

Walcowanie poprzeczno-klinowe  
odkuwek o kształtach złożonych



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

Zbigniew Pater  
Andrzej Gontarz  
Janusz Tomczak

# Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o kształtach złożonych



Politechnika Lubelska  
Lublin 2011

Opiniodawca:  
prof. dr hab. inż. Wiesław S. Weroński, Politechnika Lubelska

Redakcja i skład: Janusz Tomczak

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2011

ISBN: 978-83-62596-33-1

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

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

[www.biblioteka.pollub.pl](http://www.biblioteka.pollub.pl)

Druk : ESUS Agencja Reklamowo-Wydawnicza Tomasz Przybylak

[www.esus.pl](http://www.esus.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 80 egz.



# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b> .....	7
1.1. Zastosowanie wałków i osi ze stopniami kształtowymi .....	8
1.2. Wiadomości podstawowe z zakresu WPK .....	10
<b>2. Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek ze stopniami o przekroju poprzecznym różnym od kołowego</b> .....	17
2.1. Kalibrowanie narzędzi (klinów) .....	18
2.2. Analiza numeryczna .....	22
2.2.1. Model materiałowy i model tarcia .....	24
2.2.2. Przykładowe wyniki obliczeń .....	25
2.3. Stanowisko badawcze .....	29
2.3.1. Stanowisko badawcze .....	29
2.3.2. Narzędzia klinowe .....	31
2.3.3. Przebieg badań .....	32
2.4. Rezultaty badań .....	36
2.4.1. Dokładność geometryczna odkuwek .....	36
2.4.2. Siły w procesach WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi .....	48
<b>3. Walcowanie poprzeczne wyrobów ze stopniami kształtowymi bez redukcji przekroju</b> ..	61
3.1. Kalibrowanie narzędzi .....	61
3.2. Analiza numeryczna .....	62
3.3. Badania doświadczalne .....	65
3.4. Uzyskane wyniki .....	68
<b>4. Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek z wsadu kształtowego</b>	75
4.1. Kalibrowanie narzędzi (klinów) .....	75
4.2. Analiza numeryczna .....	76

4.3.	Walidacja modelu MES .....	78
4.4.	Uzyskane wyniki .....	82
<b>5.</b>	<b>Walcowanie wałków ze stopniem mimośrodowym .....</b>	<b>95</b>
5.1.	Nowoczesne metody kształtowania wałków mimośrodowych ..	96
5.2.	Walcowanie mimośrodu wg koncepcji własnej .....	99
5.2.1.	Analiza numeryczna .....	101
5.2.2.	Laboratoryjne próby walcowania .....	110
<b>6.</b>	<b>Walcowanie wałków zębatach .....</b>	<b>115</b>
6.1.	Obliczenia numeryczne .....	116
6.1.1.	Analiza w warunkach płaskiego stanu odkształcenia ...	116
6.1.2.	Analiza w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia .....	122
6.1.3.	Przykład procesu WPK wałka uzębionego .....	135
6.2.	Badania doświadczalne .....	141
6.2.1.	Walcowanie uzębienia prostego .....	141
6.2.2.	Walcowanie uzębienia skośnego .....	144
<b>7.</b>	<b>Walcowanie uzębienia ślimaka .....</b>	<b>149</b>
7.1.	Analiza numeryczna .....	150
7.1.1.	Przykład kształtowania .....	159
7.2.	Badania doświadczalne .....	166
<b>8.</b>	<b>Zakończenie .....</b>	<b>173</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>177</b>
	<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń .....</b>	<b>181</b>
	<b>Streszczenie .....</b>	<b>183</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>185</b>

# 1. Wprowadzenie

Silna konkurencja na rynkach światowych wymusza na producentach unowocześnianie stosowanych oraz poszukiwanie nowych technik wytwarzania, ukierunkowanych na obniżenie kosztów produkcji i podniesienie jakości wyrobów. Korzyści wynikające z opracowania nowych rozwiązań technologicznych związane są z ich patentowaniem, co gwarantuje wykonawcy komfort będący efektem wyłączności ich stosowania. Prowadzi to, poprzez obniżenie kosztów produkcji, do pozyskiwania nowych rynków zbytu i pomnażania zysków. W konsekwencji możliwe jest przeznaczenie większych środków na prace badawczo-rozwojowe, realizowane w znaczącej części w ośrodkach naukowych.

Podana powyżej tendencja jest również słuszna w przypadku obróbki plastycznej metali, będącej jedną z wiodących technik wytwarzania części maszyn. Spośród licznych technologii obróbki plastycznej na szczególną uwagę zasługuje nowoczesna metoda walcowania poprzecznego (WPK), rozwijana w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Technologia ta ze względu na liczne zalety znalazła zastosowanie w produkcji wyrobów symetrycznych osiowo, głównie typu stopniowanych wałków i osi.

Bardzo często w budowie maszyn spotykane są elementy wydłużone mające stopnie o różnych przekrojach kształtowych. Półfabrykaty takich części mogą być wykonywane między innymi technikami kucia bądź walcowania poprzeczno-klinowego, natomiast stopnie kształtowe wykonywane są zwykle w procesach obróbki skrawaniem. Zastosowanie technik walcowania poprzeczno-klinowego do produkcji półfabrykatów mających oprócz stopni o przekrojach kołowych również stopnie kształtowe, znacząco zmniejsza liczbę operacji i energię niezbędną do wytworzenia elementu. Jednocześnie zastosowanie takiego rodzaju obróbki polepsza własności mechaniczne i wytrzymałościowe części przez korzystne ukształtowanie struktury w procesie obróbki plastycznej.

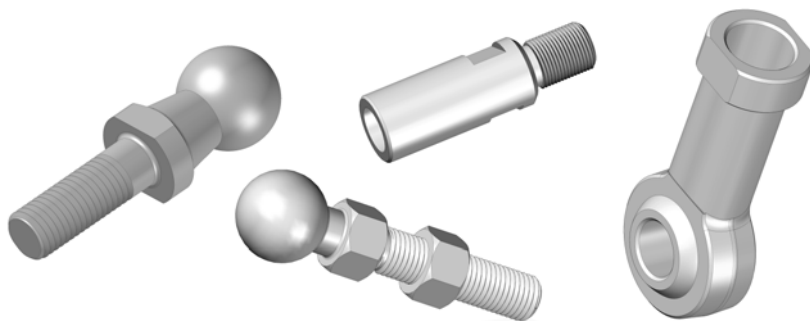
W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań dotyczących wykorzystania technologii walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) do kształtowania wyrobów wydłużonych, nie spełniających warunków stawianych przez symetrię osiową. W efekcie rozszerzono zakres zastosowań tej technologii o wytwarzanie odkuwek o kształtach bardziej złożonych od wykonywanych obecnie.

W pracach badawczych wykorzystano głównie nowoczesne metody modelowania numerycznego, bazującego na metodzie elementów skończonych. Opracowane modele teoretyczne procesu WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi zweryfikowano w próbach laboratoryjnych.

## 1.1. Zastosowanie wałków i osi ze stopniami kształtowymi

Duża część elementów maszyn o kształcie wydłużonym posiada na swojej długości stopnie o przekrojach poprzecznych kształtowych, takich jak: kwadrat, prostokąt, z płaskimi ścięciami pod klucz, czy też inne.

Przekroje kształtowe bardzo często spotyka się w różnego typu łącznikach i zakończeniach przegubów kulistych. Są to na ogół specjalnie ukształtowane powierzchnie płaskie, które umożliwiają obrót elementu kluczem, lub jego zablokowanie przed obrotem. Podobną rolę odgrywają stopnie o przekrojach kwadratowych i sześciokątnych wykonywane na wałkach i osiach. Równie szerokie zastosowanie znalazły stopnie o dwu płaskich ścięciach, równoległych do siebie. Stanowią one miejsca dla uchwycenia kluczem. Najczęściej spotyka się je w łącznikach śrubowych i zakończeniach przegubów kulistych. Przykłady takich wyrobów pokazano na rys. 1.1.



**Rys. 1.1.** Przykłady wyrobów ze stopniami kształtowymi (nie spełniającymi warunków symetrii osiowej)

W budowie maszyn często spotyka się także elementy ze stopniami o przekrojach owalnych, bądź eliptycznych. Innymi przykładami mogą być sworznie mające na znacznej części swojej długości przekrój poprzeczny kwadratowy lub typu płaskie ścięcia – rys. 1.2.

Odmienną rolę w elementach maszyn pełnią stopnie mimośrodowe, które wykorzystywane są między innymi w: napędach maszyn zamieniających ruch

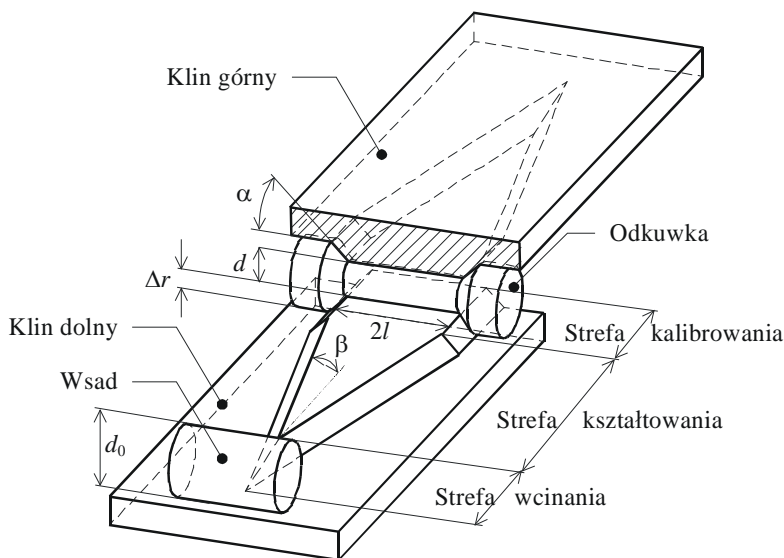


W procesach kucia matrycowego często stosuje się przedkuwki o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. Zwykle jest to przekrój w kształcie owalu. Zastosowanie przedkuwki o takiej geometrii powoduje między innymi łatwiejsze wypełnienie wykroju matrycującego, zmniejszenie sił kucia, wyeliminowanie operacji spęczania i skrócenie czasu wykonania odkuwki.

