK

Zwiększanie się sił, jakie zaobserwowano w procesie WPK wyrobów drążonych, tłumaczy się trudnościami ze skutecznym usunięciem owalizacji przekroju poprzecznego występującymi już w fazie kształtowania. W efekcie czego zwiększa się powierzchnia styku materiał – narzędzie, a w konsekwencji wzrostowi ulegają siły kształtowania.

Zestawienie rozkładów sił pokazane na rys. 6.12 potwierdza również bardzo dobrą zgodność (jakościową i ilościową) pomiędzy siłami prognozowanymi teoretycznie i wyznaczanymi eksperymentalnie. Tym samym ponownie wykazano zasadność stosowania w analizie złożonych przypadków kształtowania plastycznego modelowania numerycznego, w szczególności realizowanego metodą elementów skończonych.



Rys. 6.12. Przebiegi sił stycznych i rozporowych w trakcie stabilnego procesu WPK ( $d_w = 15 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$  i  $\delta = 1,36$ )

#### 6.4. Stan odkształcenia

Zastosowanie MES umożliwia również dokładne przeanalizowanie stanu odkształcenia i naprężenia w wyrobach walcowanych. W szczególności pozwala ocenić jak zmiana parametrów procesu wpływa na rozkłady oraz wartości intensywności odkształcenia w odkuwkach. Na rys. 6.13a pokazano (na przekrojach wzdłużnych i poprzecznych) rozkłady intensywności odkształcenia, obliczone dla przypadków WPK realizowanych przy zastosowaniu narzędzi klinowych z kątami  $\alpha$  w zakresie  $20^\circ \div 40^\circ$  oraz kątami  $\beta$  zawartymi w przedziale  $6^\circ \div 10^\circ$ . Wszystkie przypadki dotyczą walcowa-

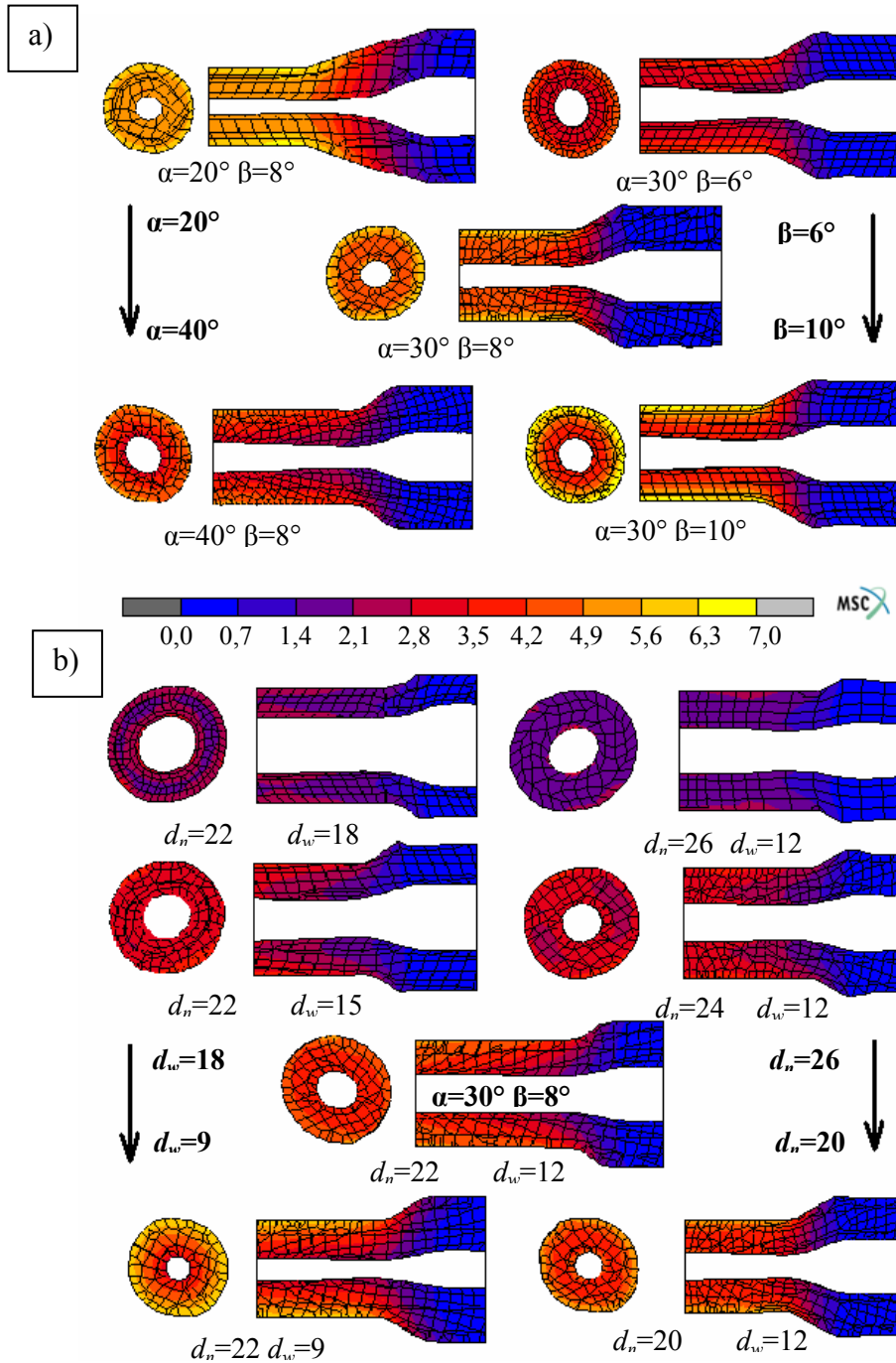
nia przewężenia o średnicy  $d_n = 20$  mm z wsadów drażonych, których średnica wewnętrzna jest równa i wynosi  $d_w = 12$  mm.

Jak wynika z rys. 6.13a, największe odkształcenia (w całym przekroju walcowanego wyrobu) uzyskuje się stosując kliny z najmniejszym kątem pochylenia ścian bocznych  $\alpha = 20^\circ$ . W tym przypadku walcowania największy jest udział płynięcia w kierunku promieniowym, czego odzwierciedleniem jest najbardziej (spośród przedstawionych na rys. 6.13) zredukowana średnica otworu wewnętrznego.

Zwiększenie kąta rozwarcia klina  $\beta$  powoduje zmniejszenie płynięcia metalu w kierunku promieniowym, prowadzi do pocienienia ścianki oraz zmniejszenia intensywności odkształcenia w odwalcowanych częściach wałka. Analizując wpływ kąta rozwarcia klina  $\beta$  na rozkłady intensywności odkształcenia stwierdza się, że im większy jest  $\beta$ , tym bardziej wyraźny jest charakter warstwowego rozkładu odkształceń, co jest typowe dla WPK wyrobów pełnych [71, 73]. Mianowicie odkształcenia rozkładają się pierścieniowo, przyjmując wartości największe w zewnętrznych warstwach metalu i zmniejszają się w kierunku do środka odkuwki – jest to szczególnie widoczne w rozkładzie odkształceń odnotowanych dla WPK przy  $\alpha = 30^\circ$  oraz  $\beta = 10^\circ$ .

Na rys. 6.13b zestawiono rozkłady intensywności odkształcenia w sposób umożliwiający określenie wpływu zastosowanego stopnia gniotu  $\delta$  oraz średnicy wewnętrznej wsadu  $d_w$  na charakter odkształceń uzyskiwanych w wyrobach walcowanych. Z rysunku tego wynika, zgodnie z oczekiwaniami, że zmieniając stopień gniotu  $\delta$  (w drodze zmniejszania średnicy  $d_n$ ) powoduje się zwiększenie odkształceń w wyrobie walcowanym. Podobny efekt uzyskuje się poprzez zwiększenie grubości ścianek wsadu stosowanego w procesie walcowania.

Cechą charakterystyczną walcowania poprzeczno – klinowego jest występowanie w nim dość znacznego udziału odkształceń zbędnych. Związane jest to z charakterystycznym, spiralnym płynięciem materiału w trakcie kształtowania. W wypadku wyrobów drażonych, odkształcenia zbędne zwiększają się w efekcie cyklicznego przeginania wyrobu występującego w trakcie usuwania owalizacji przekroju poprzecznego. O wpływie kątów narzędzia ( $\alpha$  i  $\beta$ ) na wielkość odkształceń zbędnych można wnioskować porównując rozkłady odkształceń uzyskane dla odkuwek walcowanych przy tych samych parametrach  $d_w$  i  $d_n$  – rys. 6.13.



Rys. 6.13. Obliczone rozkłady intensywności odkształcenia w odkuwkach drążonych, otrzymywanych w procesach WPK realizowanych przy parametrach podanych na rysunku

## 6.5. Zastosowanie wewnętrznego trzpienia swobodnego

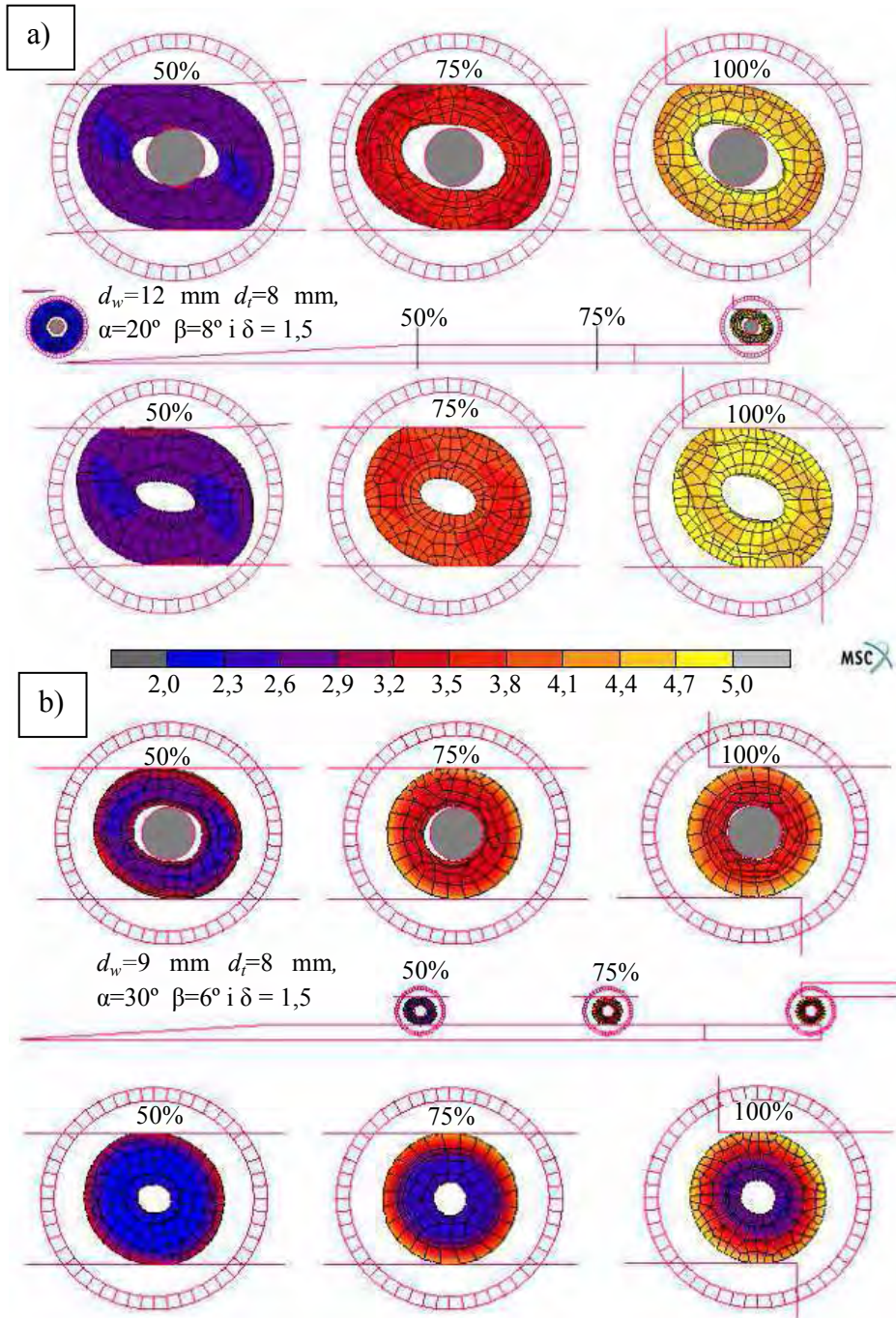
Dla określenia wpływu zastosowania wewnętrznego trzpienia swobodnego na przebieg WPK wyrobów drażonych wykonano symulacje numeryczne oraz badania doświadczalne kilku, wybranych przypadków kształtowania. W badaniach stosowano trzpienie o średnicach:  $d_t = 8, 10$  i  $12$  mm.

Na rys. 6.14a zestawiono wyniki obliczeń numerycznych dwóch przypadków WPK (realizowanych przy tych samych parametrach klinów oraz wsadu). Przy czym w jednym z procesów zastosowano trzpień o średnicy  $d_t = 8$  mm. Porównanie zmian kształtów przekroju poprzecznego odkuwki zachodzących w trakcie walcowania wykazuje większą owalizację przekroju poprzecznego w fazie kształtowania (zaawansowanie procesu 50% i 75% - rys. 6.13) w przypadku walcowania z trzpieniem. Występujący w tej fazie procesu wzrost owalizacji tłumaczy się ograniczeniem płynięcia materiału w kierunku promieniowym. Jednakże owalizacja ta jest zmniejszana na etapie kalibrowania do poziomu obserwowanego w odkuwce kształtowanej swobodnie. Należy zauważyć, że w obydwu porównywanych procesach walcowania owalizacja znacznie przekracza przyjętą wartość graniczną  $\Delta = 0,6$  mm.

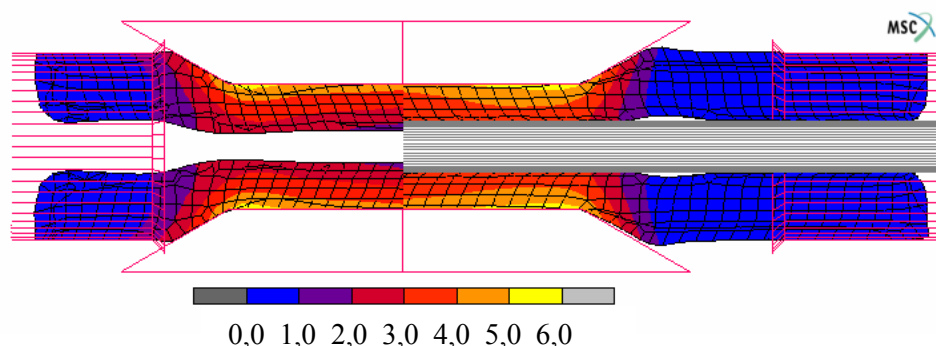
Z kolei na rys. 6.14b dokonano porównania progresji kształtu przekroju poprzecznego, występującej przy parametrach procesu zapewniających skuteczne usuwanie owalizacji w procesie walcowania swobodnego. Na podstawie danych zamieszczonych na tym rysunku stwierdza się, że zastosowanie trzpienia w takim procesie nie odbija się negatywnie na skutecznym usuwaniu owalizacji.

W efekcie wprowadzenia trzpieni zwiększają się odkształcenia nie tylko na powierzchni wewnętrznej wyrobu, ale i na całej grubości ścianki (rys. 6.15). Jest to głównie wynikiem zmniejszenia grubości ścianki, która w tym przypadku jest jednoznacznie określona przez rozstaw klinów (równy średnicy  $d_n$ ) oraz średnicę zewnętrzną zastosowanego trzpienia  $d_t$ .

Podsumowując rezultaty symulacji numerycznych (rys. 6.14a - 6.14b) stwierdza się, że zastosowanie trzpienia nie wpływa na stabilność walcowania, pozwala natomiast produkować wyroby o jednakowej (przyjętej) grubości ścianki na całej długości kształtowanego przewężenia.



**Rys. 6.14.** Zestawienie porównawcze progresji kształtu środkowych przekrojów poprzecznych próbek walcowych z trzpieniem i bez niego



**Rys. 6.15.** Porównanie rozkładów grubości ścianek oraz odkształceń w wyrobie kształtowanym bez trzpienia i na trzpieniu ( $d_w = 9 \text{ mm}$ ,  $d_t = 8 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ$  i  $\delta = 1,5$ )

Jak pokazano na rys. 6.15, w przypadku zastosowania trzpienia wewnętrznego niewielki wzrost średnicy otworu wewnętrznego obserwowany jest tylko na zewnątrz strefy odkształcenia. Tamże występuje również spiętrzenie materiału powodujące miejscowe zwiększenie średnicy wsadu. Przypuszcza się, że korzystanie z narzędzi klinowych zabezpieczających również styk z wsadem poza strefą odkształcenia, oprócz eliminacji spiętrzenia materiału, powodowałoby ograniczenie tendencji do wzrostu średnicy wewnętrznej w tym obszarze wyrobu.

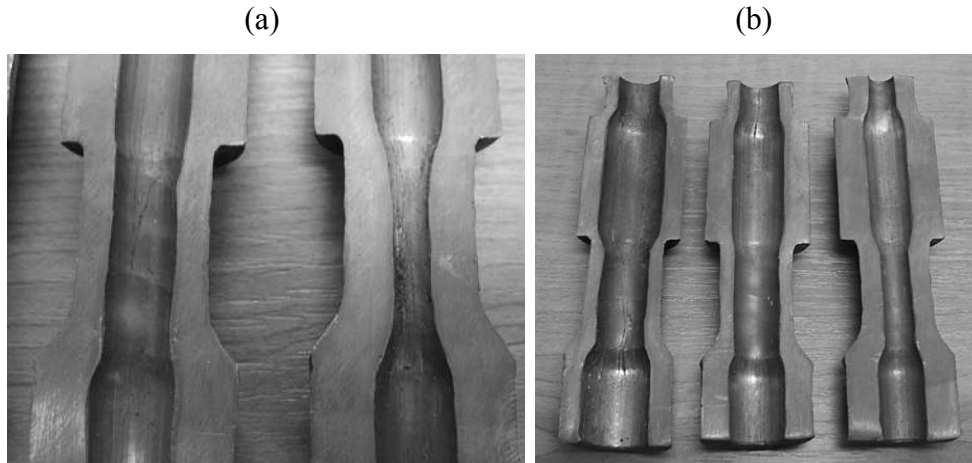
Pozytywny wpływ stosowania trzpienia na uzyskiwanie równomiernego rozkładu grubości ścianek w obszarze kształtowanego przewężenia potwierdzono w trakcie badań doświadczalnych. Przykładowe, uzyskane w trakcie tych prac, rozcięte wzdłużnie próbki pokazano na rys. 6.16.

## 6.6. Ograniczenia stabilności przebiegu kształtowania

Na podstawie wykonanych prac badawczych stwierdzono, że stabilność przebiegu procesu WPK wyrobów drążonych może być zaburzona przez:

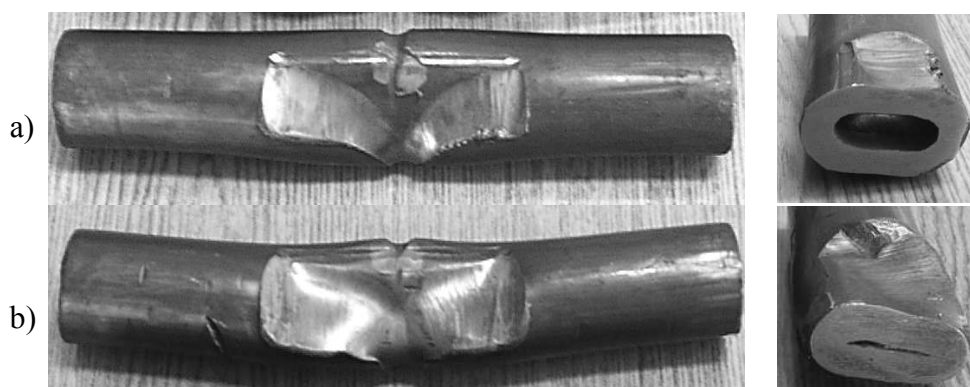
- niekontrolowany poślizg, któremu często towarzyszy zgniecenie wyrobu;
- przewężenie kształtowanej części;
- deformację powierzchni wewnętrznej odkuwki.





**Rys. 6.16.** Przekroje wzdłużne wyrobów drążonych kształtowanych WPK przy: (a)  $d_w = 12$  mm,  $d_t = 10$  mm (po lewej) i bez trzpienia (po prawej); (b)  $d_w = 18$  mm,  $d_t = 12$  mm (po lewej),  $d_w = 15$  mm,  $d_t = 12$  mm (w środku),  $d_w = 12$  mm,  $d_t = 8$  mm (po prawej)

Niekontrolowany poślizg występuje wówczas, gdy suma momentów sił wprawiających odkuwkę w ruch obrotowy jest mniejsza od sumy momentów sił przeciwnych temu ruchowi. W przypadku wystąpienia takiego zakłócenia stabilności obrabiany wyrób traci zdolność do obracania się i jest zgniatany przez przemieszczające się przeciwnie narzędzia klinowe. W takiej sytuacji może dojść do niekontrolowanego przesunięcia wyrobu po powierzchniach narzędzi, co czasami może doprowadzić do uszkodzenia oprzyrządowania (np. mogą zostać wyłamane noże odcinające umieszczone za strefą kalibrowania). Wystąpieniu niekontrolowanego poślizgu sprzyja obniżenie czynnika tarcia na powierzchni kontaktu materiał – narzędzia oraz stosowanie narzędzi z dużymi kątami rozwarcia klina  $\beta$  oraz kształtującymi  $\alpha$ . W przypadku walcowania z wsadów drążonych większe prawdopodobieństwo zaistnienia tego zakłócenia występuje wówczas, gdy stosuje się wsady o mniejszej grubości ścianki. I tak w całym zakresie parametrów ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ) nie stwierdzono niekontrolowanego poślizgu wówczas, gdy walcowano z wsadów o  $d_w = 9$  mm. Natomiast, gdy wsady miały duże otwory wewnętrzne ( $d_w = 18$  lub  $15$  mm) ograniczenie to występowało często. Przykłady próbek zdeformowanych w wyniku wystąpienia niekontrolowanego poślizgu podano na rys. 6.17.



**Rys. 6.17.** *Próbki zdeformowane w efekcie wystąpienia niekontrolowanego poślizgu (a) przy  $d_w = 18$  mm; (b) przy  $d_w = 15$  mm ( $\delta = 1,36$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$  - w obu przypadkach)*

Przewężenie walcowanej części wyrobu występuje wówczas, gdy składowe osiowe siły walcowania mają tak duże wartości, że naprężenia rozciągające w materiale wywołane oddziaływaniem tych sił osiągną wartość graniczną (równą naprężeniu uplastyczniającemu). W takiej chwili procesu centralna część odkuwki podlega rozciąganiu, tworzy się szyjka (w sposób typowy dla próby rozciągania), a czasami występuje zerwanie walcowanego stopnia odkuwki. Z analizy literatury [25, 67, 68] wynika, że ograniczenie to występuje najczęściej wtedy, gdy stosuje się kliny z dużymi kątami  $\alpha$  i  $\beta$ , a samo walcowanie przebiega przy znacznych stopniach gniotu  $\delta$ .

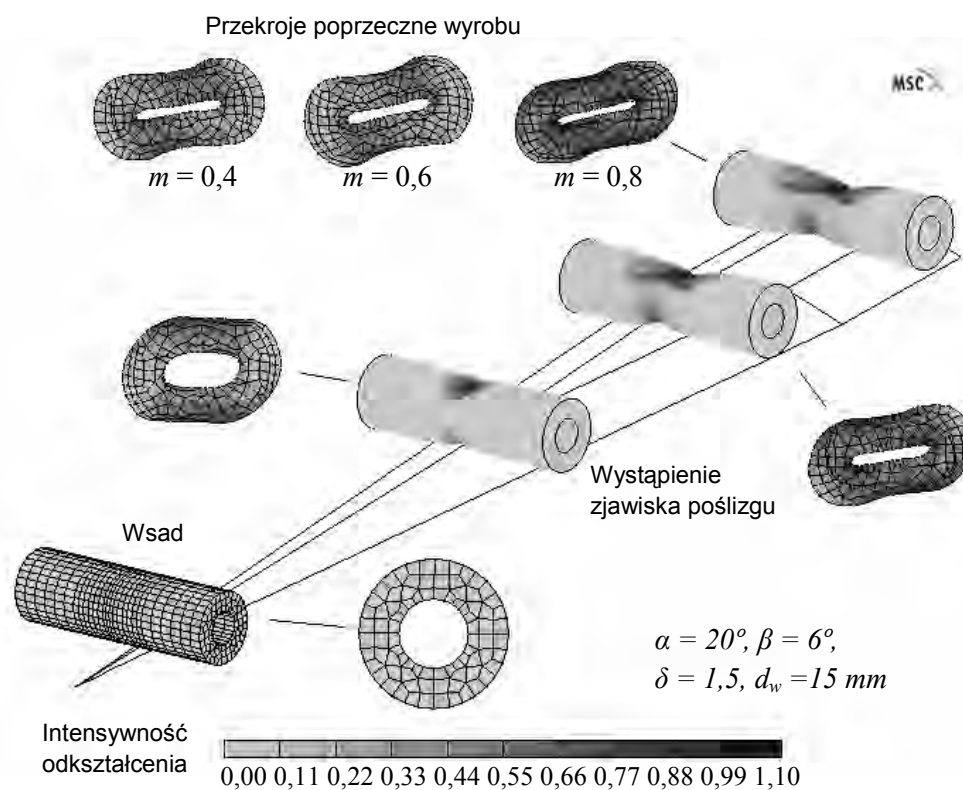
Na podstawie wykonanych badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych nie stwierdzono w zakresie analizowanych parametrów ( $\alpha = 20^\circ \div 40^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ \div 10^\circ$ ,  $\delta \leq 1,5$ ) ani jednego przypadku naruszenia stabilności WPK następującego w efekcie przewężenia odkuwki. Dla wykazania, że ograniczenie to może wystąpić również w procesie walcowania wyrobów drażonych przeprowadzono dodatkowe próby kształtowania, realizowane przy większych, od dotychczas stosowanych, stopniach gniotu ( $\delta = 1,67$ ). Przy takich warunkach walcowania odnotowano już przypadki zakłócenia stabilności procesu w efekcie wystąpienia omawianego ograniczenia. Przykład odkuwki, z wyraźnie przewężonym centralnym stopniem pokazano na rys. 6.18.



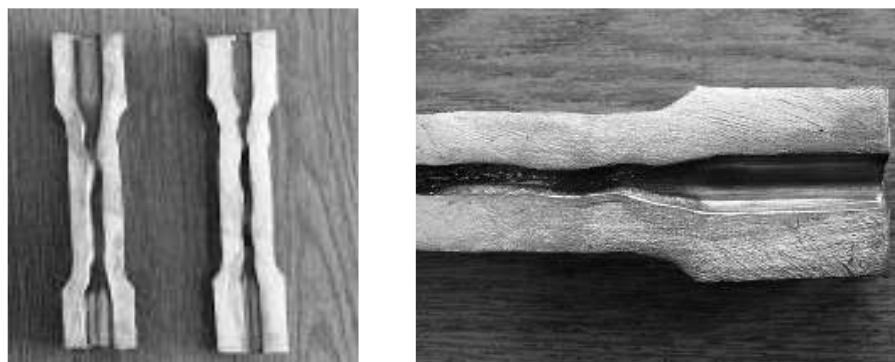
**Rys. 6.18.** Przewężenie centralnej części wyrobu obserwowane w procesie WPK przy  $\delta = 1,67$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ ,  $d_w = 12$  mm

W ramach analiz teoretycznych wykonano serię obliczeń, których celem było zbadanie możliwości modelowania zjawisk zakłócających stabilność walcowania wyrobów drążonych. W efekcie tych prac stwierdzono, że stosując MES można bez większych problemów modelować procesy WPK, w których występuje niekontrolowany poślizg doprowadzający do zgniecenia odkuwki (rys. 6.19). Natomiast nie udało się zamodelować numerycznie tych procesów WPK, w których występowało przewężenie odkuwki. Wówczas, ze względu na duże komplikacje związane głównie z nieciągłościami geometrycznymi, proces obliczeniowy był przerywany samoistnie przez program MSC.SuperForm.

Ostatnie z omawianych ograniczeń stabilności procesu WPK dotyczy deformowania powierzchni wewnętrznej wyrobu. Możliwość wystąpienia takiego (dodatkowego w stosunku do typowych procesów WPK) ograniczenia podejrzewano już w trakcie wykonywanych obliczeń numerycznych, w których, przy pewnych parametrach procesu, notorycznie występował błąd związany z przebudową siatki. Błędu tego nie udało się wyeliminować mimo wielu prób, w których zmieniano wielkość elementów, układ współrzędnych, kryteria przebudowy siatki, itd. Postanowiono zatem ten przypadek WPK (realizowany przy:  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ ,  $\delta = 1,5$ ,  $d_w = 12$  mm) zbadać w próbach stanowiskowych. W efekcie tych prób stwierdzono wystąpienie silnej deformacji powierzchni wewnętrznych, które było przyczyną niestabilności numerycznych, obserwowanych w analizie teoretycznej. Charakter występujących deformacji wewnętrznych odkuwek ilustruje rys. 6.20.



**Rys. 6.19.** Rezultat obliczeń numerycznych ilustrujących możliwości modelowania procesów WPK, w których stabilność zostaje naruszona przez wystąpienie niekontrolowanego poślizgu

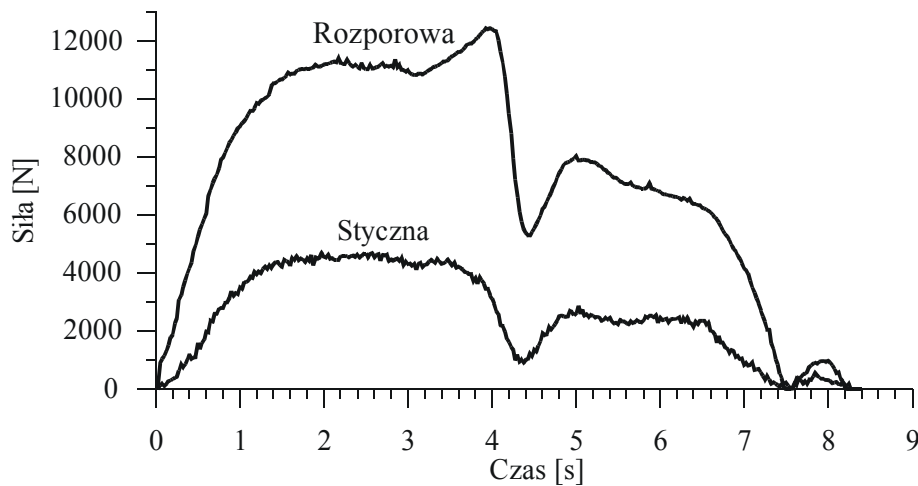


**Rys. 6.20.** Próbkę ze zdeformowaną powierzchnią wewnętrzną

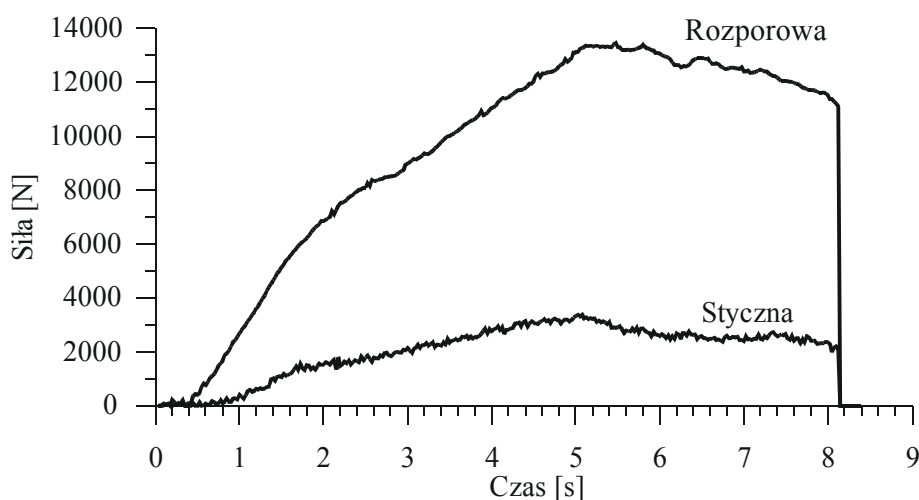
W procesach WPK wyrobów drążonych, w których wystąpiły przedstawione ograniczenia stabilności odnotowano, że rozkłady zmian sił rozporowych i stycznych różnią się od typowego (przedstawionego na rys. 6.12)

przebiegu tych sił, obserwowanego w procesie stabilnym. I tak na rys. 6.21 pokazano jak zmieniają się siły w trakcie procesu walcowania, w którym występuje przewężenie kształtowanej części odkuwki. Z rysunku tego wynika, że po początkowym wzroście sił kształtowania następuje ich nagłe zmniejszenie będące efektem zainicjowania tworzenia się szyjki na walcowanym stopniu odkuwki. Następnie siły ulegają niewielkiemu wzrostowi, co prawdopodobnie jest efektem zetknięcia się wewnętrznych ścianek odkuwki. W dalszych fazach procesu obserwuje się stopniowe zmniejszanie wartości sił, które osiągają wartości minimalne w momencie wyjścia odkuwki ze strefy kalibrowania.

Przebiegi zmian wielkości sił w procesie WPK, podczas którego wystąpił niekontrolowany poślizg odkuwki podano na rys. 6.22. Z wykresu tego wynika, że siły styczne i rozporowe w procesie niestabilnym (ze względu na wystąpienie zjawiska poślizgu) równomiernie rosną do momentu wystąpienia zakłócenia. Następnie obserwuje się powolne zmniejszanie tych sił. Przy czym charakterystyczne jest, że przy tym ograniczeniu stabilności wysokie wartości sił stycznej i rozporowej utrzymują się aż do końca procesu walcowania.



**Rys. 6.21.** Zmierzone przebiegi siły stycznej i rozporowej w trakcie procesu WPK, w którym utworzyło się przewężenie kształtowanej części wyrobu ( $d_w = 12$  mm,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$  i  $\delta = 1,67$ )



**Rys. 6.22.** Zmierzone przebiegi sił stycznej i rozporowej w trakcie procesu WPK, w którym wystąpił poślizg ( $d_w = 15 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$  i  $\delta = 1,5$ )

W przypadku wystąpienia deformacji wewnętrznych, w przebiegach sił stycznych i rozporowych pojawiają się lekkie wahania ich wartości, niemniej jednak przewidywanie na ich podstawie tej formy utraty stabilności procesu jest raczej trudne.





## 6.7. Podsumowanie wyników badań

W podsumowaniu wyników badań doświadczalnych oraz obliczeń teoretycznych wykonano zestawienie, podane w tabelicy 6.3, ilustrujące wpływ podstawowych parametrów geometrycznych narzędzi i wsadu na stabilność procesu WPK wyrobów drażonych. Zestawienie to w sposób obrazowy przedstawia zakres stabilności kształtowania klinami płaskimi wyrobów drażonych. Dla poprawy czytelności obszar ten wyróżniono w tabelicy kolorem szarym. Należy zauważyć, że tolerancje wymiarowe wyrobów uzyskiwanych (przy parametrach gwarantujących stabilność WPK) nie odbiegają od tych, które stosuje się w praktyce przemysłowej przy walcowaniu odkuwek pełnych.

Korzystając z danych zamieszczonych w tabelicy można stwierdzić, że najkorzystniejszym dla zapewnienia stabilnego przebiegu WPK jest kąt kształtujący  $\alpha = 30^\circ$ . Stosowanie tego kąta, przy  $\beta = 6^\circ$  lub  $8^\circ$ , zapewnia

bowiem prawidłowe ukształtowanie wyrobu prawie w całym zakresie stosowanych stopni gniotu  $\delta$  oraz grubości ścianek wsadu  $g_o$ . Wyjątkiem jest proces WPK z wsadów o najcieńszej grubości ścianki ( $d_w = 18$  mm), gdzie lepsze rezultaty uzyskano stosując klin z kątami  $\alpha = 40^\circ$  i  $\beta = 6^\circ$ . Natomiast korzystanie w procesach WPK wyrobów drążonych z klinów o kącie pochylenia ścian bocznych  $\alpha = 20^\circ$ , w świetle wykonanych prac badawczych, jest nieuzasadnione.