## 1.2. Wiadomości podstawowe z zakresu WPK

Walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) polega na plastycznym kształtowaniu wyrobów osiowo-symetrycznych, w wyniku oddziaływania narzędzi w kształcie klinów. Narzędzia te montowane są na walcach, bądź płaskich lub wklęsłych płytach walcarek.

Na rys. 1.4 przedstawiającym schemat WPK wałka elementarnego (mającego pojedyncze przewężenie) zaznaczono podstawowe parametry geometryczne procesu. Zalicza się do nich: kąt kształtujący  $\alpha$ , kąt rozwarcia klina  $\beta$ , średnicę wsadu  $d_0$ , średnicę kształtowanego stopnia wałka  $d$  oraz długość odcinka walcowanego  $l$  [29, 33].



**Rys. 1.4.** Schemat procesu walcowania poprzeczno – klinowego narzędziami płaskimi [29, 33]

W narzędziach wykorzystywanych do WPK wyróżnia się następujące podstawowe strefy: wcinania, kształtowania i kalibrowania. W strefie wcinania klin stopniowo zagłębia się w materiał na głębokość  $\Delta r$ , redukując średnicę wsadu do

zakładanej wartości  $d$ . W strefie kształtowania w wyniku oddziaływania bocznych ścian klina następuje spiralne rozwinięcie redukcji na całą długość  $l$  walcowanego stopnia odkuwki. Natomiast w strefie kalibrowania odkuwka poddawana jest obciskaniu obrotowemu, w czasie którego usuwane są powstałe w poprzednich fazach procesu nieprawidłowości kształtu.

Za podstawowe miary przerobu plastycznego materiału w procesie WPK uznaje się [15, 29, 59]:

- stopień gniotu  $\delta$ , definiowany jako

$$\delta = \frac{d_0}{d}, \quad (1.1)$$

- redukcję względną  $R_p$  przekroju poprzecznego obliczaną z zależności

$$R_p = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

gdzie:  $d_0$  – średnica wsadu,  $d$  – średnica walcowanego stopnia odkuwki,  $S_0$  – pole przekroju poprzecznego wsadu,  $S$  – pole przekroju poprzecznego walcowanego stopnia.

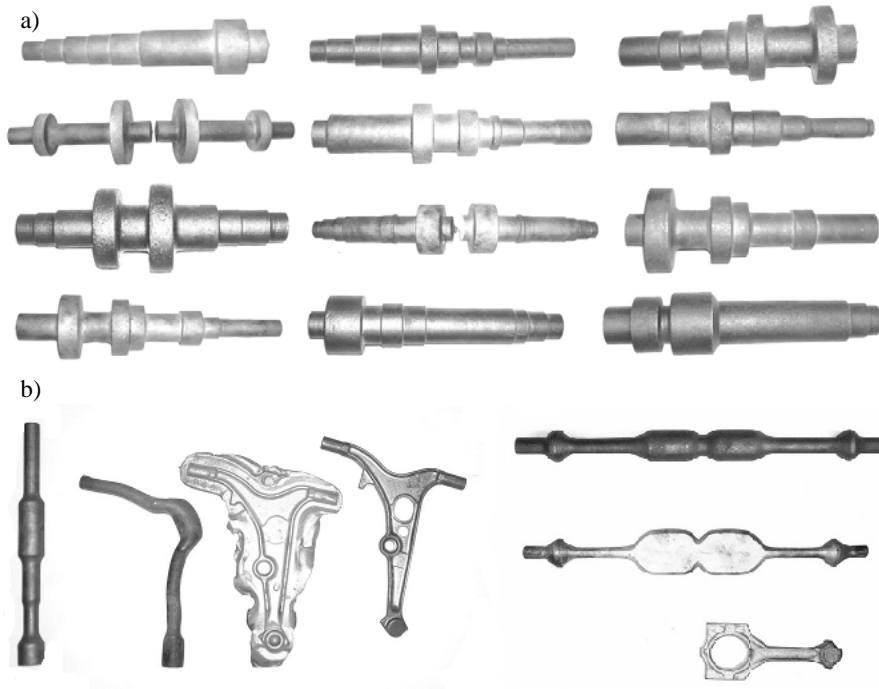
W porównaniu do innych metod wytwarzania (obróbki skrawaniem, kucia matrycowego, odlewnictwa) WPK odznacza się szeregiem korzystnych cech. Są to w szczególności [21, 37, 38, 50, 56]:

- Wysoka wydajność. W trakcie jednego cyklu roboczego (obrotu walców, przemieszczenia klinów płaskich) wykonywany jest co najmniej jeden wyrób. Uwzględniając, że prędkość obrotowa walców w walcarkach przemysłowych wynosi od 10 do 30 obr/min można szacować orientacyjną wydajność procesu WPK na 10÷30 szt/min. Jest to około 5÷20 razy więcej w stosunku do wydajności osiąganych w procesach kucia, bądź obróbki skrawaniem.
- Lepsze wykorzystanie materiału. Straty materiału występujące w procesie WPK z reguły nie przekraczają 10%. Podczas gdy w kuciu straty te wynoszą średnio 15÷30%, a w przypadku obróbki skrawaniem nawet 40%.
- Polepszenie własności wytrzymałościowych. W trakcie WPK kształt wyrobu osiągany jest w wyniku płynięcia plastycznego metalu. Uzyskiwany w wyrobie ciągły układ włókien (zagęszczonych przy powierzchni) sprawia, że własności wytrzymałościowe odkuwek są lepsze od uzyskiwanych metodami obróbki skrawaniem i odlewnictwa.
- Ochrona środowiska. W porównaniu do kucia matrycowego WPK odznacza się znaczną redukcją emitowanego hałasu. Ponadto, proces ten nie wymaga stosowania materiałów dodatkowych, takich jak chłodziwa i smary.
- Mniejsza energochłonność. Materiałem wsadowym w procesach WPK są odcinki walcowanych prętów okrągłych, które są w sposób ciągły poda-

wane w przestrzeń międzywalcową. W danym momencie nagrzewaniu poddawany jest zatem wsad o objętości wyrobu kształtowanego. Pociąga to za sobą zmniejszenie strat ciepłych występujących podczas kształtowania.

- Automatyzacja i niski koszt wytwarzania. W procesach WPK wyrób jest wytwarzany na gotowo podczas jednej operacji. W efekcie zmniejszeniu ulega liczba pracowników, maszyn oraz wielkość powierzchni produkcyjnej niezbędnej do zabezpieczenia procesu wytwarzania.

Dzięki powyższym zaletom metoda WPK znalazła szerokie zastosowanie, przede wszystkim w przemyśle maszynowym w produkcji odkuwek wydłużonych typu stopniowanych osi i wałków [2, 3, 7, 25, 41, 43, 51]. Równie często WPK wykorzystuje się do wykonywania przedkuwek do kucia matrycowego wyrobów takich jak: klucze maszynowe, korbwody, dźwignie, widełki, korby pedałów rowerowych [6, 11, 26, 47, 51, 55]. Do innych wyrobów kształtowanych analizowaną metodą zalicza się: rdzenie izolatorów wysokiego napięcia [20, 23, 24, 30], odkuwki części stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym (czopy mechanizmów kierowniczych, czopy układów zawieszenia itp.) [13, 53], korpusy noży obrotowych [30, 40] oraz wkręty szynowe [16]. Przykłady wyrobów wytwarzanych z wykorzystaniem metody WPK podano na rys. 1.5.



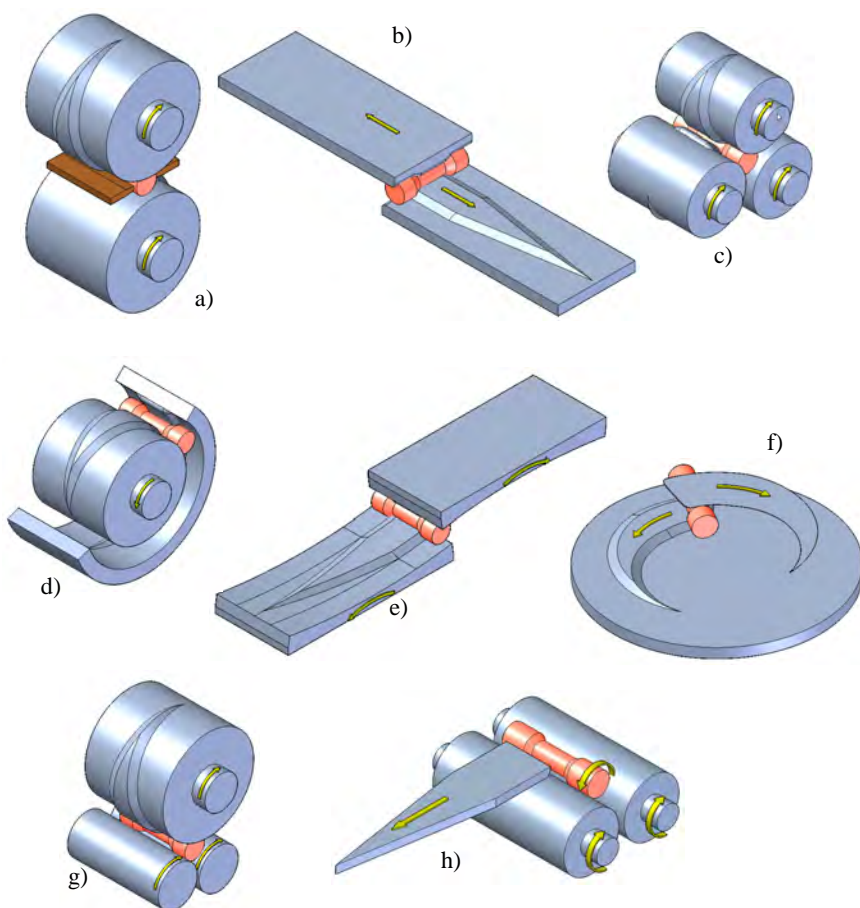
**Rys. 1.5.** Przykłady wyrobów wytwarzanych z udziałem WPK: a) odkuwki stopniowanych wałków i osi, b) przedkuwki walcowane wraz z odkuwkami wykonanymi na ich bazie



Podstawowy podział metod WPK przeprowadza się ze względu na kształt klinów oraz zastosowany w walcierce sposób ich napędzania. Zgodnie z takim kryterium wyróżnia się osiem schematów WPK, pokazanych na rys. 1.6 i opisanych poniżej.