**Tab. 6.3.** Rezultaty badań mających na celu określenie stabilności walcowania klinami płaskimi wyrobów drążonych, w zakresie analizowanych parametrów procesu

$d_w=18$	$\alpha = 20^\circ$				$\alpha = 30^\circ$				$\alpha = 40^\circ$						
	$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]						
	26	24	22	20	26	24	22	20	26	24	22	20			
$\beta=6^\circ$	o	o	o	o	o	o	o	o	p	p	p/o	p/o			
$\beta=8^\circ$	o	o	o	o/x	o	p	p	p/x	o/x	o/x	o/x	o/x			
$\beta=10^\circ$	o	o/x	o/x	o/x	p	p/o	o/x	o/x	o/x	o/x	x	x			
$d_w=15$	$\alpha = 20^\circ$				$\alpha = 30^\circ$				$\alpha = 40^\circ$						
	$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]						
	26	24	22	20	26	24	22	20	26	24	22	20			
$\beta=6^\circ$	o	o	o	o	o	p	p	p	p	p/o	p/o	p/o			
$\beta=8^\circ$	o	o	o	o/x	o	p	p	p/x	p	p	p	p			
$\beta=10^\circ$	p/o	o/x	o/x	o/x	p	p/o	o/x	o/x	p	p/x	x	x			
$d_w=12$	$\alpha = 20^\circ$				$\alpha = 30^\circ$				$\alpha = 40^\circ$						
	$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]						
	26	24	22	20	26	24	22	20	26	24	22	20			
$\beta=6^\circ$	o	o	o	o	o	p/o	p	p	p	p/o	p/o	p/o			
$\beta=8^\circ$	o	p/o	p	p	o	p	p	p	p	p	p/d	d			
$\beta=10^\circ$	o	o	o	o	p	p/o	p/o	o	p	p/x	d	d			
$d_w=9$	$\alpha = 20^\circ$				$\alpha = 30^\circ$				$\alpha = 40^\circ$						
	$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]				$d_n$ [mm]						
	26	24	22	20	26	24	22	20	26	24	22	20			
$\beta=6^\circ$	o	o	o	o	p	p	p/o	o	p	p	p/o	o			
$\beta=8^\circ$	o	o	p	p	p	p	p	p	o	o	o	o			
$\beta=10^\circ$	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	d	d			
															
poślizg i zgniecenie – x				deformacja wewnętrzna - d				owalizacja – o				wyrób prawidłowy - p			

Ponadto stwierdzono możliwość wystąpienia dodatkowego, w stosunku do znanych w procesach WPK wyrobów pełnych, ograniczenia stabilności walcowania następującego w efekcie zdeformowania powierzchni wewnętrznej. Ten defekt występował w przypadku walcowania tylko klinami z  $\alpha = 40^\circ$  oraz  $\beta = 10^\circ$  lub  $8^\circ$ , dla których wartość  $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta$  wynosi odpowiednio 0,148 i 0,118. Uwzględniając zatem powyższy fakt proponuje się by projektowane narzędzia klinowe, zabezpieczające walcowanie wyrobów drążonych, spełniały następującą nierówność:

$$\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta \leq 0,11. \quad (6.1)$$

Należy zauważyć, że spełnienie nierówności (6.1) nie gwarantuje iż projektowany proces WPK będzie przebiegał w sposób stabilny. Dlatego też każdorazowo projektując proces WPK wyrobów drążonych należy przeprowadzić gruntowną analizę kształtowania, która powinna bazować przede wszystkim na symulacji numerycznej wykonanej metodą elementów skończonych.



## 7. ANALIZA PROCESU WPK WAŁKÓW DRAŻONYCH TRZEMA NARZĘDZIAMI

Szukając rozwiązań umożliwiających zmniejszenie owalizacji występującej w przypadku procesów WPK dwoma klinami, postanowiono przeanalizować walcowanie wyrobów drażonych trzema narzędziami. Ze względu na fakt, że badania doświadczalne tych procesów wymagałyby kosztownej budowy nowych stanowisk badawczych, w analizie tej ograniczono się wyłącznie do obliczeń numerycznych, prowadzonych w oparciu o metodę elementów skończonych (MES).

### 7.1. Walcowanie trzema walcami klinowymi

Rzadziej spotykaną w warunkach przemysłowych metodą WPK jest kształtowanie za pomocą trzech walców, na których nawinięte są kliny [14, 16, 33, 76]. Zaletami tej metody są eliminacja listew podtrzymujących odkuwkę między walcami w trakcie kształtowania oraz zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia pęknięć wewnętrznych, w kształtowanych wyrobach pełnych [15, 16, 20, 25]. Podstawową wadą tej metody jest zaś ograniczenie długości klinów kształtujących, wynikające następującego warunku [62]:

$$R_w < \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} r, \quad (7.1)$$

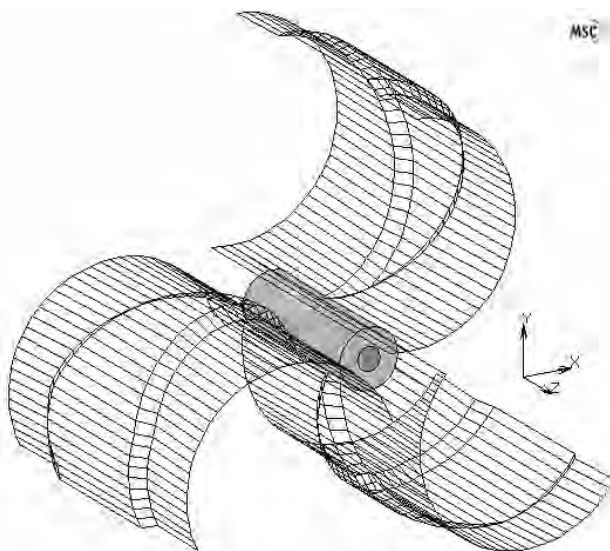
określającego graniczną wartość promienia walca  $R_w$ , w zależności od promienia  $r$  walcowanego stopnia odkuwki.

W zaplanowanych badaniach numerycznych postanowiono przeanalizować procesy WPK, realizowane z wykorzystaniem dziewięciu zestawów narzędzi klinowych, o parametrach podanych w tabeli 7.1.

**Tab. 7.1.** Parametry klinów, uwzględnianych w analizie trójwalcowych procesów WPK

Nr zestawu	Kąt kształtujący $\alpha$ [°]	Kąt rozwarcia klina $\beta$ [°]	Wartość iloczynu $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta$
1	20°	15°	0,097
2	20°	18°	0,118
3	20°	12°	0,077
4	30°	15°	0,154
5	30°	18°	0,187
6	30°	12°	0,122
7	40°	15°	0,225
8	40°	18°	0,273
9	40°	12°	0,178

Dla każdego z przyjętych zestawów narzędzi przeliczono cztery przypadki kształtowania, które odpowiadały walcowaniu wsadów o średnicy zewnętrznej  $\varnothing 30$  mm oraz średnicach wewnętrznych  $d_w = 18, 15, 12$  i  $9$  mm na jednakową średnicę  $d_n = 20$  mm (czyli przy  $\delta = 1,5$ ). Dodatkowo, stosując zestaw nr 4 ( $\alpha = 30^\circ, \beta = 15^\circ$ ), przeprowadzono obliczenia procesów WPK realizowanych przy stopniach gniotu  $\delta = 1,25$  i  $\delta = 1,75$ . Ogółem przeanalizowano 44 przypadki walcowania wyrobów drążonych trzema walcami, z których jeden pokazano na rys. 7.1.

**Rys. 7.1.** Model numeryczny procesu WPK trzema walcami ( $\alpha = 30^\circ, \beta = 15^\circ$ )

W obliczeniach tych stosowano model materiałowy oraz model tarcia identyczny jak, w omawianych wcześniej, procesach walcowania klinami płaskimi. Założono również, że wszystkie walce obracają się w tym samym kierunku z jednakową prędkością obrotową  $\omega = 1$  rad/s, co po uwzględnieniu wartości promienia walca  $R_w = 60$  mm (opisującego powierzchnię kalibrującą) ustalało prędkość liniową narzędzi na poziomie przyjmowanym uprzednio w analizie płaskoklinowych procesów WPK. Szerokość walcowanego przewężenia dla wszystkich przypadków WPK była jednakowa i wynosiła 90 mm.

W efekcie wykonanych obliczeń określono wpływ podstawowych parametrów procesu na uzyskiwaną kołowość przekroju poprzecznego, zmianę grubości ścianki oraz wielkość sił kształtowania. Ponadto śledzono zmiany kształtu wyrobu następujące w trakcie walcowania głównie pod kątem określenia, czy stabilność procesu nie zostanie zakłócona w efekcie wystąpienia niepożądanych zjawisk takich jak niekontrolowany poślizg, czy przewężenie odkuwki. Przykładową progresję kształtu wałka drążonego, kształtowanego w procesie stabilnym (przy  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 18^\circ$ ,  $\delta = 1,5$ ) podano na rys. 7.2.

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że jedynym (z rozpatrywanych) zestawem narzędzi nie zapewniającym w pełni stabilnego przebiegu walcowania był zestaw nr 8, dla którego  $\alpha = 40^\circ$  a  $\beta = 18^\circ$ . Przyjęcie tak dużych parametrów kątowych klinów powodowało intensywne płynięcie materiału w kierunku promieniowym. Prowadziło to do nieusuwalnej deformacji przekroju poprzecznego odkuwki, który przyjmował kształt zbliżony do trójkąta. Defekt ten określono mianem triangularyzacji i uznano, że jest on odpowiednikiem niekontrolowanego poślizgu prowadzącego do zgniecenia występującego w procesach WPK wyrobów drążonych narzędziami płaskimi. Przykład zmian przekroju poprzecznego odkuwki w procesie walcowania, w którym wystąpił defekt triangularyzacji pokazano na rys. 7.3.

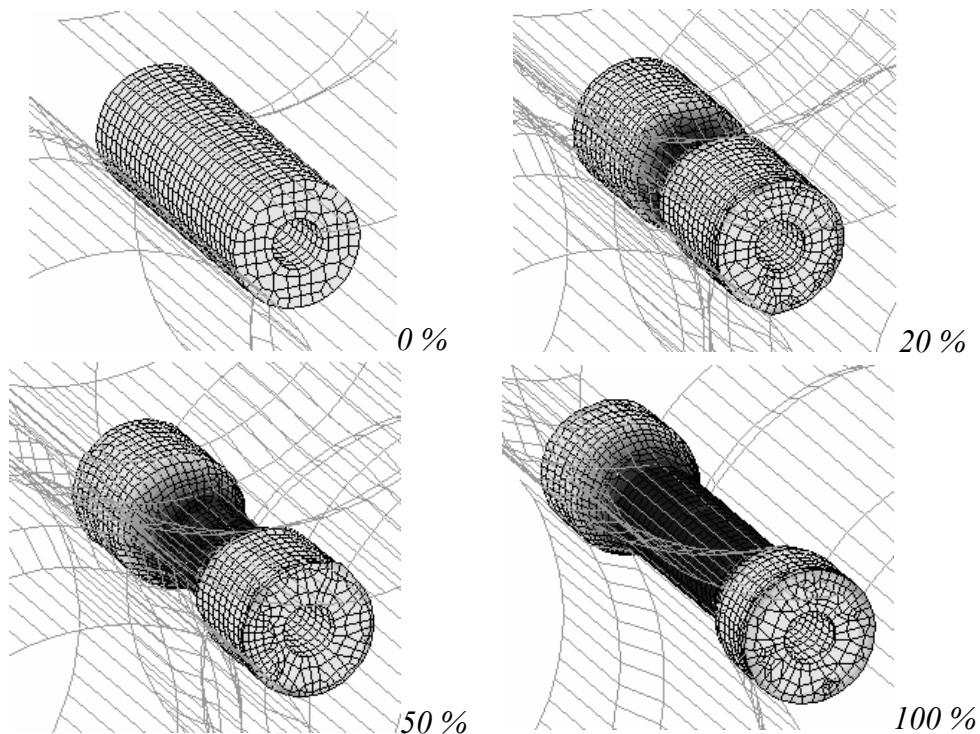
Uwzględniając wyniki obliczeń należy dokonać modyfikacji równania (6.1), które powinno być spełnione przez narzędzia projektowane dla procesów WPK klinami płaskimi. Mianowicie w przypadku walcowania trzema walcami stwierdzono, że proces ten przebiega w sposób stabilny nawet wówczas, gdy iloczyn tangensów kątów  $\alpha$  i  $\beta$  równy jest 0,22 (wartość dla zestawu narzędzi nr 7, gdzie  $\alpha = 40^\circ$  a  $\beta = 15^\circ$ ). Zatem warunek, który po-

winny spełniać kąty kształtujący  $\alpha$  i rozwarcia klina  $\beta$ , w przypadku trójwalcowego walcowania odkuwek drążonych, przedstawia się następująco:

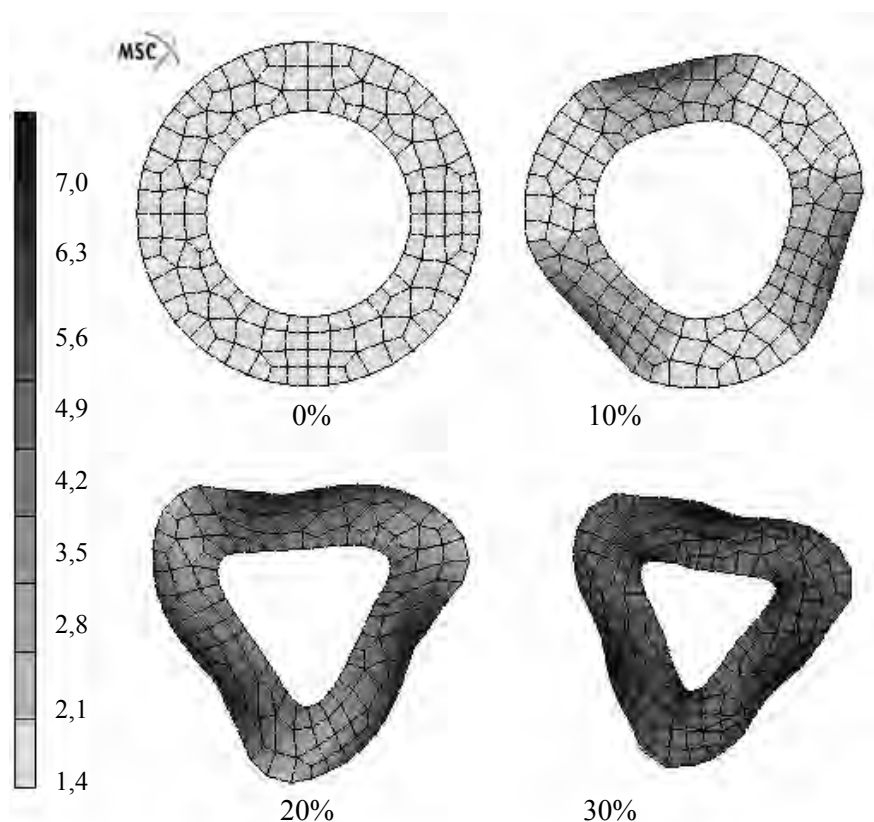
$$\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta \leq 0,22. \quad (7.2)$$

Analizując dokładność wykonania odkuwek kształtowanych trzema walcami stwierdzono, że we wszystkich przypadkach kształtowania, przebiegających w sposób stabilny, odchyłka okrągłości przekroju poprzecznego jest mniejsza od przyjętej wartości dopuszczalnej 0,6 mm. Wartości liczbowe tej odchyłki obliczone dla poszczególnych, analizowanych przypadków walcowania zestawiono w tabeli 7.2.

Oceniając wpływ parametrów katowych narzędzi na dokładność wykonania odkuwek generalnie stwierdza się, że zmniejszanie  $\alpha$  oraz  $\beta$  prowadzi do zmniejszania odchyłek okrągłości. Poza tym wykonane obliczenia w sposób jednoznaczny wskazują, że za optymalny kąt kształtujący w procesie WPK trzema walcami należy uznać  $\alpha = 30^\circ$ . Spostrzeżenie to jest zgodne z rezultatami uzyskanymi dla procesów walcowania klinami płaskimi.



**Rys. 7.2.** Zmiany kształtu wałka drążonego obliczone dla procesu WPK trzema walcami, przy zaawansowaniu podanym na rysunku



**Rys. 7.3.** Zmiany kształtu przekroju poprzecznego odkuwki obliczone dla procesu WPK, w którym występuje defekt triangularyzacji ( $d_w = 18 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 18^\circ$ ,  $\delta = 1,5$ )

Analiza wyników obliczeń numerycznych wykazuje również, że stosowanie trzech wałków klinowych wpływa korzystnie na rozkłady grubości ścianki w obszarze kształtowanego przewężenia. Dla porównania, jeśli w przypadku walcowania klinami płaskimi wahania grubości ścianki wyrobu kształtowanego wynosiły do 30%, to w przypadku stosowania trzech wałków różnice te nie przekraczały 10%. Jest to widoczne na przykład na rys. 7.4, na którym pokazano jak zmienia się grubość ścianki wyrobu w trakcie walcowania przy  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 18^\circ$  i  $\delta = 1,5$ .

Należy zauważyć, że w efekcie walcowania ścianki wyrobu ulegały pocienieniu, którego wartość zależała zarówno od użytych kątów klinów jak i od grubości ścianki wsadu. I tak analizując wpływ poszczególnych parametrów procesu na pocienienie ścianki (tab. 7.3) stwierdzono, że zwiększeniu

kąta rozwarcia klina  $\beta$  oraz zmniejszeniu otworu wewnętrznego  $d_w$  wsadu odpowiada zmniejszenie grubości ścianki, następujące w trakcie procesu WPK. Analizując wpływ kąta  $\alpha$  stwierdza się, że najmniejsze pocienienie ścianek występuje wówczas, gdy walcowanie prowadzi się przy kącie pochylenia bocznej ściany klina  $\alpha = 30^\circ$ .

**Tab. 7.2.** Obliczone odchyłki okrągłości wyrobów drążonych kształtowanych za pomocą trzech walców klinowych, przy  $\delta=1,5$

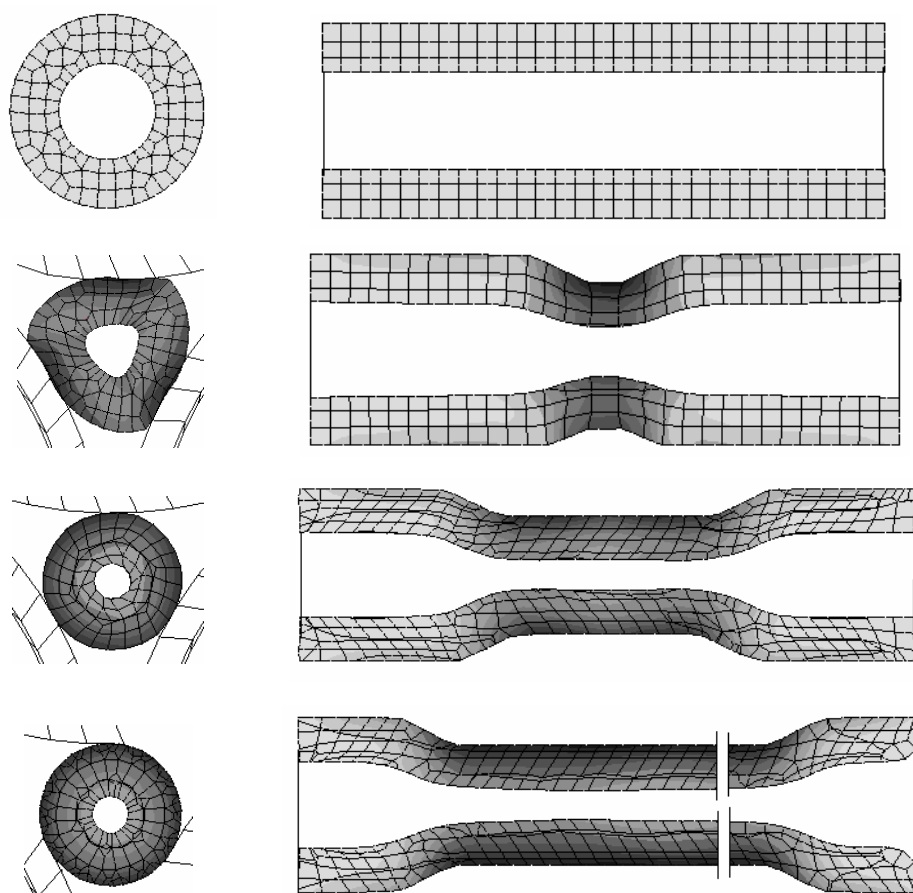
Wymiar wewnętrzny wsadu	Kąty	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$
$d_w = 18 \text{ mm}$	$\beta = 12^\circ$	0,3	0,3	0,4
	$\beta = 15^\circ$	0,3	0,2	0,4
	$\beta = 18^\circ$	0,4	0,5	t
$d_w = 15 \text{ mm}$	$\beta = 12^\circ$	0,2	0,1	0,4
	$\beta = 15^\circ$	0,3	0,2	0,5
	$\beta = 18^\circ$	0,3	0,5	t
$d_w = 12 \text{ mm}$	$\beta = 12^\circ$	0,3	0,1	0,3
	$\beta = 15^\circ$	0,3	0,1	0,4
	$\beta = 18^\circ$	0,4	0,2	t
$d_w = 9 \text{ mm}$	$\beta = 12^\circ$	0,2	0,2	0,4
	$\beta = 15^\circ$	0,2	0,2	0,3
	$\beta = 18^\circ$	0,3	0,4	0,4
$\Delta \leq 0,6$		t – triangularyzacja		

W tabeli 7.3 zestawiono również maksymalne wartości sił rozporowych, jakie odnotowano dla analizowanych przypadków WPK wyrobów drążonych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że najmniejsze siły kształtowania występują w tych procesach walcowania, w których odchyłki okrągłości są najmniejsze. Oczywiście zwiększenie grubości ścianki walcowanego wyrobu  $g_o$  oraz zwiększenie stopnia gniotu  $\delta$  jest przyczyną wyraźnego podwyższenia wartości sił kształtowania.

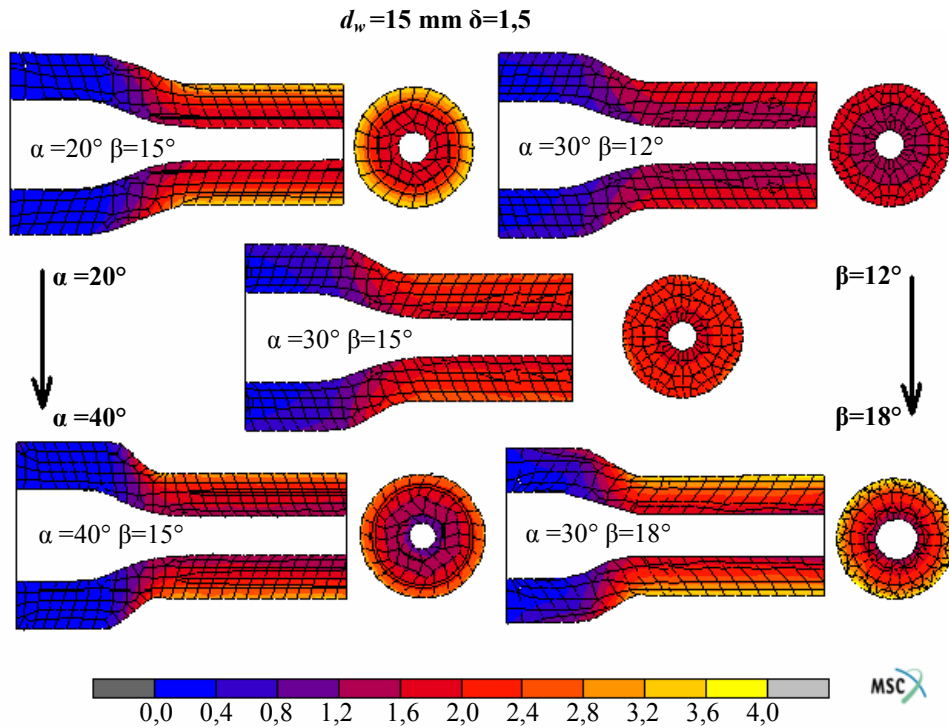
Jak przedstawiono na rys. 7.5, największe odkształcenia (w całym przekroju walcowanego wyrobu) uzyskuje się stosując kliny z najmniejszym kątem pochylenia ścian bocznych  $\alpha = 20^\circ$ . Równie wysokie wartości od-

kształcenia osiągnęte są w warstwach powierzchniowych odkuwki wówczas, gdy stosuje się kąty rozwarcia klina  $\beta = 18^\circ$ . Najbardziej równomierne odkształcenia w przewężonej części odkuwki osiągnęte są przy stosowaniu klinów z kątami  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 15^\circ$ .

Na rys. 7.6 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia w zależności od zastosowanego stopnia gniotu  $\delta$ . Z rysunku tego wynika, że zwiększanie stopnia gniotu  $\delta$  powoduje w wyrobie wzrost odkształceń, zwłaszcza w strefie stożkowego przejścia między średnicami walcowanego stopnia. Najbardziej równomierne odkształcenie przewężonej części odkuwki udało się uzyskać przy stopniu gniotu  $\delta = 1,5$ .



**Rys. 7.4.** Zmiany grubości ścianki wyrobu występujące w procesie walcowania trzema walcami dla zaawansowania procesu (od góry): 0, 20, 50, 100 % przy:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 18^\circ$ ,  $\delta = 1,5$

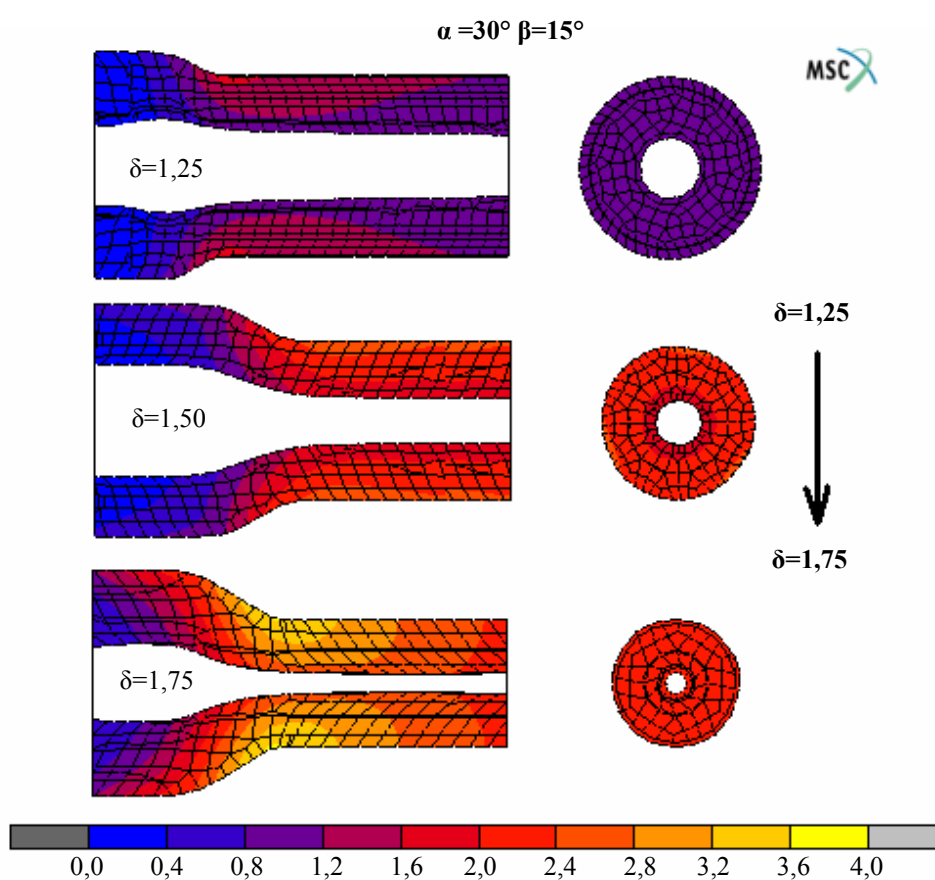


**Rys. 7.5.** Obliczone rozkłady intensywności odkształcenia w odkuwkach drążonych, otrzymanych w procesach WPK realizowanych trzema narzędziami, przy parametrach podanych na rysunku

Porównując uzyskane wyniki w zakresie stanu odkształcenia wyrobów walcowanych za pomocą dwóch klinów płaskich (rys. 6.13 i 6.14) oraz trzech narzędzi (rys. 7.5 i 5.6) można stwierdzić, że odkształcenia występujące w procesie realizowanym trzema narzędziami są prawie dwa razy mniejsze (przy tym samym stopniu gniotu). Natomiast jakościowo, rozkłady odkształceń są rozłożone podobnie, w charakterystyczny dla procesów WPK sposób pierścieniowy. Niższe wartości odkształcenia w procesie walcowania trzema narzędziami tłumaczy się mniejszą długością klinów, prowadzącą w efekcie do ograniczenia płynięcia materiału w kierunku stycznym.



Jak już wspomniano głównym ograniczeniem w praktycznym stosowaniu procesu WPK trzema wałkami jest niemożność stosowania wałków o dowolnej średnicy. Zatem w procesie tym występuje ograniczenie długości klina kształtującego, co przekłada się na stopień złożoności wyrobów możliwych do wytwarzania w oparciu o tę metodę walcowania. Ponadto definitywne potwierdzenie zalet stwierdzonych dla tej technologii kształtowania wymaga przeprowadzenia, weryfikujących obliczenia teoretyczne, badań doświadczalnych.



**Rys. 7.6.** Obliczone rozkłady intensywności odkształcenia w odkuwkach drążonych, otrzymanych w procesach WPK realizowanych trzema narzędziami, przy parametrach podanych na rysunku

**Tab. 7.3.** Obliczone wartości maksymalnych sił rozporowych [N] i wartości średnie grubości ścianki (w środkowym przekroju poprzecznym próbek) odnotowane w procesach WPK realizowanych trzema walcami przy  $\delta=1,5$

Średnica wew. wsadu (mm)	Kąty	$\alpha = 20^\circ$		$\alpha = 30^\circ$		$\alpha = 40^\circ$	
		Siła rozporowa [N]	Śr. grub. ścianki [%]	Siła rozporowa [N]	Śr. grub. ścianki [%]	Siła rozporowa [N]	Śr. grub. ścianki [%]
$d_w = 18$	$\beta = 12^\circ$	9700	95	10100	96	10450	91
	$\beta = 15^\circ$	10350	93	10950	92	11050	86
	$\beta = 18^\circ$	11100	93	13650	93	---	---
$d_w = 15$	$\beta = 12^\circ$	11150	94	11400	99	13200	91
	$\beta = 15^\circ$	13850	91	11950	95	13550	88
	$\beta = 18^\circ$	14200	87	14700	93	---	---
$d_w = 12$	$\beta = 12^\circ$	13300	84	11750	94	14450	83
	$\beta = 15^\circ$	15000	79	11850	88	14900	76
	$\beta = 18^\circ$	15450	73	13900	86	---	---
$d_w = 9$	$\beta = 12^\circ$	14150	83	14250	84	15300	80
	$\beta = 15^\circ$	15200	78	15800	82	16350	75
	$\beta = 18^\circ$	15950	72	16300	75	17100	72

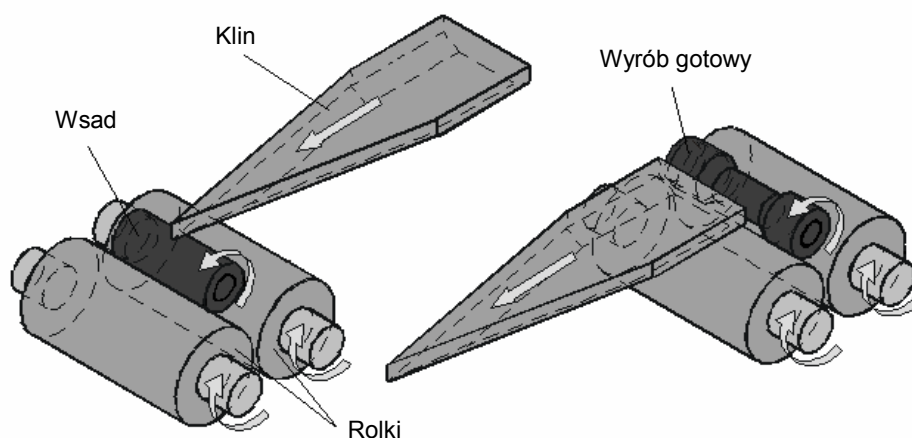
**Tab. 7.4.** Podsumowanie wyników badań numerycznych procesów WPK wyrobów drążonych realizowanych za pomocą trzech walców

Wymiar wewnętrzny wsadu	Kąty	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$			$\alpha = 40^\circ$
		$\delta=1,50$	$\delta=1,25$	$\delta=1,50$	$\delta=1,75$	$\delta=1,50$
$d_w = 18$ mm	$\beta = 12^\circ$	p	p			p
	$\beta = 15^\circ$	p	p	p	p	p
	$\beta = 18^\circ$	p	p			t
$d_w = 15$ mm	$\beta = 12^\circ$	p	p			p
	$\beta = 15^\circ$	p	p	p	p	p
	$\beta = 18^\circ$	p	p			t
$d_w = 12$ mm	$\beta = 12^\circ$	p	p			p
	$\beta = 15^\circ$	p	p	p	p	p
	$\beta = 18^\circ$	p	p			t
$d_w = 9$ mm	$\beta = 12^\circ$	p	p			p
	$\beta = 15^\circ$	p	p	p	p	p
	$\beta = 18^\circ$	p	p			p
p – wyrób prawidłowy		t – triangularyzacja				

## 7.2. Walcowanie klinowo-rolkowe

Wysokie koszty wykonawstwa trzech wałków klinowych oraz ograniczenia długości klinów wynikające z warunku (7.1) 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. 7.7). 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.

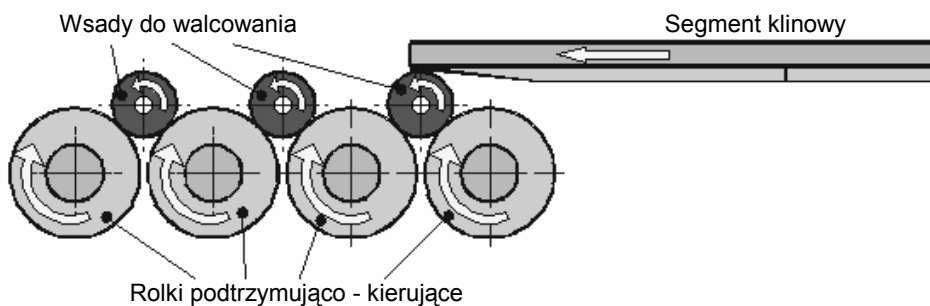


**Rys. 7.7.** Schemat ideowy ilustrujący metodę walcowania klinowo – rolkowego (WKR) [70]

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. 7.8) umożliwiającego jednoczesne kształtowanie kilku, a nawet więcej wyrobów.

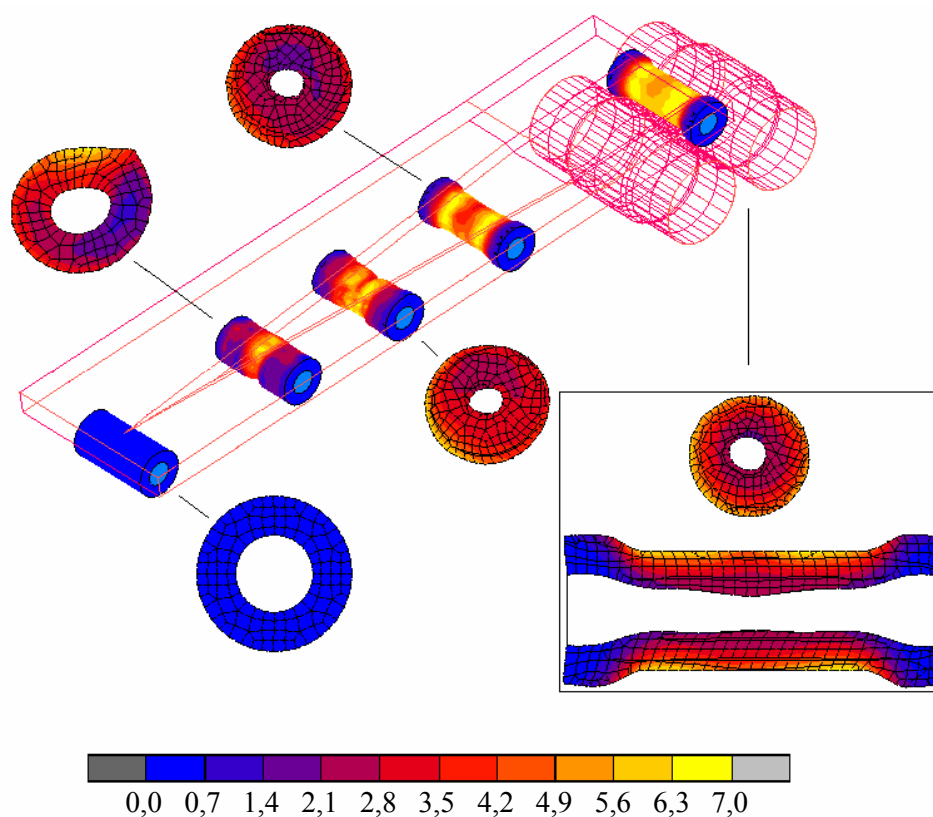
Stosując metodę WKR można kształtować osiowo-symetryczne wyroby posiadające powierzchnie walcowe, stożkowe i sferyczne [70]. Dla sprawdzenia, czy metodą WKR można również kształtować wyroby drążone, przeanalizowano numerycznie przypadek walcowania, realizowany klinem o następujących parametrach:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ . Przyjęta, niewielka wartość kąta rozwarcia klina była efektem zastosowania tylko jednego narzędzia kształtującego przewężenie. Analizowany przypadek WKR dotyczył kształtowania (z wsadu drążonego o  $d_w = 15$  mm) pojedynczego przewężenia określonego stopniem gniotu  $\delta = 1,3$ , którego szerokość odpowiadała wartości stosowanej we wcześniejszych analizach numerycznych (dla walcowania klinami płaskimi oraz trzema walcami). Użyty w obliczeniach model materiału oraz model tarcia był identyczny jak we wcześniej badanych przypadkach.