- a) Walcowanie poprzeczno-klinowe dwoma walcami - rys. 1.6 a. W tej metodzie WPK wyrób kształtowany jest segmentami klinowymi, umieszczonymi na walcach o osiach równoległych. W czasie jednego obrotu walców odkuwka (przedkuwka) kształtowana jest na gotowo i w przypadku, gdy walcowana jest z pręta może być odcięta nożami zamocowanymi do walców. Podczas kształtowania dwoma walcami stosuje się listwy prowadzące, zabezpieczające odkuwkę przed jej wypadnięciem ze strefy roboczej walców. Podstawowymi zaletami tej odmiany WPK są: duża dokładność wyrobów walcowanych, możliwość walcowania wyrobów z pręta, duża trwałość narzędzi i możliwość ich wielokrotnej regeneracji. Natomiast za główne wady tej metody uważa się trudności związane z wykonawstwem narzędzi oraz konieczność przytrzymywania wyrobu pomiędzy walcami.
- b) Walcowanie poprzeczno-klinowe narzędziami płaskimi – rys. 1.6b. Do podstawowych zalet tej metody kształtowania zalicza się: łatwość wykonania narzędzi, dużą dokładność wyrobów walcowanych, samoprowadzenie wyrobu podczas walcowania, dużą trwałość narzędzi i możliwość wielokrotnej ich regeneracji, łatwość wymiany narzędzi. Natomiast głównymi wadami są: duże wymiary gabarytowe walcerek oraz występowanie biegu jałowego narzędzi (zajmującego około 40% czasu cyklu roboczego). WPK wg tego schematu można realizować przy poziomym oraz pionowym ustawieniu klinów, z których jeden lub dwa są napędzane i przemieszczają się ruchem posuwisto-zwrotnym.
- c) Walcowanie poprzeczno-klinowe trzema walcami – rys. 1.6c. Kształtowanie w układzie trzech walców nie wymaga stosowania listew prowadzących, niezbędnych w metodzie dwuwalcowej do utrzymywania wyrobów między walcami. Z powodu zastosowania trzech klinów (roz-mieszczonych co  $120^\circ$ ) zmianie ulega kinematyka płynięcia metalu podczas walcowania, zmniejsza się również prawdopodobieństwo utworzenia pęknięć wewnętrznych w odkuwce. Podstawową wadą kształtowania trzema walcami jest brak możliwości stosowania walców o dużych średnicach, co przekłada się na ograniczenia wymiarów odkuwek możliwych do wykonania tą metodą.
- d) Walcowanie poprzeczno-klinowe w układzie walec segment wklęsły – rys. 1.6d. W procesie WPK realizowanym wg tego schematu odcinek pręta jest kształtowany między obracającym się walcem, a nieruchomym wklęsłym segmentem narzędziowym, obejmującym ten walec na części łuku. W czasie walcowania odkuwka obraca się wokół

własnej osi oraz toczy się po narzędziach klinowych walca i segmentu. Ze względu na rozdzielenie stref podawania wsadu i odbierania odkuwki możliwe jest podawanie kolejnego odcinka pręta podczas kształtowania poprzedniego, co pozwala na zwiększenie wydajności walcowania. Głównymi zaletami tej metody WPK są: duża wydajność produkcji, duża sztywność maszyny, samoprowadzenie odkuwki podczas walcowania, łatwość automatyzacji procesu oraz niezawodność eksploatacyjna walcarki. Natomiast do wad WPK w układzie walec – segment wklęsły zalicza się: trudność wykonania narzędzi i brak lub bardzo ograniczoną regulację przestrzeni roboczej maszyny, możliwość regeneracji narzędzi tylko poprzez napawanie ich powierzchni oraz możliwość walcowania tylko z odcinków prętów.



**Rys. 1.6.** Schematy procesów WPK realizowanych w układzie: a) dwóch walców, b) dwóch klinów płaskich, c) trzech walców, d) walec – segment wklęsły, e) dwóch klinów wklęsłych, f) dwóch dysków klinowych, g) jednego walca i dwóch rolek, h) klina płaskiego i dwóch rolek

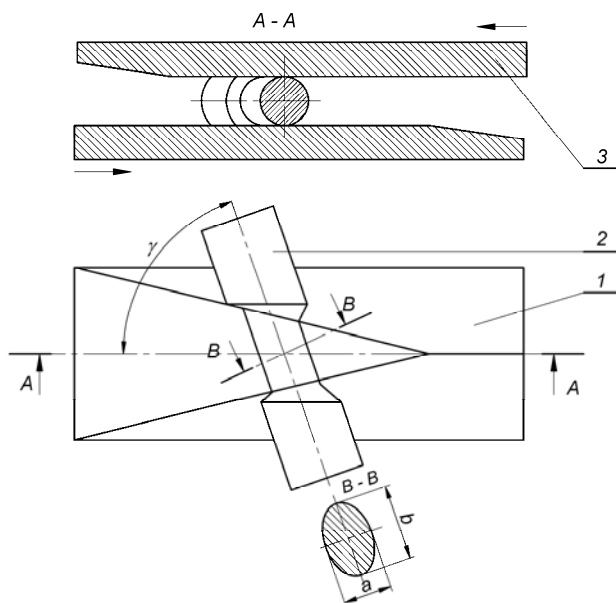
- 
- e) Walcowanie poprzeczno-klinowe w układzie dwóch wklęsłych segmentów narzędziowych – rys. 1.6e. Ten schemat walcowania stosowany jest głównie do kształtowania wielowypustów oraz uzębień kół zębatych [60]. Teoretycznie może on być również wykorzystany w procesie WPK wyrobów o innych kształtach. Jednakże ze względu na złożoność narzędzi zabezpieczających realizację kształtowania ta odmiana WPK nie znalazła zastosowania przemysłowego.
  - f) Walcowanie poprzeczno-klinowe dwoma dyskami – rys. 1.6f. W procesie tym odkuwkę kształtują kliny umieszczone na dwóch obracających się przeciwnie dyskach. Wg Ščukina [42] ta metoda WPK nie rozpowszechniła się ze względu na trudności związane z wykonawstwem narzędzi roboczych.
  - g) Walcowanie poprzeczno-klinowe jednym walcem – rys. 1.6g. W procesie tym odcinek pręta, umieszczony na dwóch rolkach gładkich, kształtowany jest w wyniku oddziaływania segmentu klinowego umieszczonego na jednym walcu roboczym [19]. Metoda ta nie znalazła zastosowania w przemyśle ze względu na występujące podczas walcowania intensywne krzywienie odkuwki.
  - h) Walcowanie poprzeczne za pomocą jednego klina i dwóch rolek (gładkich lub profilowych) – rys. 1.6h. Ta odmiana WPK, znana pod nazwą walcowania klinowo-rolkowego (WKR) opracowana została w Politechnice Lubelskiej [32]. W porównaniu do metod WPK odznacza się ona szeregiem zalet, z których najważniejsze to: mniejsza skłonność do tworzenia pęknięć wewnętrznych w odkuwce, niższe koszty wdrożeniowe oraz ułatwione usuwanie zendry. Natomiast podstawową wadą WKR są ograniczenia w kształcie odkuwek, które można walcować w tym procesie.



## 2. Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek ze stopniami o przekroju poprzecznym różnym od kołowego

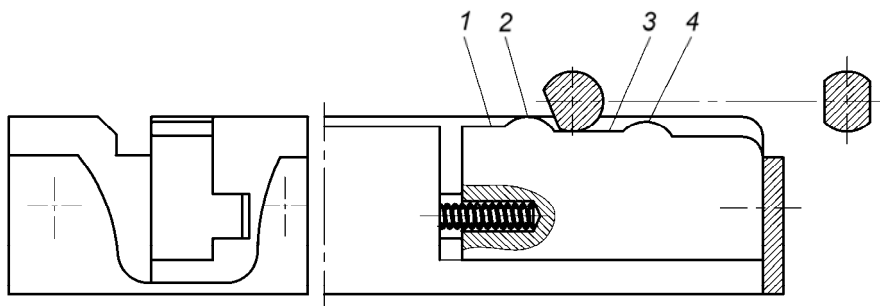
Zastosowanie metody WPK nie jest ograniczone wyłącznie do kształtowania odkuwek o przekroju okrągłym. W przeszłości próbowano rozszerzyć zastosowanie tej technologii na wyroby nie spełniające warunków symetrii osiowej.