**Rys. 7.8.** Schemat walcowania klinowo – rolkowego kilku wyrobów [70]

Na rys. 7.9 pokazano progresję kształtu wyrobu drążonego, walcowanego przy użyciu jednego klina oraz dwóch rolek profilowych. Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdza się możliwość kształtowania odkuwek

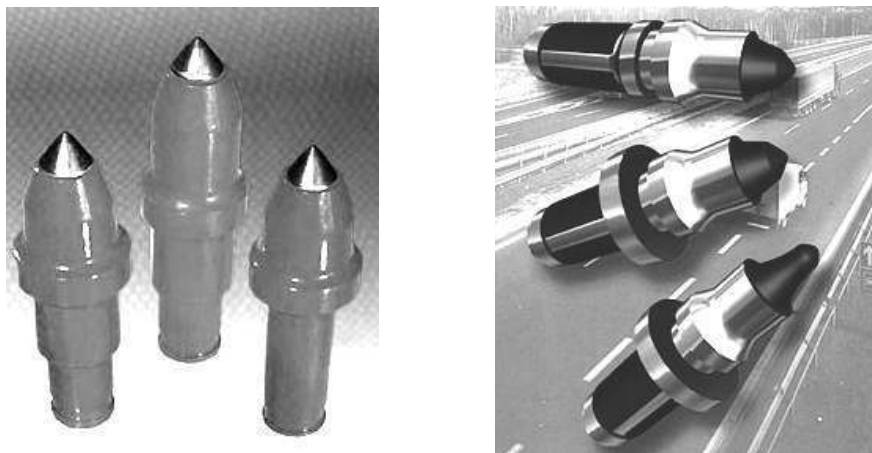
drążonych przy pomocy metody WKR. Wyroby walcowane charakteryzuje duża dokładność powierzchni zewnętrznej, przy większym zróżnicowaniu grubości ścianki w obszarze przewężenia. Należy zauważyć, że proces WKR nie jest jeszcze dostatecznie zbadany, a jego poznanie wymaga m.in. przeprowadzenia szeregu prac 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.



**Rys. 7.9.** Progresja kształtu i rozkład odkształceń w odkuwce drążonej, obliczone dla procesu WKR przy  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ ,  $\delta = 1,3$  i  $d_w = 15$  mm

## 8. BADANIA PROCESU WPK Z WSADU DRAŻONEGO, REALIZOWANE W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

W celu zweryfikowania wiedzy nabytej w trakcie badań nad procesem WPK wyrobów drażonych podjęto próbę zastosowania tej technologii do kształtowania korpusu noża obrotowego. Noże takie są wykorzystywane głównie w przemyśle wydobywczym do urabiania węgla, rud metali, soli itd. Mogą być również stosowane podczas remontowania nawierzchni dróg do frezowania asfaltu i betonu. Przykłady typowych noży obrotowych pokazano na rys. 8.1.



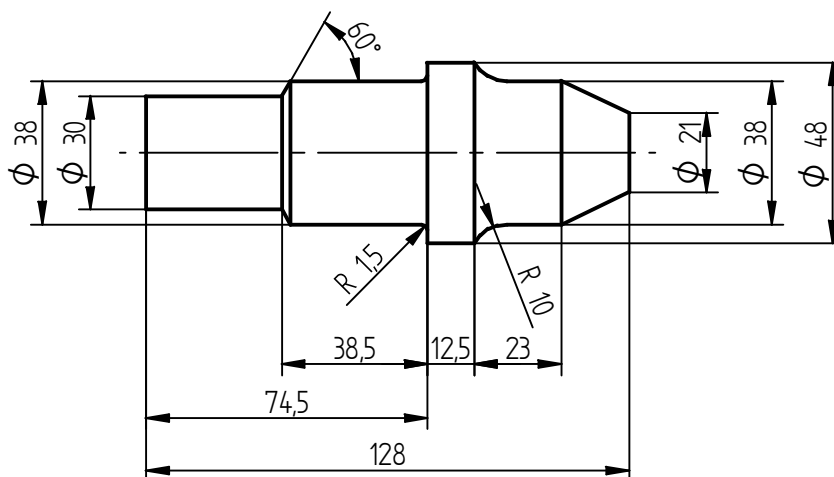
*Rys. 8.1. Przykłady noży obrotowych stosowanych w górnictwie i drogownictwie [106]*

Podstawowym elementem każdego noża jest korpus, który składa się z dwóch części: chwytowej oraz roboczej (tnącej). W części roboczej korpusu wykonuje się stożkowy otwór, w którym umieszcza się ostrze z węglika spiekanego. Połączenia między korpusem i ostrzem dokonuje się metodą

lutowania. Dotychczas korpusy noży obrotowych wykonywane były metodami obróbki skrawaniem, odlewania lub kucia matrycowego. Jednakże ze względu na kształt oraz duże serie wytwórcze części te mogą być z powodzeniem wykonywane metodą WPK. Główną zaletą noży kształtowanych tą technologią jest uzyskiwanie korzystnej, osiowo – symetrycznej makrostruktury z ciągłymi włóknami metalu, zagęszczonymi przy powierzchni i skierowanymi wzdłuż tworzących powierzchni bocznych. Takie rozmieszczenie włókien powoduje, że korpusy walcowane są bardziej trwałe od tych, które wykonuje się toczeniem, kuciem matrycowym bądź odlewaniem [82].

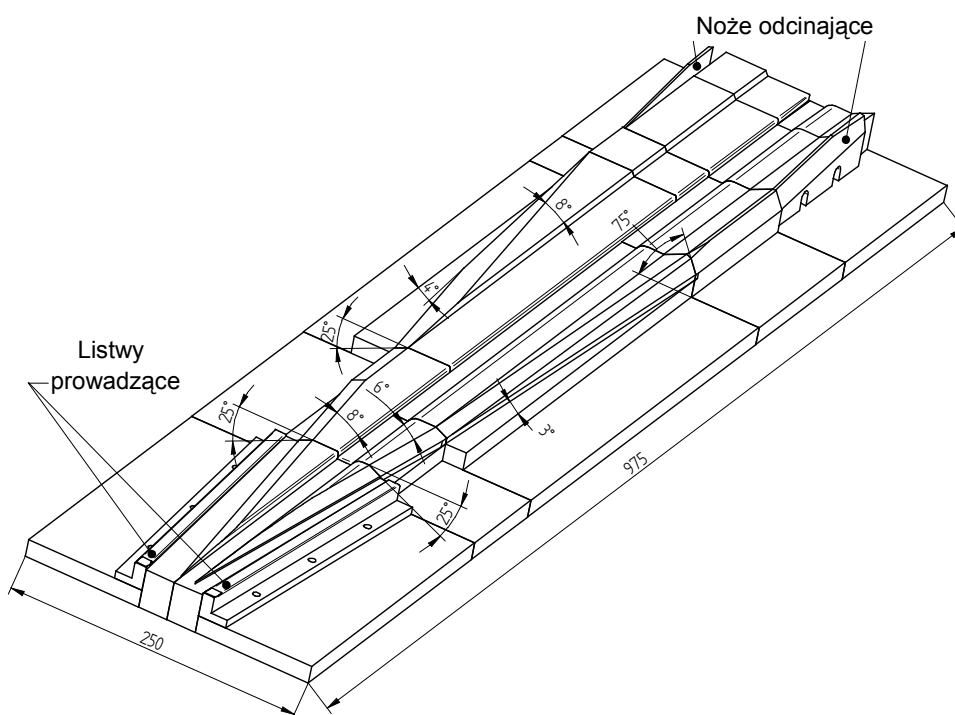
W KKMiTOP Politechniki Lubelskiej zaprojektowano klinowe segmenty narzędziowe zabezpieczające produkcję korpusu noża obrotowego, o parametrach jak na rys. 8.2. Przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne narzędzi ustalono w trakcie prac wdrożeniowych, szczegółowo opisanych w opracowaniu [65]. Główne parametry opracowanych klinów pokazano na rys. 8.3.

W narzędzia te uzbrojono walcarkę przemysłową, wykonaną we własnym zakresie przez współpracujący zakład produkcyjny, której część zasadniczą pokazano na rys. 8.4. Zastosowany agregat zapewnia kształtowanie w układzie walcowania klinami płaskimi, z których jeden (górny) przemieszcza się z prędkością 0,33 m/s. Należy również wspomnieć o tym, że gabaryty walcarki narzucają ograniczenie długości projektowanych klinów, która nie może być większa niż 1000 mm. Na podstawie wykonanych prób



**Rys. 8.2.** Korpus noża obrotowego nr 6000012, w wersji walcowanej

walcowania stwierdzono, że korpusy noży obrotowych kształtowanych walcowaniem poprzeczno – klinowym spełniają wszelkie stawiane im wymagania jakościowe, przy mniejszych kosztach wytwarzania. Dalszego zmniejszenia tych kosztów można oczekiwać w efekcie obniżenia materiałochłonności technologii wytwórczej np. przez zastosowanie wsadów drażonych.



**Rys. 8.3.** Schemat narzędzia zaprojektowanego do WPK noża obrotowego z wsadu pełnego

Dla sprawdzenia możliwości kształtowania korpusów noży z wsadów drażonych przeprowadzono próby przemysłowe, w których zastosowano to samo oprzyrządowanie (walcarka i kliny) jak we wdrożonym procesie walcowania z wsadu pełnego. Na potrzeby badań wykonano wsady drażone (tuleje) – rys. 8.5, których wymiary zewnętrzne  $\text{Ø}48 \times 100$  mm odpowiadały gabarytom wsadu pełnego. Natomiast średnice wewnętrzne ( $\text{Ø}28,8$ ;  $\text{Ø}24,0$ ;  $\text{Ø}19,2$ ;  $\text{Ø}14,4$ ) dobrano tak, by stosunek średnic  $D/d_w$  miał wartości identyczne jak w analizowanych wcześniej próbach walcowania tulei z ołowiu, o średnicy zewnętrznej  $\text{Ø}30$  mm. Wsady, wykonane ze stali w gatunku C45,



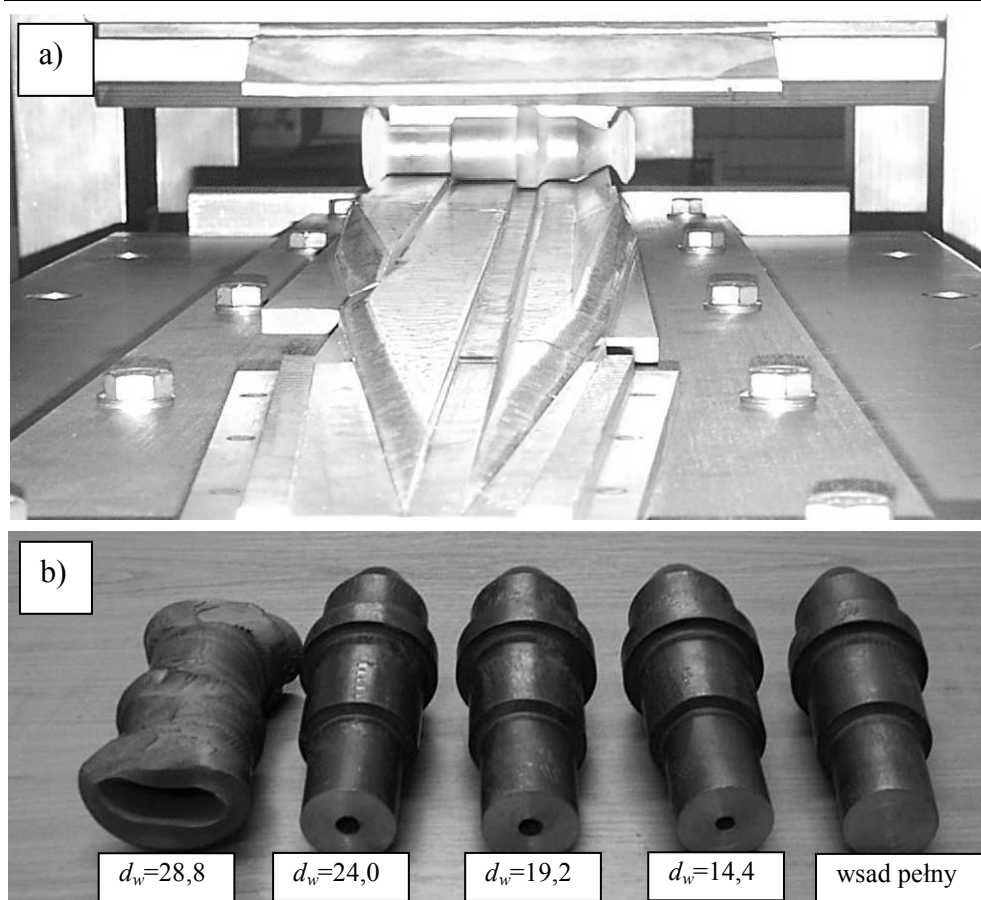
nagrzewano w piecu elektrycznym, oporowym do temperatury 1150°C. Następnie umieszczano je na ścieżkach prowadzących dolnego (nieruchomego) klina, skąd były zabierane przez przemieszczające się ruchem posuwistym narzędzie górne. W trakcie kształtowania, trwającego ok. 6 sekund, odkuwka przetaczana była po klinie dolnym – co jest widoczne na rys. 8.6a, przedstawiającym proces WPK w fazie kalibrowania.



*Rys. 8.4. Przemysłowa walcarka płaskoklinowa*



*Rys. 8.5. Wsady drążone stosowane w próbach przemysłowych WPK noża obrotowego*



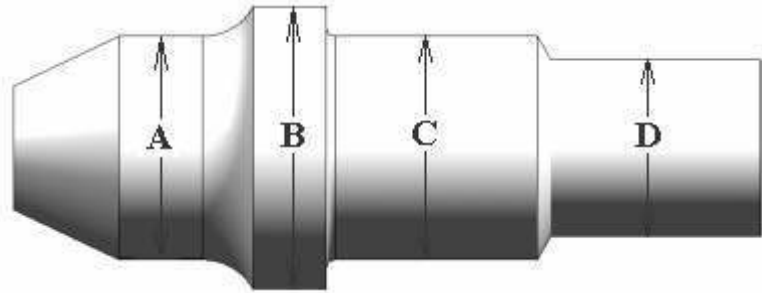
**Rys. 8.6.** Odkuwka korpusu noża obrotowego w trakcie kształtowania z wsadu drążonego (a) oraz przykłady korpusów odwalcowanych z tulei o średnicach wewnętrznych podanych na rysunku (b)

Na podstawie wykonanych prób przemysłowych stwierdzono, że tylko w przypadku wsadu o najcieńszej ścianie nie uzyskiwano wyrobu o zakładanym kształcie. Wówczas bowiem występował poślizg doprowadzający do zgniecenia odkuwki (rys. 8.6b). Natomiast w pozostałych przypadkach proces przebiegał w sposób stabilny. Dla określenia dokładności wykonania poszczególnych odkuwek w tabeli 8.1 zestawiono maksymalne odchyłki owalności wyznaczone dla kolejnych stopni korpusów walcowanych, w tym również korpusu z wsadu pełnego. Analiza wartości odchyłek przedstawionych w tab. 8.1 pokazuje, że tylko wymiary korpusu pełnego mieszczą się w tolerancjach wykonawczych. Natomiast dokładność wykonania korpusów drążonych jest niezadowalająca, szczególnie w części chwytowej odkuwki

oznaczonej symbolem „C”. Spostrzeżenie to po raz kolejny potwierdza fakt, że nie można stosować klinów zaprojektowanych do walcowania wyrobów pełnych w procesach, w których kształtuje się wałki drążone.

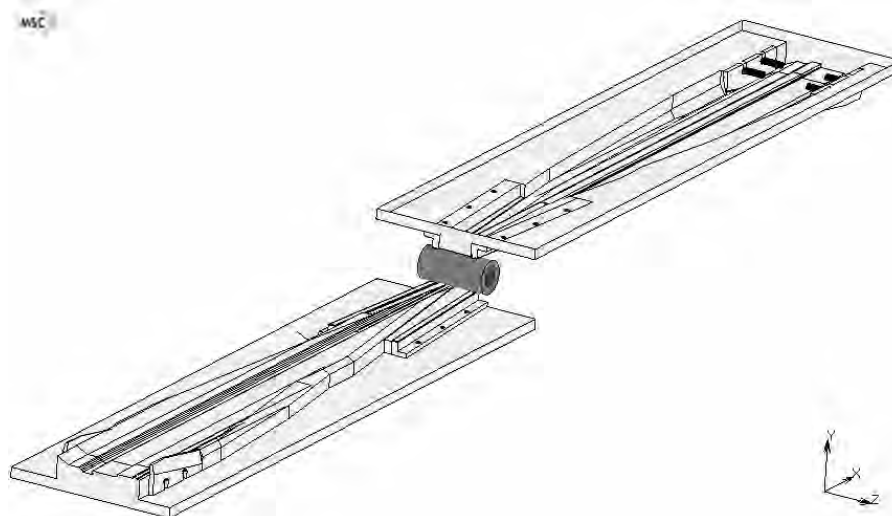
**Tab. 8.1.** Zmierzone maksymalne odchyłki wymiarowe odwalcowanych korpusów noża obrotowego

Rodzaj stosowanego wsadu	Odchyłki wymiarowe [mm] (wymiar nominalny z tolerancjami)			
	A ( $\varnothing 38^{+0,8}_{-0,4}$ )	B ( $\varnothing 48^{+0,9}_{-0,5}$ )	C ( $\varnothing 38^{+0,8}_{-0,4}$ )	D ( $\varnothing 30^{+0,8}_{-0,4}$ )
pełny	+0,3	+0,4	+0,2	+0,3
$d_w=24,0$	+0,5	+1,1	+1,5	+0,4
$d_w=19,2$	+0,9	+1,9	+1,9	+0,6
$d_w=14,4$	+0,8	+2,0	+1,9	+1,5



Postanowiono zatem skonstruować kliny narzędziowe (uwzględniając wiedzę nabytą w trakcie wykonywanych badań numerycznych i doświadczalnych) zapewniające walcowanie korpusów drążonych o wymaganej dokładności. Założono, że poprawność przyjętego rozwiązania będzie zweryfikowana w drodze termomechanicznej symulacji procesów kształtowania, bazującej na metodzie elementów skończonych. W pierwszej kolejności podjęto działania zmierzające do określenia dokładności modelowania numerycznego tak złożonych procesów WPK, jak kształtowanie w warunkach przemysłowych korpusu noża obrotowego. W tym celu zasymulowano te procesy walcowania, które wcześniej zrealizowano w praktyce.

Na potrzeby obliczeń opracowano modele geometryczne procesów WPK, z których jeden przedstawiono na rys. 8.7. Parametry klinów były zgodne z rys. 8.3. Podobnie jak w badaniach przemysłowych przyjęto, że klin górny przemieszcza się z prędkością 0,33 m/s, a klin dolny jest nieruchomy.

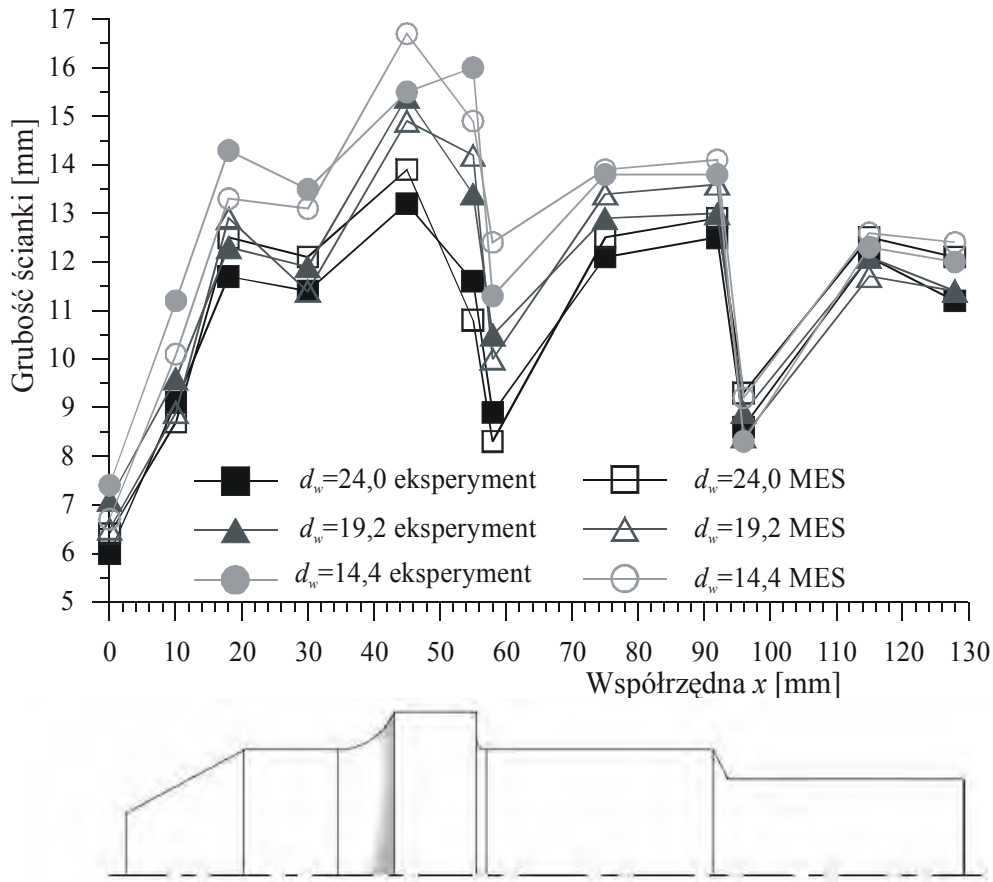


**Rys. 8.7.** Model geometryczny WPK korpusu drążonego za pomocą narzędzi klinowych zaprojektowanych do kształtowania wyrobów pełnych

Symulacje numeryczne wykonano stosując termomechaniczny schemat obliczeń MES, przyjęto, że wsad nagrzewany jest do temperatury  $1150^{\circ}\text{C}$ , zaś temperatura narzędzi w trakcie procesu jest stała i wynosi  $150^{\circ}\text{C}$ . Model materiałowy stali C45 przyjęto z biblioteki programu MSC.SuperForm 2004. Założono, że współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami wynosi  $10000\text{ W/m}^2\text{K}$ , a między materiałem a otoczeniem  $300\text{ W/m}^2\text{K}$ . W obliczeniach przyjęto model tarcia stałego uzależniony od prędkości poślizgu, zakładając równocześnie graniczną wartość czynnika tarcia  $m = 1,0$ .

Ze względu na fakt, że w trakcie prób przemysłowych nie dokonywano żadnych pomiarów, o dokładności obliczeń numerycznych wnioskowano porównując rozkłady grubości ścianek noży.

Na rys. 8.8 przedstawiono przekroje wzdłużne (osiowe) korpusów odwalcowanych w stabilnych procesach WPK, zestawione z przekrojami ścianek obliczonymi MES. Dodatkowo na przekrojach wyznaczonych w sposób teoretyczny zamieszczono mapy pokazujące jak rozkłada się intensywność odkształcenia w korpusie noża obrotowego. Z rozkładów tych wynika, że najbardziej intensywne płynięcie materiału występuje w części chwytowej noży. Stwierdza się również, że obliczone rozkłady grubości ścianki dobrze odpowiadają rzeczywistym w sensie jakościowym.



**Rys. 8.9.** Zestawienie grubości ścianek korpusu noża obrotowego wyznaczonych w charakterystycznych punktach przekroju wzdłużnego

Dla porównania ilościowego na rys. 8.9 zestawiono wartości liczbowe grubości ścianek (obliczone MES i zmierzone) wyznaczone w charakterystycznych punktach przekroju wzdłużnego. Analiza danych zamieszczonych na tym rysunku wykazuje, że najcieńsze ścianki występują w części roboczej korpusu, natomiast najgrubsze w okolicy kołnierza, gdzie obserwuje się nawet zwiększenie początkowej grubości ścianki. Ponadto zaobserwowano, że raptowne zmiany grubości ścianki występują w tych miejscach, w których zmieniają się średnice zewnętrzne korpusu.

Na podstawie danych z rys. 8.9 sporządzono dodatkowy wykres (pokazany na rys. 8.10), który ilustruje dokładność uzyskaną w trakcie obliczeń MES. Na wykresie tym pokazano względne różnice  $\Delta_g$  między

wartościami grubości ścianek (obliczonymi i zmierzonymi), wyznaczonymi w charakterystycznych punktach przekroju wzdłużnego korpusu. Różnice te obliczono korzystając z następującej zależności

$$\Delta_g = \frac{|g_t - g_e|}{g_e} 100\%, \quad (8.1)$$

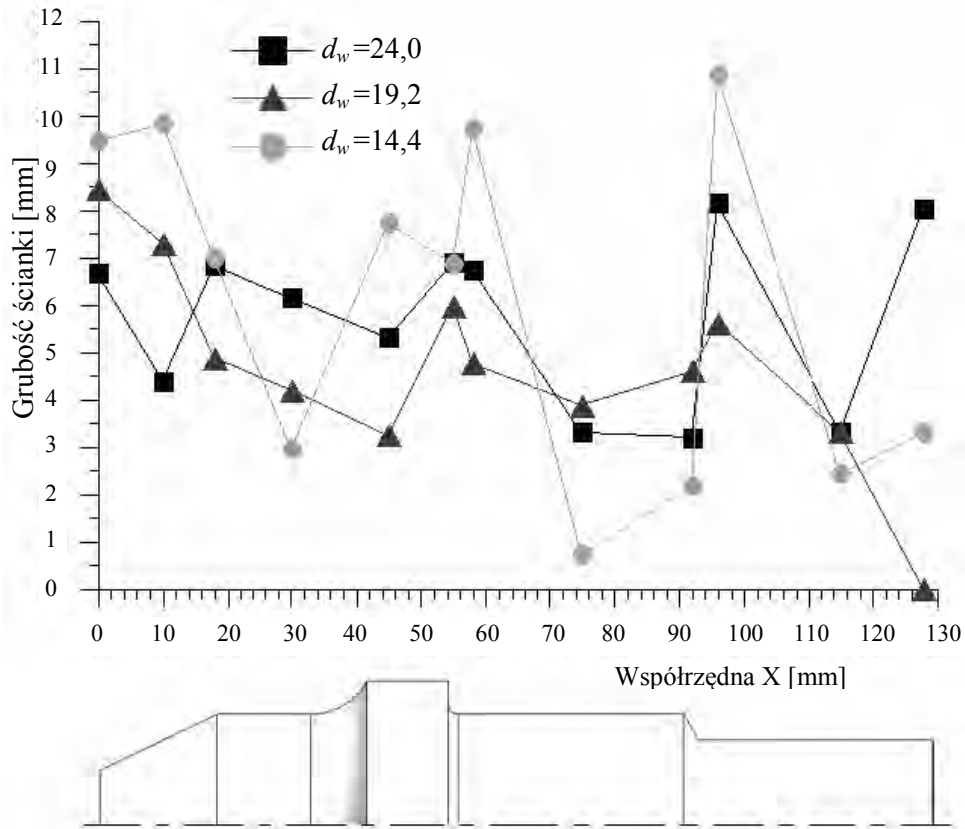
gdzie:  $g_t$  – grubość ścianki obliczona MES,  $g_e$  – grubość ścianki zmierzona.

Analizując dane zamieszczone na rys. 8.10 stwierdza się, że stosując MES można precyzyjnie prognozować dokładność wykonania odkuwek drażonych kształtowanych metodą WPK. Świadczą o tym wartości średnie parametru  $\Delta_g$  wyznaczone dla poszczególnych korpusów, które wynoszą odpowiednio: 5,74% dla wsadu z  $d_w = 24,0$  mm, 4,68% dla wsadu z  $d_w = 19,2$  mm oraz 6,09% dla wsadu z  $d_w = 14,4$  mm.

Niezadowolające wyniki prób doświadczalnych WPK korpusów drażonych w zakresie uzyskiwanych dokładności wymiarowych (tablica 8.1) wskazały na konieczność wykonania nowego projektu narzędzi klinowych przeznaczonych specjalnie do kształtowania korpusów drażonych. W trakcie prac projektowych bazowano na rezultatach prac badawczych poświęconych procesowi WPK wyrobów drażonych, przytoczonych w rozdziale 6 niniejszego opracowania.

Przyjęto zatem, że kąt kształtujący  $\alpha$  (pochylenia bocznej ściany klina) jest jednakowy dla całego narzędzia i wynosi  $30^\circ$ . Natomiast ze względu na różnice długości części roboczej i chwytowej korpusu do ich kształtowania przyjęto kliny z różnymi kątami rozwarcia  $\beta$  ( $6^\circ$  dla części roboczej,  $8^\circ$  dla chwytu). Takie rozwiązanie zapewniło, że długość strefy kształtowania dla obu klinów jest niemal jednakowa, co jest istotne ze względu na stabilność walcowania. Ponadto powoduje ono wydłużenie strefy kalibrowania do długości 273,6 mm, która gwarantuje kształtowanej odkuwce wykonanie aż dwóch obrotów podczas kalibrowania. Zmodyfikowane kliny pokazano na rys. 8.11.

Uwzględniając zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne narzędzi opracowano modele numeryczne procesu WPK korpusów drażonych. Parametry procesu przyjęte w obliczeniach były identyczne z tymi, jakie zakła-



**Rys. 8.10.** Względne różnice między grubością ścianki korpusu noża obrotowego obliczoną MES i zmierzoną

dano podczas symulacji termomechanicznej procesu walcowania narzędziami z rys. 8.3. Obliczeniami objęto trzy przypadki kształtowania, w których stosowano wsady o średnicy wewnętrznej równej 24, 19,2 oraz 14,4 mm.

Na podstawie obliczeń stwierdzono, że analizowane przypadki WPK realizowane są w sposób stabilny. Na rys. 8.12 przedstawiono jak w trakcie procesu WPK zmienia się kształt zewnętrzny odkuwki drążonej, walcowanej z tulei o  $d_w = 24,0$  mm (w obliczeniach pominięto bardzo skomplikowany numerycznie proces odcinania odpadów końcowych). Z rysunku tego wynika, że kliny wcinają się równocześnie w materiał po obu stronach kołnierza, redukując średnicę odkuwki do wymaganej wartości  $\text{Ø}38$  mm. Po-

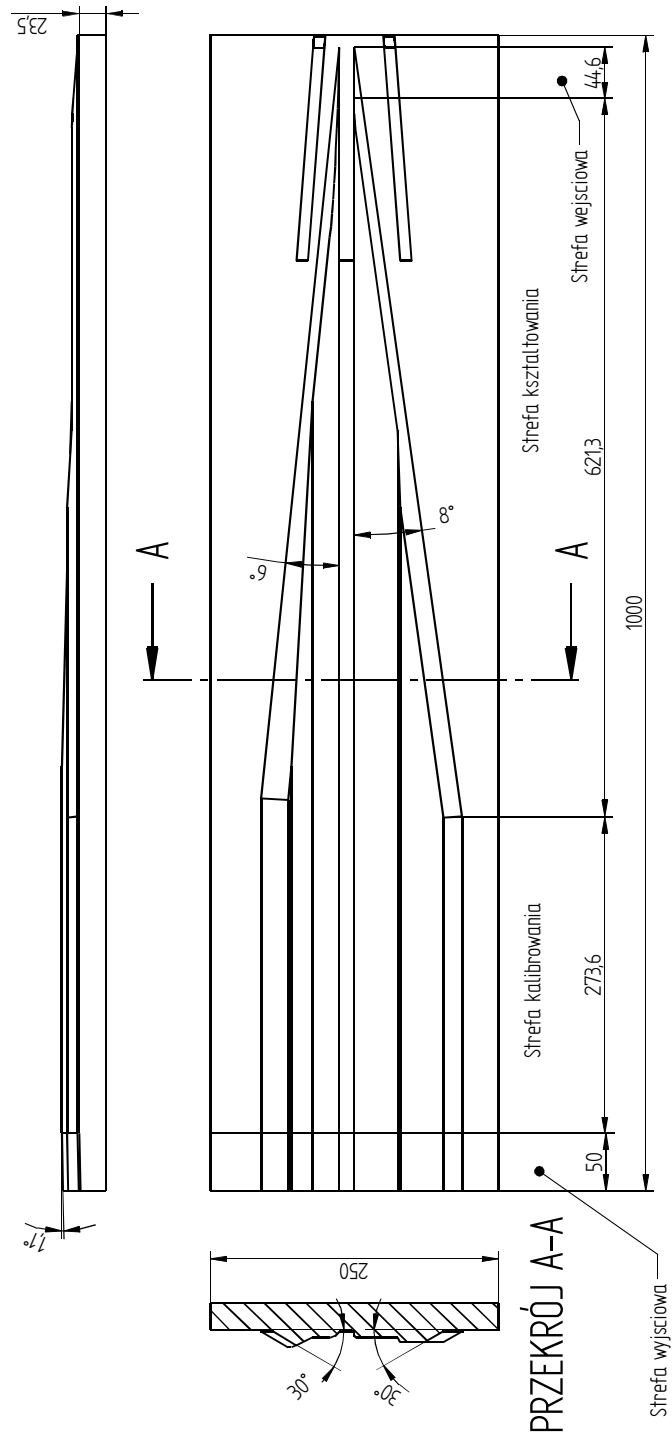
nadto, w początkowej fazie procesu, położenie odkuwki stabilizowane jest przez ścieżki prowadzące. Następnie ma miejsce rozwinięcie redukcji przekroju, w strefie kształtowania, na wymaganych długościach części chwytowej i roboczej korpusu. Przy czym nie zauważa się niepożądanych przemieszczeń odkuwki, w kierunku osiowym, powodowanych przez różnice w wartościach kątów  $\beta$  przyjętych dla poszczególnych klinów. W trakcie wydłużonego kalibrowania następuje usunięcie owalizacji przekroju poprzecznego, która jest największa w okolicy przejścia chwytu ze średnicy  $\text{Ø}38$  do  $\text{Ø}30$  (rys. 8.2).

W efekcie wprowadzonych zmian konstrukcyjnych klina uzyskano znaczną poprawę dokładności wykonania odkuwki korpusu drażonego. Świadczy o tym zestawienie pokazane na rys. 8.13, na którym przedstawiono przekroje poprzeczne poszczególnych stopni korpusów obliczone dla procesów WPK narzędziami typowymi (rys. 8.3) oraz zmodyfikowanymi (rys. 8.11). Przedstawione zestawienie dotyczy odkuwki walcowanej z wsadu o średnicy wewnętrznej  $d_w = 24,0$  mm, najbardziej interesującego dla producenta, ze względu na możliwe do uzyskania oszczędności materiałowe.