Na rys. 2.1 przedstawiono przykładowo zasadę kształtowania segmentami klinowymi wyrobu o przekroju eliptycznym, wg [37, 46]. Wsad 2 umieszczany jest pod kątem ostrym  $\gamma$  do kierunku przemieszczania klinów 1 i 3, które redukują przekrój poprzeczny wyrobu i powodują jego wydłużenie. W wyniku kształtowania uzyskuje się odkuwkę o przekroju okrągłym w kierunku walcowania A-A i eliptycznym przekroju poprzecznym (kierunek B-B).



**Rys. 2.1.** Schemat procesu WPK wyrobów o przekroju poprzecznym eliptycznym, (opis w tekście) [37, 46]

Na rys. 2.2 przedstawiono zasadę kształtowania odkuwki z płaskimi ścieniami. W pierwszej fazie procesu odbywa się typowe walcowanie poprzeczno-klinowe, w wyniku czego uzyskuje się wałek o wymaganym kształcie. W drugiej fazie wyrób wchodzi w kontakt z ruchomą wstawką umieszczoną za częścią kalibrującą segmentu narzędziowego, której występ 2 kształtuje pierwszą, a występ 4 drugą płaszczyznę ścienia. Proces walcowania płaszczyzn przebiega stabilnie (bez poślizgu) dzięki temu, że na powierzchni 3 (pomiędzy występami) wykonane są nacięcia technologiczne zwiększające tarcie, a wstawka 1 ma możliwość ruchu w kierunku prostopadłym do osi wzdłużnej wyrobu walcowanego [37, 39, 45].



**Rys. 2.2.** Schemat oprzyrządowania umożliwiający kształtowanie płaskich ścian na wyrobach walcowanych metodą WPK, (opis w tekście) [37, 45]

W ramach niniejszego rozdziału opisano nowy sposób kształtowania, bazujący na metodzie WPK, odkuwek wydłużonych mających stopnie o przekroju poprzecznym różnym od kołowego.

## 2.1. Kalibrowanie narzędzi (klinów)

Koncepcja rozwiązania umożliwiającego walcowanie wyrobów o praktycznie dowolnym przekroju bazuje na odpowiednim okresowym sprofilowaniu powierzchni kalibrujących klina. Profil ten dobiera się w taki sposób, by stanowił on obwiednię kształtowanego stopnia wałka. Poniżej szczegółowo przedstawia się schemat postępowania zmierzającego do określenia profilu narzędzi umożliwiających walcowanie stopnia odkuwki o przekroju kwadratowym [34, 35, 48, 49].

Na rys. 2.3 pokazano zarys kwadratowego przekroju poprzecznego stopnia odkuwki (o boku  $a = 18$  mm), który zamierza się uzyskać w procesie walcowania wsadu o średnicy  $\varnothing 30$  mm. Ze względu na podwójną symetrię zarysu w analizowanym przypadku wystarczy wyznaczyć profil narzędzia zapewniający wykonanie przez odkuwkę  $\frac{1}{4}$  obrotu, czyli o kąt  $\varphi = 90^\circ$ . Przy

czym na długości narzędzia odpowiadającej obrotowi odkuwki o kąt  $\varphi = 45^\circ$  następuje zmniejszenie gniotu bezwzględnego od wartości maksymalnej  $\Delta r_{\max} = r_0 - a/2$  do wartości minimalnej  $\Delta r_{\min} = r_0 - a/\sqrt{2}$ . Dalszemu obrotowi wyrobu ( $45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ) towarzyszy zaś zwiększanie gniotu, przyrastającego w sposób odwrotny do jego spadku, obserwowanego w czasie poprzedniej 1/8 obrotu. Dlatego też w bieżącym przykładzie wystarczy ustalić profil narzędzia na długości odpowiadającej obrotowi odkuwki o kąt  $45^\circ$ . Kąt ten dzieli się na  $n$  równych części, z czego wynika podział kątowny  $\Delta\varphi$  równy

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi}{n}. \quad (2.1)$$

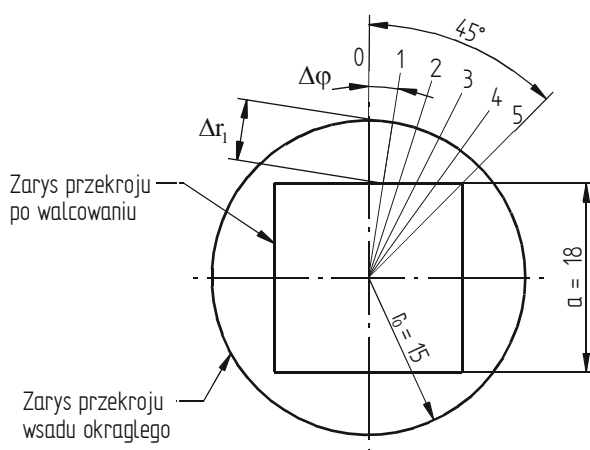
Następnie określa się wartość gniotu bezwzględnego  $\Delta r_i$ , w płaszczyznach wzdłużnych określonych kolejnymi liniami  $i = 0, 1, 2, \dots$ . W analizowanym przykładzie jest to

$$\Delta r_i = r_0 - \frac{a}{2 \cdot \cos(i \cdot \Delta\varphi)}. \quad (2.2)$$

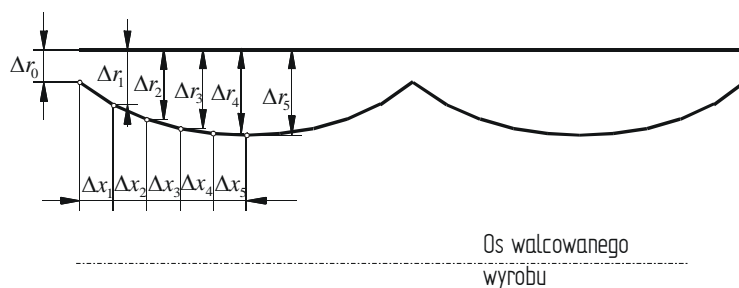
O wyliczoną wartość  $\Delta r_i$  należy obniżyć powierzchnię kalibrującą narzędzia (w sposób pokazany na rys. 2.4) przyjmując jednocześnie, że odległość  $\Delta x_i$  (określająca przemieszczenie klina w trakcie wykonywania przez odkuwkę obrotu o kąt  $\Delta\varphi$ ) może być obliczona na podstawie następującej zależności:

$$\Delta x_i = \Delta\varphi \cdot r_i, \quad (2.3)$$

gdzie:  $r_i$  – promień toczny odkuwki.



**Rys. 2.3.** Schemat ilustrujący sposób wyznaczania gniotu bezwzględnego  $\Delta r_i$ , w procesach WPK wyrobów o przekroju poprzecznym różnym od kołowego



**Rys. 2.4.** Sposób profilowania powierzchni kalibrującej klinów mający na celu uzyskanie możliwości kształtowania wyrobu o przekroju poprzecznym kwadratowym

Wartość promienia tocznego ulega zmianie w trakcie procesu WPK i jest zależna m.in. od wartości kątów klina (kształtującego  $\alpha$  i rozwarcia  $\beta$ ), zastosowanego stopnia gniotu  $\delta$  oraz temperatury kształtowanego metalu  $T$  [10, 36]. W przypadkach, gdy odkuwka poza strefą kształtowania toczy się po klinie, z pewnym uproszczeniem można przyjmować, że promień toczny  $r_t$  równy jest promieniowi wsadu  $r_0$ .

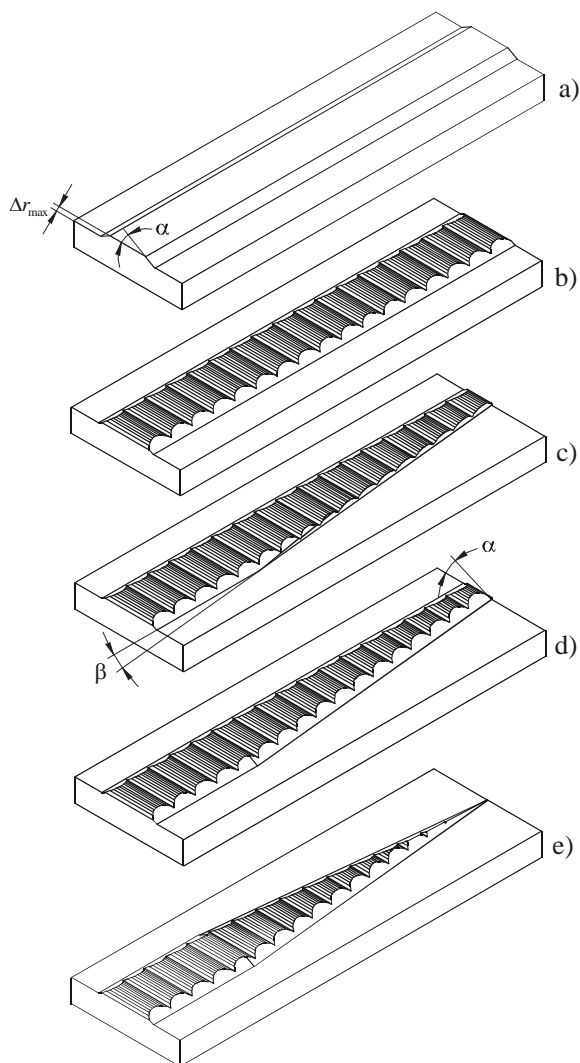
Stosując takie uproszczenie można już bez większych problemów zaprojektować kliny umożliwiające walcowanie stopni odkuwki np. o przekroju kwadratowym. Oczywiście przystępując do prac projektowych w pierwszej kolejności należy ustalić wartości kątów  $\alpha$  i  $\beta$  klinów, które dobiera się w sposób identyczny jak w klasycznych procesach WPK – opisany np. w pracach [28, 33].

Znajomość kątów  $\alpha$  i  $\beta$  umożliwia wykonanie projektu narzędzi. Omówienie kolejności prac związanych z konstrukcją narzędzi klinowych przedstawiono w oparciu o przestrzenny system komputerowo wspomaganego projektowania (CAD 3D). Pierwszy etap prac stanowi wykonanie bryły, której przekrój poprzeczny odpowiada zarysowi wzdłużnemu kształtowanego przewężenia. Wysokość profilu klina przyjmuje się za równą wartości maksymalnej gniotu  $\Delta r_{max}$  (w analizowanym przypadku wynosi ona  $r_0 - a/2$ ) – rys. 2.5a.

Następnie profiluje się powierzchnię kalibrującą klinów wycinając w niej w sposób okresowy wgłębenia o zarysie przedstawionym na rys. 2.4, ustalonym na podstawie obliczeń. Tak sprofilowane narzędzia pokazano na rys. 2.5b. Następnie startując ze środka występu odcina się (pod kątem  $\beta$ ) jego część płaszczyzną prostopadłą do powierzchni podstawy narzędzia (rys. 2.5c). Kolejny etap stanowi sfazowanie, pod kątem  $\alpha$  do podstawy, powierzchni pionowej uzyskanej w poprzedniej operacji. W wyniku takiego zabiegu uzyskuje się powierzchnię kształtującą klina, jednoznacznie określoną przez kąty  $\alpha$  i  $\beta$  (rys. 2.5d). Dalsze prace projektowe dotyczą wykonania (w sposób analogiczny do omówionego poprzednio) powierzchni kształtującej na drugiej połowie narzędzia (rys. 2.5e). Konstrukcji klina dopełnia wprowadzenie promieni



zaokrąglenia krawędzi roboczych oraz dodanie sfazowań umożliwiających płynne zejście odkuwki z klinów.



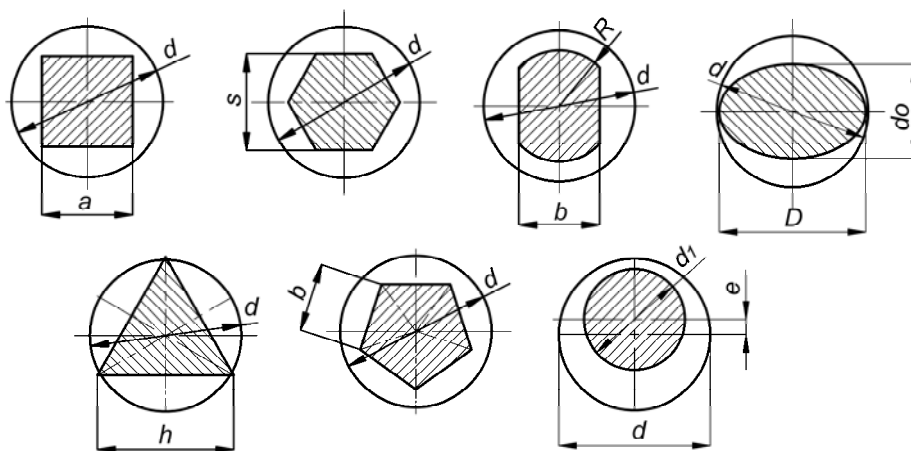
**Rys. 2.5.** Schemat ilustrujący sposób konstruowania narzędzia klinowego, zabezpieczającego walcowanie odkuwki z kwadratowym przekrojem poprzecznym, opis w tekście

Wykorzystując opisaną metodę kalibrowania narzędzi można projektować kliny do walcowania stopni o przekroju poprzecznym w kształcie (rys. 2.6):

- kwadratu;
- sześciokąta;
- z płaskimi ścięciami pod klucz;

- owalu;
- trójkąta;
- pięciokąta;
- oraz stopni mimośrodkowych.

W przypadku wyrobów o przekrojach poprzecznych pokazanych na rys. 2.6 w dolnym rzędzie, kliny mają różne kształty. Wynika to z różnych gniotów, występujących w dowolnym momencie procesu, na klinach dolnym i górnym. W takiej sytuacji należy prace projektowe wykonać oddzielnie dla każdego z narzędzi klinowych.



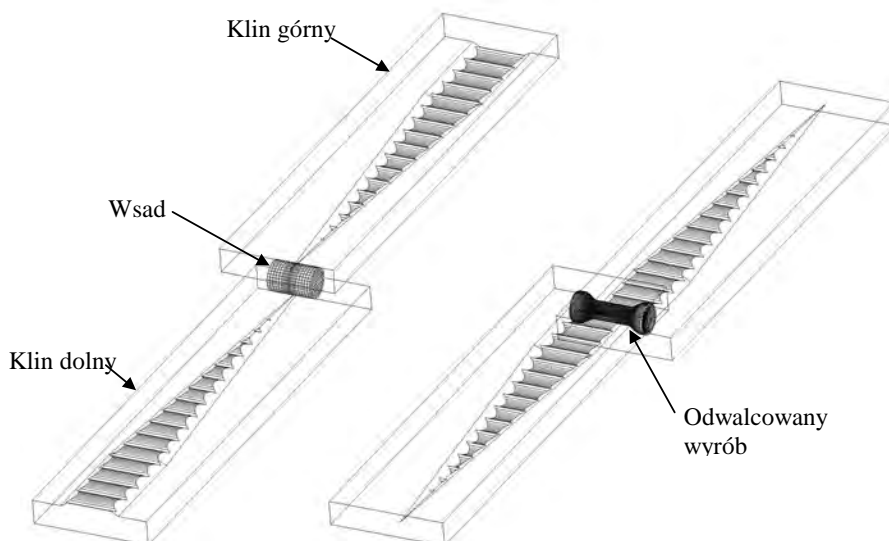
**Rys. 2.6.** Kształty przekroju poprzecznego odkuwek uwzględnione w analizie procesu WPK klinami profilowymi

## 2.2. Analiza numeryczna

Dla sprawdzenia możliwości wytwarzania metodą WPK odkuwek mających stopnie o przekroju poprzecznym różnym od kołowego wykorzystano modelowanie numeryczne, bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). Obliczenia wykonano stosując komercyjny pakiet oprogramowania MSC.SuperForm 2005 wykorzystujący reprezentację przemieszczeniową MES. Skuteczność zastosowania tego oprogramowania w badaniach procesu WPK, potwierdzona była wielokrotnymi weryfikacjami doświadczalnymi realizowanymi zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych [5, 12, 31].

Ze względu na złożoność zagadnienia procesu WPK odkuwek kształtowych, symulacje przeprowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D). Taki charakter symulacji powodował, że czas obliczeń był stosunkowo długi (w wielu przypadkach przy wykorzystaniu komputera osobistego PC wynosił kilka dni).

Na potrzeby obliczeń opracowano szereg modeli geometrycznych procesu WPK odkuwek mających stopnie kształtowe. Jeden z zastosowanych w obliczeniach modeli geometrycznych przedstawiono na rysunku 2.7.



**Rys. 2.7.** Opracowany na potrzeby obliczeń MES model geometryczny procesu WPK odkuwki o przekroju poprzecznym kwadratowym

W skład każdego modelu wchodzi: dwa kliny płaskie (poruszające się w przeciwnych kierunkach z prędkością 0,10 m/s każdy) oraz wsad modelowany za pomocą ośmiowęzłowych elementów prostopadłościennych. Wybór rodzaju elementów wynikał z konieczności stosowania w trakcie obliczeń aktualizacji siatki elementów, czyli tzw. remeshingu. Jako wsad przyjmowano pręty okrągłe o średnicy  $\varnothing 30$  i długości 180 mm. Wymiary narzędzi i wsadu przyjmowano w ten sposób, by możliwe było zweryfikowanie analizowanego procesu walcowania w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.

W ramach wykonanych badań dokonano analizy numerycznej procesów WPK wsadu walcowego, pozwalających na otrzymywanie odkuwek o przekrojach poprzecznych: kwadratowych, owalnych, sześciokątnych, trójkątnych, pięciokątnych oraz z płaskimi ścięciami.

W obliczeniach przyjmowano różne warunki procesu WPK, charakteryzowane przez następujące parametry:

- ❑ redukcję przekroju poprzecznego:  $R_p = 40\%$ , 55% lub 70%;
- ❑ kąt kształtujący:  $\alpha = 20^\circ$ , 30°, 40°;
- ❑ kąt rozwarcia klina:  $\beta = 5^\circ$ , 7° lub 9°.

W analizie założono termomechaniczny schemat obliczeń. Przyjęto, że materiał przed walcowaniem jest nagrzewany do temperatury 1150°C, zaś temperatura klinów jest jednakowa i wynosi 50°C. Pozostałe parametry przyjęte w obliczeniach to: współczynnik wymiany ciepła między materiałem a otoczeniem 350 W/m<sup>2</sup>K, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami 10 000 W/m<sup>2</sup>K oraz temperatura otoczenia 30°C.

### 2.2.1. Model materiałowy i model tarcia

W pracach badawczych przyjęto, że materiałem, z którego wykonywane są odkuwki jest stal w gatunku C45. Stop ten stosowany jest na średnio obciążone i odporne na zużycie części maszyn, takie jak: koła zębate; wrzeciona tokarek i wiertarek; korbowody; tłoczyska; wały mimośrodowe i korbowe pras, pomp, silników spalinowych; wały turbin, prądnic i innych części pojazdów; osie; wałki; trzony; łopaty; noże; widelce; młotki itp. Ponadto, stal ta znajduje zastosowanie na części pracujące w podwyższonych temperaturach, takie jak: śruby, rozpórki pracujące w temperaturze do 400°C, osie, wały wirnikowe do turbin parowych, osprzęt i armatura pracujące w temperaturze do 450°C. Stal C45 łatwo poddaje się zarówno obróbce plastycznej na zimno, jak i na gorąco.