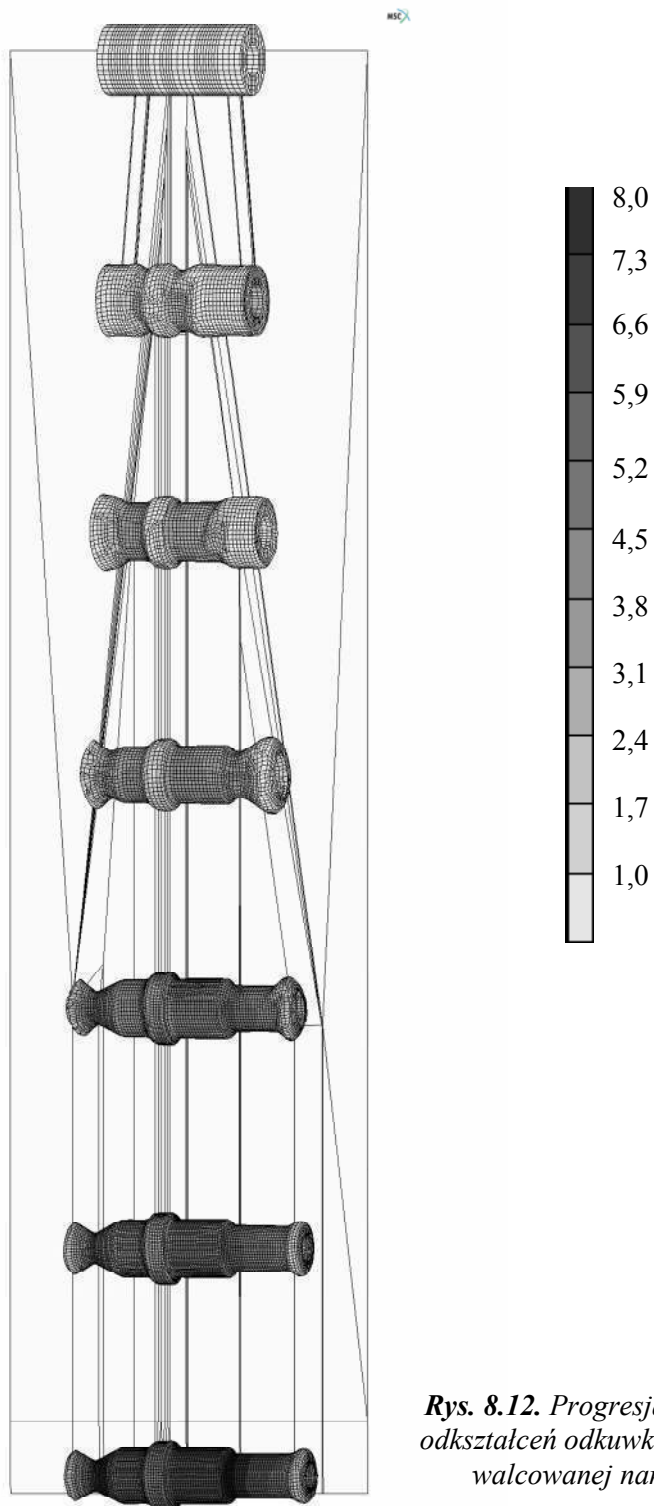
W efekcie wprowadzonych zmian konstrukcyjnych klina uzyskano znaczną poprawę dokładności wykonania odkuwki korpusu drażonego. Świadczy o tym zestawienie pokazane na rys. 8.13, na którym przedstawiono przekroje poprzeczne poszczególnych stopni korpusów obliczone dla procesów WPK narzędziami typowymi (rys. 8.3) oraz zmodyfikowanymi (rys. 8.11). Przedstawione zestawienie dotyczy odkuwki walcowanej z wsadu o średnicy wewnętrznej  $d_w = 24,0$  mm, najbardziej interesującego dla producenta, ze względu na możliwe do uzyskania oszczędności materiałowe.

Analiza danych zamieszczonych na rys. 8.13 wykazuje, że uwzględniając specyfikę WPK odkuwek drażonych można tak zaprojektować narzędzia klinowe, by dokładność wykonania wyrobów nie odbiegała od tej jaką uzyskuje się podczas walcowania odkuwek z wsadu pełnego.





**Rys. 8.11.** Rysunek zmodyfikowanego narzędzia klinowego przeznaczony do WPK korpusu drążonego



**Rys. 8.12.** Progresja kształtu oraz rozkłady odkształceń odkuwki drążonej ( $d_w = 24$  mm) walcowanej narzędziami z rys.8.11

W tabelicy 8.2 zestawiono obliczone MES maksymalne wartości odchyłek wymiarowych powstających w trakcie walcowania korpusów noży obrotowych z wsadów o różnych średnicach wewnętrznych. Z danych zamieszczonych w tabelicy 8.2 wynika, że zwiększeniu grubości ścianki wsadu towarzyszy obniżenie dokładności wykonania odkuwki. Takie spostrzeżenie potwierdza również zestawienie dokładności uzyskanych w próbach przemysłowych, przedstawionych w tabelicy 8.1. Jednakże, jak już wspomniano, ze względów ekonomicznych bardziej interesujące jest walcowanie z wsadu o ściance cieńszej. Dodatkowo wykonawstwo tulei jest tym łatwiejsze, im mniejsza jest grubość ścianki. Zatem ze względów użytkowych w dalszych próbach przemysłowych należy ograniczyć się do walcowania odkuwek korpusów z wsadu drążonego o średnicy wewnętrznej  $\varnothing 24$  mm, dla którego odnotowano najlepsze rezultaty.

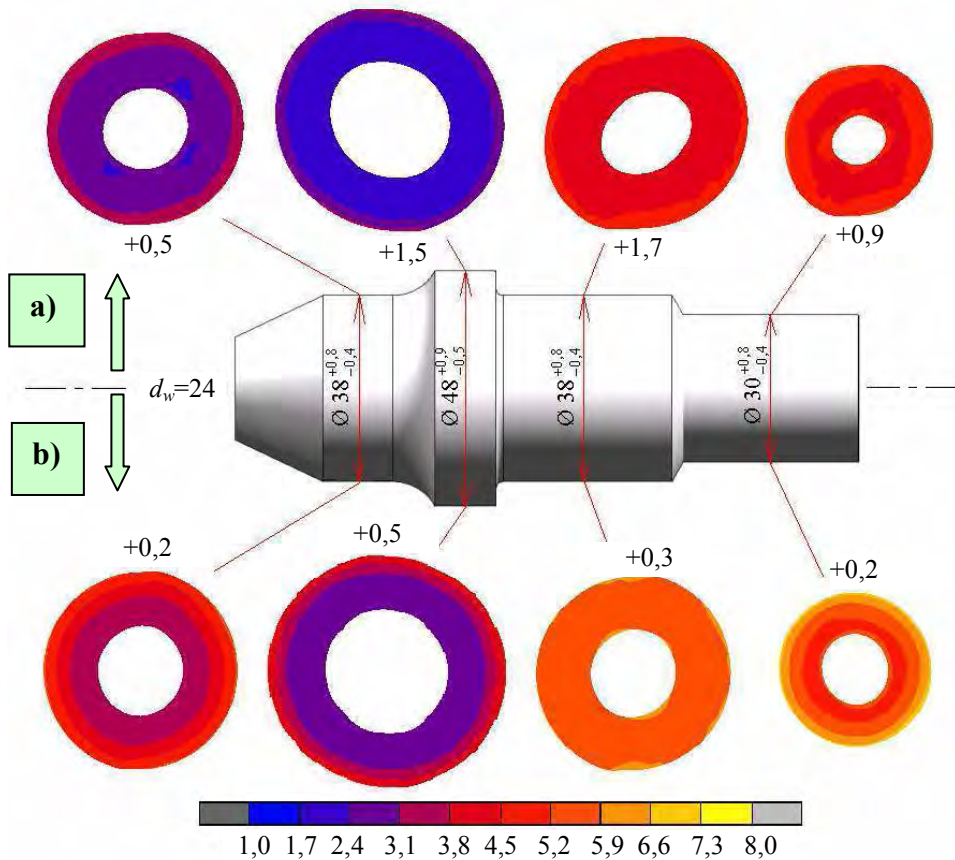
**Tab. 8.2.** Obliczone MES maksymalne odchyłki wymiarowe korpusów noża obrotowego kształtowanego narzędziami przeznaczonymi do WPK wyrobów drążonych

Rodzaj stosowanego wsadu	Odchyłki wymiarowe [mm] (wymiar nominalny z tolerancjami)			
	A ( $\varnothing 38^{+0,8}_{-0,4}$ )	B ( $\varnothing 48^{+0,9}_{-0,5}$ )	C ( $\varnothing 38^{+0,8}_{-0,4}$ )	D ( $\varnothing 30^{+0,8}_{-0,4}$ )
$d_w=24,0$	+0,2	+0,5	+0,3	+0,2
$d_w=19,2$	+0,6	+1,1	+0,6	+0,4
$d_w=14,4$	+0,6	+0,9	+0,7	+0,5

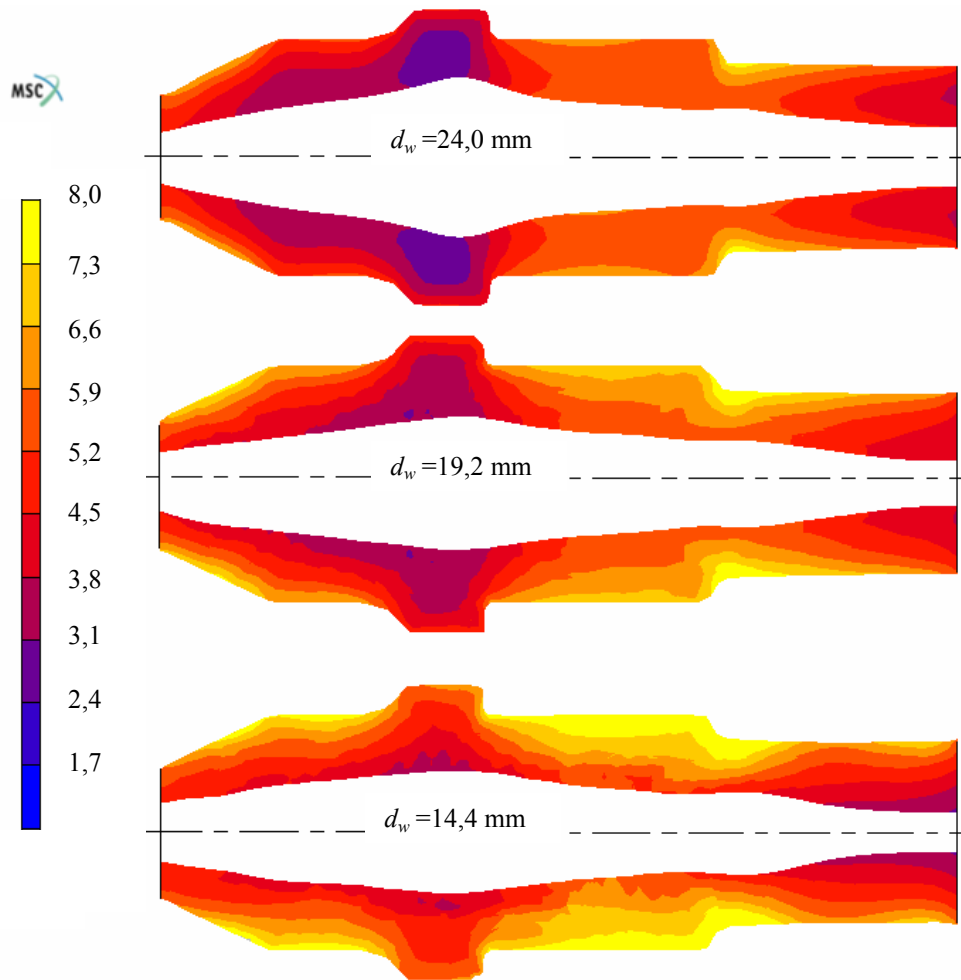
  

Na rys. 8.14 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia wyznaczone w przekrojach wzdłużnych (osiowych) korpusów walcowanych klinami zmodyfikowanymi, o parametrach podanych na rys. 8.11. Z rysunku tego wynika, że zwiększenie grubości ścianki wsadu tylko w niewielkim stopniu przekłada się na zwiększenie grubości ścianki korpusu. W zasadzie

znaczący wzrost grubości odnotowuje się tylko przy końcu chwytu odkuwki. Natomiast z rys. 8.14 wynika, że zmniejszenie  $d_w$  powoduje znaczący przyrost odkształceń w wyrobie walcowanym. Tłumaczy się go zwiększeniem owalizacji przekroju poprzecznego (następującym w efekcie zastosowania wsadu z większym  $g_0$ ), której usuwanie powoduje zwiększenie płynięcia materiału w kierunku stycznym. Odnośnie lokalizacji maksymalnych odkształceń stwierdza się, że we wszystkich przypadkach WPK jest ona jednakowa i związana jest z miejscem, w którym następuje zmiana średnicy chwytu z  $\text{Ø}38$  mm na  $\text{Ø}30$  mm. Świadczy to o tym, że w tej części odkuwki występują największe trudności z usunięciem owalizacji przekroju poprzecznego.



**Rys. 8.13.** Kształty przekroju poprzecznego (z maksymalnymi odchyłkami owalizacji) wraz z rozkładami odkształceń, obliczone dla procesów WPK realizowanych narzędziami do kształtowania: a) wyrobów pełnych b) wyrobów drążonych



**Rys. 8.14.** Rozkłady intensywności odkształcenia w przekrojach wzdłużnych korpusów kształtowanych zmodyfikowanymi narzędziami klinowymi

## 9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono nowe aspekty teorii i technologii walcowania poprzeczno – klinowego (WPK) odkuwek drażonych. Omówiono obszary zastosowań wyrobów tego typu oraz scharakteryzowano dotychczas stosowane metody ich wytwarzania (ciągnięcie, wyciskanie, kucie na kowarkach, itd.). Przybliżono również podstawy procesu WPK, w szczególności dotyczące stabilności walcowania i doboru podstawowych parametrów procesu.

W analizie teoretycznej WPK z wsadów drażonych wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Modelowanie tego procesu walcowania przy zastosowaniu MES, w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia, pozwala na wyznaczenie rozkładów naprężeń, odkształceń, prędkości odkształcenia oraz umożliwia analizowanie zjawisk cieplnych zachodzących w kształtowanym wyrobie. Stosowanie MES do symulacji WPK odkuwek drażonych jest utrudnione ze względu na długi czas obliczeń oraz trudności związane z przebudową siatki. Szczególnie trudne jest prawidłowe zamodelowanie wewnętrznej powierzchni swobodnej odkuwki, której opis wymaga ciągłego zwiększania ilości elementów. Może to doprowadzić do sytuacji, gdy kontynuacja obliczeń nie będzie możliwa ze względu na wielkość analizowanego zadania.

Weryfikację doświadczalną zastosowanej metody walcowania wykonano w warunkach laboratorium KKMiT TOP stosując płaskoklinową walcarkę LUW-2. W badaniach laboratoryjnych wykorzystano kilka zestawów narzędzi klinowych, umożliwiających realizację procesów WPK w zakresie kątów kształtujących  $\alpha = 20^\circ \div 40^\circ$  oraz rozwarcia klina  $\beta = 6^\circ \div 10^\circ$ . W trakcie badań dokonywano pomiarów parametrów siłowo – kinematycznych procesu. Rezultaty badań doświadczalnych skonfrontowane z wynikami obliczeń potwierdzają zasadność stosowania przyjętej metody modelowania

w analizie procesu WPK z wsadów drążonych oraz zastosowań utylitarnych, takich jak projektowanie geometrii narzędzi klinowych.

W efekcie badań ustalono, że stabilność procesu WPK może być zakłócona wskutek niekontrolowanego poślizgu (doprowadzającego do zgniecenia) oraz przewężenia kształtowanego stopnia odkuwki. Ponadto w przypadku stosowania dużych kątów kształtujących ( $\alpha = 40^\circ$ ) mogą wystąpić niepożądane deformacje wewnętrznej, swobodnej powierzchni odkuwek. Stwierdzono również, że w przypadku stosowania w procesie WPK wyrobów drążonych dwóch klinów kształtujących występuje większa owalizacja przekroju poprzecznego, niż ma to miejsce w procesach walcowania z wsadu pełnego. Zmniejszeniu tej owalizacji sprzyja wydłużenie strefy kalibrowania klinów.

W trakcie badań poddano również analizie charakter zmian grubości ścianki wsadu następujący w efekcie walcowania. Stwierdzono, że w zależności od użytych parametrów procesu (grubość ścianek wsadu, kąty klinów, zastosowany stopień gniotu) ścianki mogą ulegać zarówno pocienieniu jak i pogrubieniu. Przy czym rozkład grubości ścianki w obszarze ukształtowanego przewężenia charakteryzuje się dużą zmiennością. W celu uzyskania odkuwek ze ścianką o zakładanej grubości należy w procesach walcowania klinami płaskimi stosować wewnętrzne trzpienie swobodne. Stwierdzono, że stosowanie trzpieni nie zwiększa stabilności przebiegu procesu WPK.

Analiza wartości sił zmierzonych i obliczonych dla procesów WPK z wsadów drążonych wykazała, że zwiększenie grubości ścianki wsadu powoduje wzrost sił kształtowania. Podobny efekt przynosi zwiększenie kąta kształtującego  $\alpha$ . Zauważono również, że w przypadku wystąpienia zakłócenia stabilności walcowania zmienia się charakter rozkładu siły kształtowania. Spostrzeżenie to może być wykorzystane przy automatyzacji procesu WPK do odrzucania odkuwek wybrakowanych.

Na podstawie wykonanych obliczeń numerycznych stwierdzono, że zastosowanie do WPK wyrobów drążonych metody trójwalcowej jest w pełni uzasadnione. Ten schemat walcowania charakteryzuje bowiem lepsza stabilność (w porównaniu do metody dwunarzędziowej) oraz dokładność wymiarowa wyrobu odwalcowanego. Nie ma tutaj problemów z uzyskaniem zakładanego, kołowego przekroju poprzecznego, a wahania grubości ścianki w obszarze kształtowanego przewężenia są nieznaczne.

W pracy poddano również analizie proces WPK korpusu noża obrotowego. W ramach tej analizy wykonano badania doświadczalne w warunkach przemysłowych oraz symulacje termomechaniczne, bazujące na MES. Stwierdzono, że stosując segmenty narzędziowe opracowane dla walcowania odkuwki korpusu z wsadu pełnego nie można walcować wyrobów z wsadów drążonych. Ograniczeniem jest zbyt duża owalizacja przekroju poprzecznego, występująca w części chwytowej korpusu. Wprowadzenie zmian w konstrukcji klinów (wynikających z badań wykonanych ramach niniejszej pracy) powoduje, że walcowane korpusy drążone spełniają stawiane im wymagania wymiarowe.