Stal C45 jest materiałem najczęściej wykorzystywanym w technologii walcowania poprzeczno-klinowego. Stosowana jest w praktyce przemysłowej przy uruchamianiu nowych procesów WPK. Takie podejście znacznie usprawnia technologom zaprojektowanie narzędzi (dzięki dużej skali porównawczej do poprzednio wdrożonych procesów WPK), gwarantujących uzyskanie odkuwki o zakładanym kształcie. Dopiero po dopracowaniu kształtu klinów przeprowadza się próby walcowania wsadu z materiału docelowego. Z powyższego powodu uznano, że ten gatunek stali będzie najwłaściwszym do zastosowania przy opracowywaniu nowych technologii bazujących na procesie WPK.

W obliczeniach numerycznych wykorzystano model materiałowy stali C45 znajdujący się w bazie danych programu MSC.SuperForm. Model ten dobrze oddaje zachowanie tego gatunku stali w procesach WPK na gorąco, co wielokrotnie zostało zweryfikowane doświadczalnie przez autorów [27, 31, 33].

Ze względu na występujące podczas walcowania na powierzchniach styku metal – narzędzie zmiany sił tarcia w obliczeniach zastosowano model tarcia stałego, uzależniony od prędkości poślizgu. Model ten opisuje następująca zależność [16]:

$$\tau = -mk \frac{2}{\pi} \arctg \left( \frac{|v_p|}{a_p} \right) \frac{v_p}{|v_p|}, \quad (2.4)$$

gdzie:  $m$  – czynnik tarcia,  $v_p$  – wektor prędkości poślizgu,  $a_p$  – współczynnik, zawierający się w granicach od 1% - 10% przewidywanej prędkości poślizgu

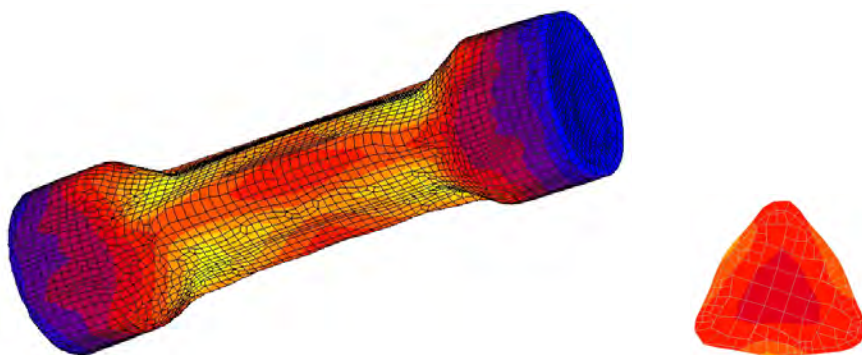
$v_p, k$  - granica plastyczności przy czystym ścinaniu.

W obliczeniach przyjęto, że  $a_p = 10\%$  prędkości narzędzia oraz, że czynnik tarcia ma wartość graniczną  $m = 1$ . Za przyjmowaniem granicznych wartości czynnika tarcia w analizowanych procesach WPK przemawia sposób przygotowania powierzchni kształtujących narzędzi, na których celowo nacina się rowki, zabezpieczające przed niepożądanym poślizgiem odkuwki. Ponadto, zgodnie z rezultatami badań [58] tarcie graniczne występuje w procesach obróbki plastycznej stali na gorąco (bez użycia smarów), przebiegających przy temperaturach powyżej  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ .

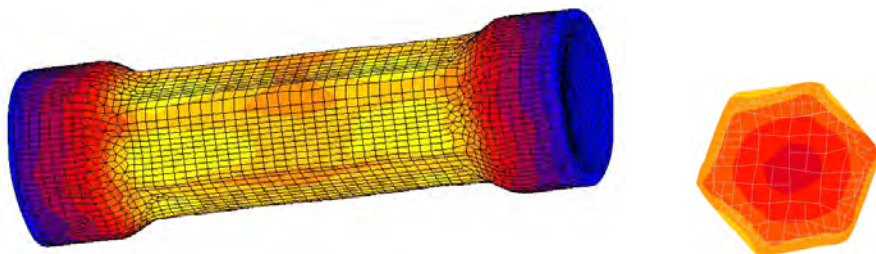
### 2.2.2. Przykładowe wyniki obliczeń

Zastosowanie metody elementów skończonych umożliwiło dokładne prześledzenie mechanizmu płynięcia materiału, wyznaczenie rozkładów odkształceń i naprężeń, obliczenie sił kształtowania oraz prognozowanie ograniczeń i defektów występujących w procesie WPK. Analizę dotyczącą kształtu odkuwek ograniczono głównie do określenia zarysu walcowanego stopnia kształtowego. Przykładowe kształty odkuwek uzyskane w ramach analizy MES przedstawiono na kolejnych rysunkach 2.8 ÷ 2.13.

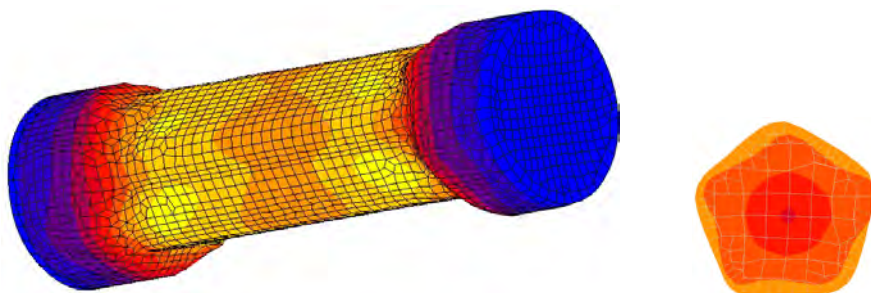
Wstępna analiza kształtu przekrojów poprzecznych uzyskanych z symulacji numerycznych wykazuje zadowalającą zbieżność kształtu otrzymanego z zakładanym do uzyskania, na etapie projektowania narzędzi i budowy modelu numerycznego procesu. Stwierdzono również występowanie zaokrągleń naroży odkuwek, które wynikają z kinematyki procesu (obtaczanie się odkuwki po narzędziu). Nie bez znaczenia w tym przypadku jest też rozmiar elementów zastosowanych w analizie MES.



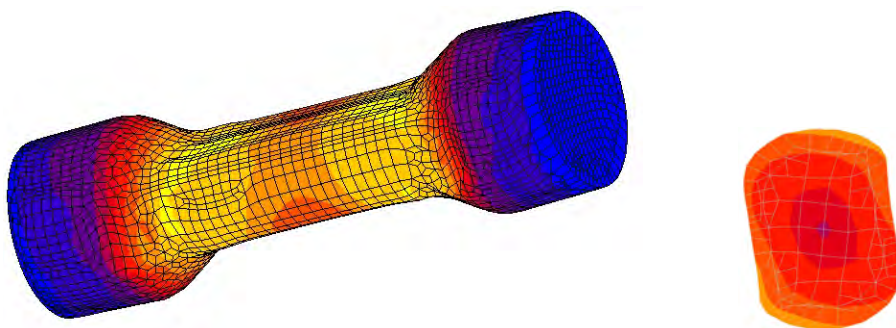
**Rys. 2.8.** Obliczony MES przykład kształtowania stopnia odkuwki, o przekroju poprzecznym w kształcie trójkąta, w procesie WPK przebiegającym przy:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  i  $R_p=55\%$



**Rys. 2.9.** Obliczony MES przykład kształtowania stopnia odkuwki, o przekroju poprzecznym w kształcie sześciokąta, w procesie WPK przebiegającym przy:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  i  $R_p=55\%$



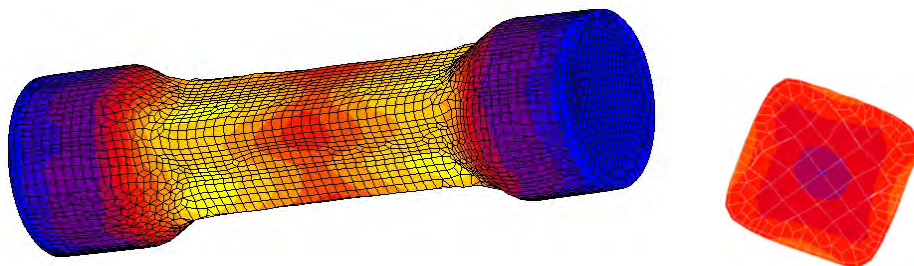
**Rys. 2.10.** Obliczony MES przykład kształtowania stopnia odkuwki, o przekroju poprzecznym w kształcie pięciokąta, w procesie WPK przebiegającym przy:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  i  $R_p=55\%$



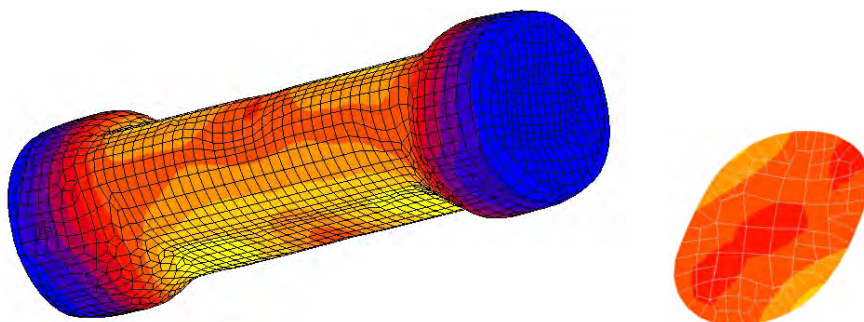
**Rys. 2.11.** Obliczony MES przykład kształtowania stopnia odkuwki, o przekroju poprzecznym z dwoma ścięciami, w procesie WPK przebiegającym przy:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  i  $R_p=55\%$

Przykładowy przebieg płynięcia metalu przedstawiony na rys. 2.14, dotyczy walcowania na gorąco odkuwki ze stali C45 (o przekroju prostokątnym)

przebiegającego przy następujących parametrach procesu:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $R_p = 55\%$ ,  $d_o = 30$  mm,  $m = 1$ ,  $T = 1150$  °C.



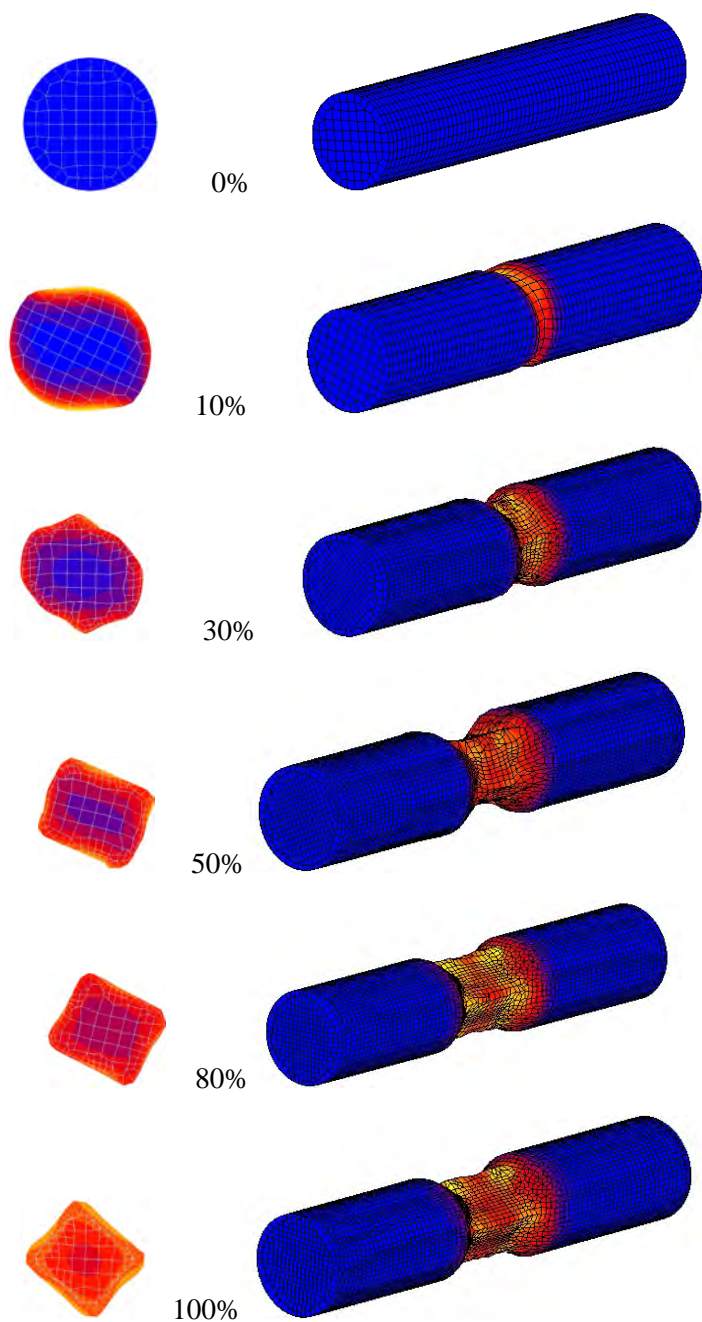
**Rys. 2.12.** Obliczony MES przykład kształtowania stopnia odkuwki, o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu, w procesie WPK przebiegającym przy:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  i  $R_p=55\%$



**Rys. 2.13.** Obliczony MES przykład kształtowania stopnia odkuwki, o przekroju poprzecznym w kształcie owalu, w procesie WPK przebiegającym przy:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  i  $R_p=55\%$

W początkowym stadium wcinania kliny ustalają pozycję materiału wprawiając go w ruch obrotowy w kierunku zgodnym z kierunkiem przesuwu narzędzi. Następnie po wcięciu się klinów w metal na odpowiednią głębokość rozpoczyna się właściwe kształtowanie, w trakcie którego materiał jest obracany wokół własnej osi zgodnie z kierunkiem przesuwu narzędzi. Kliny wcinając się w metal kształtują na jego obwodzie rowek klinowy. Przekrój poprzeczny w strefie odkształcenia ulega wówczas silnej owalizacji. W dalszej fazie procesu kształtowany jest przekrój prostokątny, przy czym obserwuje się wyraźne zaokrąglenie naroży. Taki kształt przekroju poprzecznego związany jest z kinematyką ruchu narzędzia i wyrobu (powstaje on w wyniku obtaczania odkuwki po klinie). W następnych fazach procesu ma miejsce spiralne rozszerzenie redukcji przekroju na całą długość walcowanego odcinka i uzyskanieżądanego kształtu przekroju poprzecznego odkuwki.





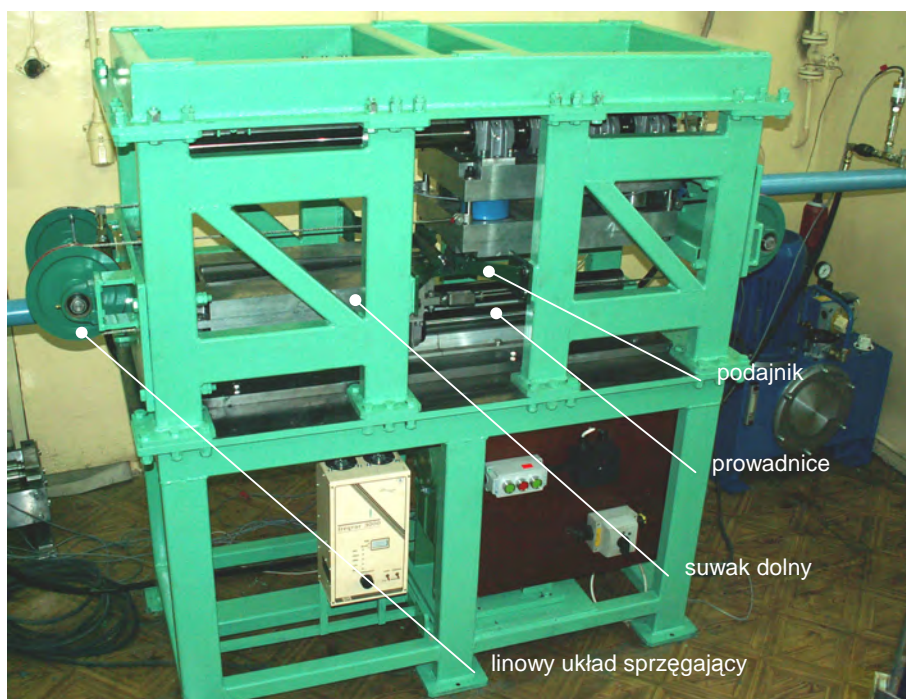
**Rys. 2.14.** Progresja kształtu odkuwki ze stopniem kwadratowym (obliczona MES) w procesie WPK odkuwki ze stopniem prostokątnym, przy:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $R_p = 55\%$ ,  $d_o = 30$  mm,  $m = 1$ ,  $T = 1150^\circ\text{C}$  oraz przy zaawansowaniu procesu podanym na rysunku



## 2.3. Badania doświadczalne

### 2.3.1. Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne wykonano wykorzystując płasko-klinową walcarkę laboratoryjną LUW-2 (rys. 2.15), znajdującą się na wyposażeniu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.



**Rys. 2.15.** Walcarka laboratoryjna LUW-2, pracująca w układzie dwóch przemieszczających się przeciwnie klinów płaskich

Agregat LUW – 2 zbudowany jest z: klatki roboczej, suwaka dolnego, suwaka górnego, zespołu napędowego oraz korpusu. Całość wykonana jest jako konstrukcja skręcana, a klatka robocza jest konstrukcją ażurową składającą się z dwóch płyt połączonych za pomocą ośmiu kolumn usztywnionych poprzeczkami. Do płyt przytwierdzono prowadnice z wałkami, po których przesuwają się suwaki łożyskowane w ośmiu łożyskach każdy. Suwak górny zbudowany jest z płyt górnej i dolnej połączonych śrubami łącznikowymi. Łożyska przykręcone są do płyty dolnej, zaś narzędzia klinowe do płyty górnej. Pomiedzy płytami umieszczone są dwa czujniki nacisku typu FT – 5304, które służą do pomiaru siły rozporowej. Suwak dolny ma budowę jednolitą.

Ruch suwaków realizowany jest za pomocą dwóch siłowników hydraulicznych, o skoku maksymalnym 630 mm. Siłowniki napędzane są zasilaczem hydraulicznym, wyposażonym w silnik elektryczny o mocy 11 kW. Maksymalne ciśnienie robocze w układzie hydraulicznym wynosi 20 MPa. Przy tej wartości ciśnienia uzyskiwana jest maksymalna siła wciskająca klin, wynosząca 39 kN dla każdego z siłowników. W celu pomiaru wartości siły stycznej (wciskającej kliny w materiał), jeden z siłowników zaopatrzone w dwa przetworniki ciśnienia typu PT – 5261, dzięki którym można w sposób pośredni wyznaczyć wartość tej siły.