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

1. Metodą walcowania poprzeczno – klinowego (WPK) można kształtować osiowo – symetryczne odkuwki drążone, z dokładnością porównywalną do uzyskiwanej w procesach WPK z wsadu pełnego.
2. Stabilność procesu WPK odkuwek drążonych może być zakłócona przez niekontrolowany poślizg (zgniecenie), przewężenie (zerwanie) walcowanego stopnia oraz zdeformowanie wewnętrznej powierzchni swobodnej. Na podstawie przeprowadzonych badań, których rezultaty podano w tab. 6.3 i 7.3, zaleca się w procesach WPK odkuwek drążonych stosować kliny z kątami kształtującymi  $\alpha = 30^\circ$ .
3. W metodzie WPK klinami płaskimi odkuwek drążonych występuje większa owalizacja przekroju poprzecznego, w porównaniu do procesów walcowania z wsadu pełnego. Dla usuwania owalizacji zaleca się wydłużenie strefy kalibrowania do wartości zapewniającej wykonanie przez odkuwkę  $3 \div 3,5$  obrotu w fazie kalibrowania.
4. Zastosowanie trzpieni wewnętrznych umożliwia kształtowanie metodą WPK odkuwek drążonych o zakładanej grubości ścianek. Ze względu na stabilność procesu również dobre rezultaty uzyskuje się przy tych samych parametrach walcowania w metodzie beztrzpieniowej.
5. Przeprowadzone obliczenia pozwalają ocenić, że zastosowanie metody trójwalcowej w procesach WPK jest w pełni uzasadnione. Metodę tę charakteryzuje lepsza stabilność oraz dokładność wymiarowa



odkuwki drążonej (w porównaniu do uzyskiwanej w procesach dwunarzędziowych).

6. Przy projektowaniu narzędzi do WPK wyrobów drążonych nie zaleca się stosowania reguł projektowych opracowanych dla procesów WPK z wsadu pełnego. Należy w tym przypadku wykorzystywać warunki (6.1) oraz (7.2) podane w rozdziałach 6 i 7 tej pracy.
7. Modelowanie procesu WPK, oparte o MES w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia oraz przy pełnym uwzględnieniu zjawisk termicznych, umożliwi weryfikowanie parametrów technologicznych i konstrukcyjnych przyjmowanych podczas projektowania utility technologicznych WPK wyrobów drążonych.

Otrzymane rezultaty badań ocenia się jako bardzo wartościowe. Otwierają one znacznie możliwości poszerzenia zastosowania badanej technologii WPK i stanowią ugruntowaną pozycję wyjściową do rozwinięcia tych prac na nowe obszary zastosowań technologicznych.

## 10. LITERATURA

- [1] Amborn P., Frielingsdorf H., Ghosh S. K., Greulich K.: Modern side – shafts for passenger cars: manufacturing processes I, *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] Andreev G. V., Guzjavičius L. V, Makušok E. M., Ščukin V. Ja. Vybór geometričeskich parametrov klinovogo instrumenta. W: *Abrazivnaja obrabotka i obrabotka metallov rezaniem i davlenem*. Minsk: Nauka i Technika 1975, s. 73-76
- [4] Balin A. F. Prokatka klinami. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1962 nr 6, s. 12-16
- [5] Bartnicki J., Pater Z.: Analiza procesu wyciskania współbieżnego wałków drażonych, *TEKA Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa*, t. I, Lublin 2003, s. 113-117
- [6] 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
- [7] Bartnicki J.: *Badania teoretyczno – doświadczalne procesu walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów drażonych*, Praca doktorska (niepublikowana), Politechnika Lubelska 2005
- [8] 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

- [9] Bartnicki J., Pater Z.: Walcowanie poprzeczno – klinowe wyrobów drążonych. W: „*Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali*” red. W. Weroński, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s.67 - 86
- [10] Bartnicki J.: Metod isledowanija wozniknowenija trešcin w metalach ot rastjaženija, *Nacionalna Metalurhična Akademija Ukrainy, Problemy Metalurgiji, Naukowyje Wisti*, t. 5, Dnepropetrovsk 2002, s. 360-364
- [11] Bartnicki J.: Owalizacja wałków drążonych w procesach walcowania poprzeczno – klinowego, *Eksploatacja i Niezawodność* nr 2, (22) 2004, s. 5 - 8
- [12] Belmont K. Commercial wedge rolling in the United States. W: *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Rotary Metalworking Processes* October 6<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> 1982, Stratford upon Avon UK, s. 385-397
- [13] Celikov A. I. *Poperečno – klinowaja prokatka v mašinostroeni*, Wyd.: Mašinostroenie, Moskwa, 1982
- [14] Celikov A. I.: Elementy teorii poperečnoj prokatki i cholodnaja prokatka na trechwalkowych stanach, *Vestnik Mašinostroenija* 1961 nr 7, s. 49-54
- [15] Danno A., Tanaka T.: Characteristics of billet deformation in 3-roll wedge rolling of axisymmetric stepped shafts, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Rotary Metalworking Processes* 8 -10 September 1984, Kyoto Japan 1984, s. 321-332
- [16] 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
- [17] Developments in rotary metalworking. *Machinery and Production Engineering* 2 February 1983, s. 34-35
- [18] Dohmann F., Hartl Ch.: Tube hydroforming – research and practical application, *Journal of Material Processing Technology* nr 71, 1997, s. 174 –186

- [19] 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
- [20] Dong Y., Tagavi K., Lovell M., Deng Z.: Analysis of stress in cross – wedge rolling with application to failure, *International Journal of Mechanical Sciences* 42 (7) 2000, s. 1233 – 1253
- [21] Dorožej V. I., Margolin B. M., Seljukov V. N.: Izgotovljenje zagotovok šarovyvh pal'cev rulevych tjag metodom poperečno – klinovoj prokatki, *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1975 nr 1, s. 36-38
- [22] Dulov G. A., Astafev Ju. E., Šutov A. L.: K osobennostjam processa cholidnoj poperečno-klinovoj prokatki. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1980 nr 8 s. 5-8
- [23] „Duratec – nowa era”, *Auto Sukces*, 03/2001, s. 60-62
- [24] Fang G., Lei L., Zeng P.: Three – dimensional rigid – plastic finite element simulation for the two – roll cross – wedge rolling process, *Journal of Material Processing Technology* 129 (1-3) 2002, s. 245 – 249
- [25] Fu X. P., Dean T. A. A study of defects in cross wedge rolling. *Technical Report 4, School of Manufacturing and Mechanical Engineering Univ. Of Birmingham UK* 1991
- [26] Fu X. P., Dean T. A. Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process, *International Journal of Machinery Tools Manufacture Design, Research and Application* 1993 vol. 33, s. 367-400
- [27] GKN Car-Data Base 1995
- [28] 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
- [29] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W.: *Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów szynowych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003

- [30] Gontarz A., Pater Z., Weroński W.: Siły w procesie walcowania poprzeczno-klinowego klinami płaskimi. *Obróbka Plastyczna Metali* 2001 nr 4, s. 17-23
- [31] Gontarz A., Weroński W.: Stanowisko badawczo – dydaktyczne walcowania poprzecznego warstw zewnętrznych, W: „*Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali*” red. W. Weroński, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s.181 - 194
- [32] Grigorev A. K. i in.: Izmenene tolščiny stenki pri poperečno-klinovoj prokatke polych zagotovok. *Izv. VUZ Černaja Metalurgija* 1975 nr 7, s. 99-102
- [33] 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 3<sup>rd</sup> International Conference on Rotary Metalworking Processes* 8 -10 September 1984, Kyoto Japan 1984, s. 333-343
- [34] Hayama M. Optimum working conditions in the cross rolling of stepped shaft, *Journal of Mechanical Working Technology* 1979 nr 3, s. 31-46
- [35] Hayama M.: Optimum working conditions on cross rolling of stepped shaft – considering the formation of central cavity. *Sosei to Kako* 1976 nr 189, s. 797-804
- [36] Holub J.: *Příčné klinové válcování*. Wyd.: SNTL Praha 1972
- [37] <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu>
- [38] Hu Z. H. The working conditions and stretching angle of cross wedge rolling process. *Forging and Stamping Technol.* 1980 nr 5, s. 10-15
- [39] Hu Z. H., Xiu X. H., Sa D. Y.: *The principles, processes and machines of helical rolling and cross wedge rolling*. Wyd.: Metall. Ind. Press, Beijing 1985
- [40] Kaporowich W.: *Proizvodstvo detalej iz trub obkatnoj*, Wyd.: Mašinostroenie, Moskva 1978
- [41] Kazanecki J.: *Wytwarzanie rur bez szwu*, Wyd. AGH, Kraków 2003

- [42] Kettner P., Schmieder F.: Manufacturing of hollow transmission shafts via bulk – metal forging, *Journal of Material Processing Technology* nr 71, 1997, s. 113 - 118
- [43] Kisiel J., Pater Z.: Metoda opomiarowania podstawowych parametrów procesu walcowania poprzeczno – klinowego, *Obróbka Plastyczna Metali* 1998 nr 5, s. 29 – 36
- [44] Klušin V. A., Makušok E. M., Ščukin V. Ja. Soveršenstvovanie poperečno – klinovoj prokatki, Wyd.: Nauka i Technika, Minsk 1980
- [45] Koizumi M., Kobayashi Y. i in. Cross rolling method. *Science of Machine* 1976 nr 8, s. 50-52
- [46] Kusunoki K., Onishi T., Suzuki T. The central cavity in transversely hot rolled shaft. *Sosei to Kako* 1972 nr 140, s. 676-682
- [47] Lange K.: Modern metal forming technology for industrial production, *Journal of Material Processing Technology* nr 71, 1997, s. 2 – 13
- [48] Lazorkin V.: Technology for manufacturing hollow product of solid blanks by radial forging without piercing, Materiały reklamowe Technonova Co. Ltd. – [www.technonova.nm.rus](http://www.technonova.nm.rus)
- [49] Li Q., Lovell M., Slaughter W., Tagavi K.: Investigation of the morphology of internal defects in cross – wedge rolling, *Journal of Material Processing Technology* 125 (1-3) 2002, s. 248 – 257
- [50] Li Q., Lovell M.: Predicting critical friction in two – roll cross – wedge rolling process, *Journal of Tribology – Transaction of the ASME* 125 (1) 2003, s. 200 – 203
- [51] Li Q., Lovell M.: The establishment of a failure criterion in cross wedge rolling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 24 (3-4) 08/2004, s. 180 – 189
- [52] Lovell M.: Evaluation of critical interfacial friction in cross – wedge rolling, *Journal of Tribology – Transaction of the ASME* 123 (2) 2001, s. 424 – 429
- [53] Łuksza J.: *Elementy cięgarstwa*, Wyd. AGH, Kraków 2001
- [54] Magda J.: Poprzeczne walcowanie klinowe, *Obróbka Plastyczna* 1981 z. 4, s. 179 - 189

- [55] Miłek T.: *Proces hydro-mechanicznego rozciągania czwórnik*, Kielce 2004, Praca doktorska (maszynopis)
- [56] MSC.SuperForm 2004. User guide.
- [57] 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
- [58] 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
- [59] Norma PN-EN 10219
- [60] Norris D.M., Reaught J.E., Moran B., Quiñones D.F.: A Plastic Strain, Mean Stress Criterion for Ductile Fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology* 100 (1978), s. 279-286
- [61] 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,
- [62] Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001
- [63] 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
- [64] Pater Z., Bartnicki J.: Analiza numeryczna stabilności procesu walcowania poprzeczno – klinowego, Mat. Konf. FiMM 2003, Warszawa 16-17.10.2003. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* z. 201, s. 97-102
- [65] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Analiza możliwości zastosowania walcowania poprzeczno – klinowego do wytwarzania korpusów noży obrotowych. W: „*Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali*” red. W. Weroński, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s. 13 – 41

- 
- [66] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno – klinowego*, Wyd. LTN, Lublin 2001
- [67] 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
- [68] Pater Z., Weroński W., Kazanecki J.: Badania doświadczalne procesu walcowania poprzeczno – klinowego. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* nr 2/1999, s. 62-68
- [69] Pater Z.: A study of cross wedge rolling process. *Journal of Materials Processing Technology* 1998 vol. 80-81, s. 370-375
- [70] Pater Z.: Analiza porównawcza schematów walcowania klinowo – rolkowego, *Obróbka Plastyczna Metali*, nr 5, 2004, s. 13 – 24
- [71] Pater Z.: Badania stanu odkształcenia w wyrobach walcowanych klinami. *Rudy i Metale Nieżelazne* 1999 nr 11, s. 595-598
- [72] Pater Z.: Dobór parametrów segmentów narzędziowych do walcowania poprzeczno – klinowego wspomagany komputerowo. *Obróbka Plastyczna Metali* 1998 nr 5, s. 15-28
- [73] Pater Z.: Examination of the strain state in products of cross wedge rolling. *Proc. of the Int. Conference on Advanced Materials and Processing Technologies (AMPT'01)*, Madrit (Spain) September 18-21 2001, s. 875-882
- [74] Pater Z.: Komputerowo – wspomagane modelowanie procesu walcowania poprzeczno – klinowego. *Mat. VI Konferencji Zastosowanie Komputerów w Zakładach Przetwórstwa Metali* 17-20 styczeń 1999, Szczyrk, s. 157-164
- [75] Pater Z.: Numerical simulation of cross wedge rolling process including upsetting. *Proc. of International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies* 22–26.07.1997 Guimares (Portugalia), s. 891-896
- [76] Pater Z.: Obrotowe obciskanie pręta trzema walcami. *Obróbka Plastyczna Metali* 2001 nr 1, s. 11-20



- [77] Pater Z.: Ołów jako materiał modelowy do symulacji procesów obróbki plastycznej na gorąco, *Obróbka Plastyczna Metali*, 2003 nr 4, s. 41 – 48
- [78] Pater Z.: Stress state in cross – wedge rolling process, *Archives of Metallurgy* 48 (1) 2003, s. 21 – 35
- [79] Pater Z.: Three dimensional FEM simulation of wedge – rolls process, *Proceedings of the 8 International Conference on Numerical Method in Industrial Forming Processes - Numiform 2004*, Ohio, 13-17.06.2004, s. 642 – 648
- [80] Pomankin W., Bobuch I., Gribinik W.: Pole linii skolżenia pri prokatke s nerazriwnym polem skorostej, *Černaja Metalurgija* nr 7, 1975
- [81] *Prospekty reklamowe firmy Thomson - Micron*, 2004
- [82] Sadko V., Pater Z.: Nowa technologia produkcji noży kombajnów górniczych, *Maszyny Górnicze* 2003, nr 2, s. 52-54
- [83] Sibakov W., Semendij W., Maklakov W.: Poperečno-klinovaja prokatka avtomobilnych detaliej s oblegčajusčimi polostiami, *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1986 nr 11, s. 11 – 13
- [84] Sińczak J., Kuźmiński Z., Godek P.: Proces przygotowania odkuwek do walcowania obręczy w walcierce promieniowo-osiowej, *Hutnik Wiadomości Hutnicze*, nr 3/2004, s. 106–112
- [85] Sugiyama H. The central cavity of transversely hot rolled shaft. *Annals of the CIRP* 1973 vol. 22/1, s. 93-94
- [86] Tsukamoto H. i in.: Cross roll method for the production of axi-symmetrical stepped shaft. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Rotary Metalworking Processes* October 6<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> 1982, Stratford upon Avon UK, s. 936-941
- [87] Tsukamoto H., Morimoto K., Juge T., Takahashi K.: Application study on cross roll method for axi-symmetrical stepped shaft. *Advanced Technology of Plasticity* 1984 vol. 2, s. 936-941
- [88] *Tymczasowe Warunki Techniczne TWT P2-165*, „Stalexport” S.A.

- [89] Voelkner W.: Present and future development of metal forming: selected examples, *Journal of Materials Processing Technology* 2000 vol. 106, s. 236-242
- [90] Wang M., Li X., Du F., Zheng Y.: Hot deformation of austenite and prediction of microstructure evolution of cross – wedge rolling, *Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties Microstructure and Processing* 379 (1-2) 2004, s. 133 - 140
- [91] Wasiuńyk P.: *Teoria procesów kucia i prasowania*. WNT Warszawa 1991,
- [92] Weroński W., Gontarz A., Pater Z.: Forecasting of possible cross – wedge rolling of the AlCu<sub>2</sub>SiMn alloy, *Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Tools* 18th - 22nd April 1999, Rogaska Slatina – Maribor (Slovenia) vol. 2, s. 516-520
- [93] Weroński W., Pater Z.: *Podstawy procesu walcowania poprzeczno – klinowego*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996
- [94] 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
- [95] [www.agfm.com](http://www.agfm.com)
- [96] [www.audi.de](http://www.audi.de)
- [97] [www.azom.com](http://www.azom.com)
- [98] [www.beltechnologia.com](http://www.beltechnologia.com)
- [99] [www.bmw.de](http://www.bmw.de)
- [100] [www.china-chongfa.com](http://www.china-chongfa.com)
- [101] [www.cidect.org](http://www.cidect.org)
- [102] [www.dmv-stainless.com](http://www.dmv-stainless.com)
- [103] [www.engin.umd.umich.edu](http://www.engin.umd.umich.edu)
- [104] [www.eurocopter.de](http://www.eurocopter.de)
- [105] [www.fbmfg.thomasregister.com](http://www.fbmfg.thomasregister.com)
- [106] [www.gonar.com.pl](http://www.gonar.com.pl)
- [107] [www.hmp.com](http://www.hmp.com)
- [108] [www.hydroforming.net](http://www.hydroforming.net)

- 
- [109] [www.salewa.de](http://www.salewa.de)
  - [110] [www.schulergroup.com](http://www.schulergroup.com)
  - [111] [www.simond.com](http://www.simond.com)
  - [112] [www.smeral.cz](http://www.smeral.cz)
  - [113] [www.snecma.fr](http://www.snecma.fr)
  - [114] [www.vmtubes.de](http://www.vmtubes.de)
  - [115] Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J.: *Odkształcenie i pękanie metali*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999
  - [116] Yano M., Takahashi M.: Forming of axially symmetrical shaft with complexed steps by cross rolling method. *Mitsubishi Juko Giho* 1971 nr 5, s. 56-62
  - [117] Yaomin D., Tagavi K.A., Lovell M.R., Deng Z.: Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure. *International Journal of Mechanical Sciences* 42 (2000), s.1233-1253
  - [118] 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