Walcarkę wyposażono w specjalny cyfrowy układ pomiarowy [29]. Układ ten umożliwia rejestrację, w trakcie procesu WPK, następujących parametrów:

- prędkości liniowej klinów;
- prędkości obrotowej wyrobu walcowanego;
- siły stycznej;
- siły rozporowej.

Pomiar wszystkich parametrów jest zsynchronizowany z ruchem klinów i jest dokonywany co 1 mm przemieszczania się narzędzi (suwaków).

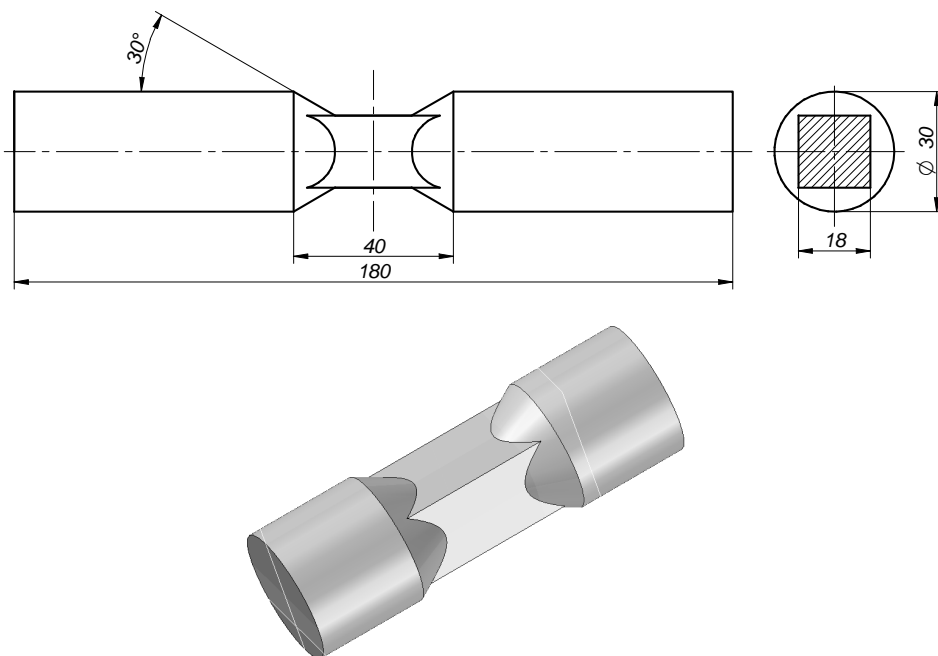
Próbki do walcowania nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym (rys. 2.16) do temperatury kształtowania wynoszącej 1150 °C.



**Rys. 2.16.** Piec elektryczny komorowy, wykorzystany do nagrzewania próbek w trakcie badań doświadczalnych, dotyczących kształtowania (metodą WPK) wyrobów o przekroju poprzecznym różnym od kołowego

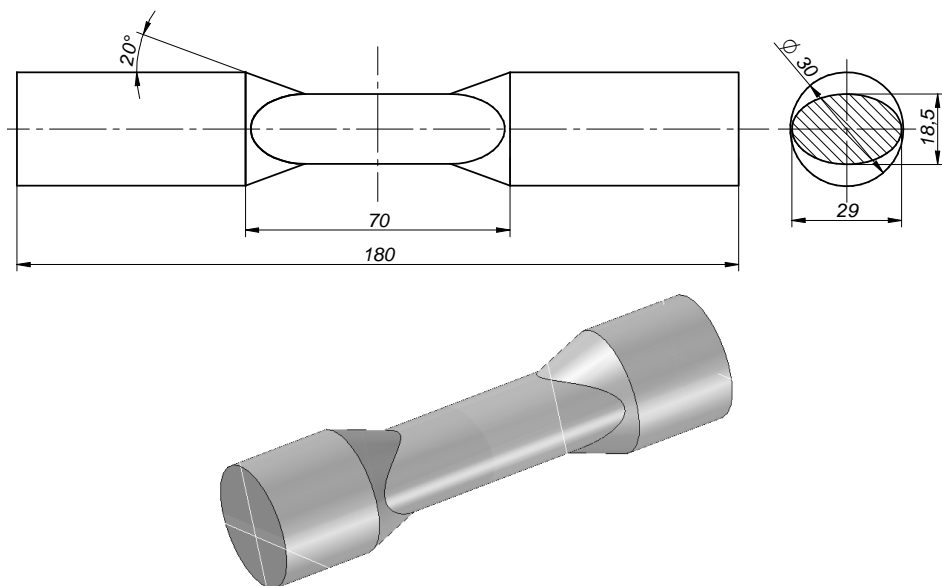
### 2.3.2. Narzędzia klinowe

Badaniami doświadczalnymi, ze względu na duże koszty wykonania narzędzi, objęto tylko kształtowanie odkuwek mających stopnie o przekrojach poprzecznych kwadratowych i owalnych. Odkuwkę ze stopniem o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu (rys. 2.17) walcowano przy następujących parametrach: redukcja przekroju  $R_p = 55\%$ ; kąt kształtowania  $\alpha = 30^\circ$ ; kąt rozwarcia klina  $\beta = 7^\circ$ ; długość walcowania  $2L = 40\text{ mm}$ ; prędkość przemieszczania się klinów  $v = 0,1\text{ m/s}$ . Natomiast proces WPK odkuwki ze stopniem o przekroju poprzecznym owalnym (rys. 2.18) przebiegał przy następujących parametrach: redukcja przekroju  $R_p = 40\%$ ; kąt kształtowania  $\alpha = 20^\circ$ ; kąt rozwarcia klina  $\beta = 7^\circ$ ; długość walcowania  $2L = 70\text{ mm}$ ; prędkość przemieszczania się klinów  $v = 0,1\text{ m/s}$ .

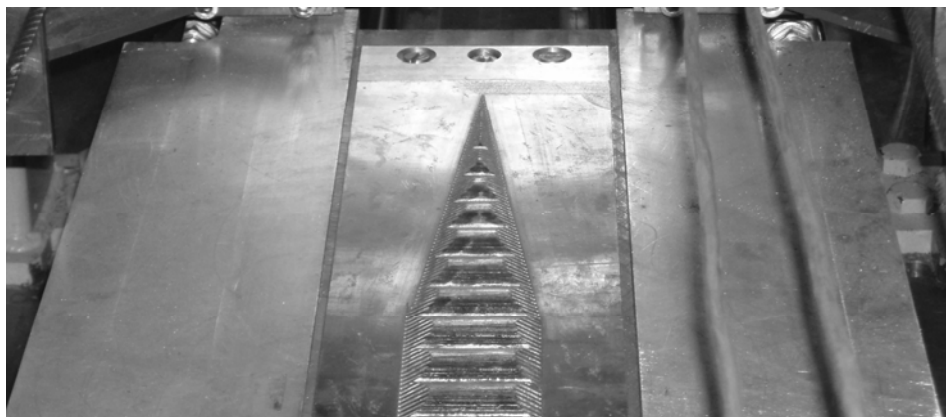


**Rys. 2.17.** Rysunek odkuwki ze stopniem o przekroju poprzecznym kwadratowym, kształtowanej w próbach laboratoryjnych

Narzędzia wykorzystane do walcowania odkuwek pokazanych na rys. 2.17 i 2.18 opracowano w sposób opisany w rozdziale 2.1. Narzędzia te, przedstawione na kolejnych rysunkach 2.19 i 2.20, wykonano ze stali w gatunku C45. Na powierzchniach bocznych klinów nacięto rowki technologiczne, których zadaniem jest zwiększenie czynnika tarcia do wartości granicznej  $m=1$ , a w konsekwencji zapewnienie stabilnego przebiegu procesu kształtowania.



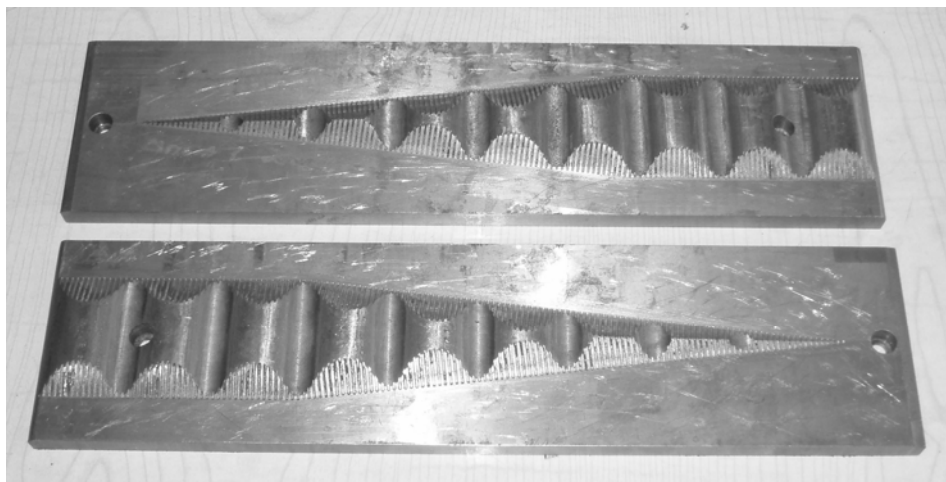
**Rys. 2.18.** Rysunek odkuwki ze stopniem o przekroju poprzecznym owalnym, kształtowanej w ramach prób laboratoryjnych



**Rys. 2.19.** Narzędzie klinowe do walcowania odkuwek ze stopniem o przekroju poprzecznym kwadratowym, zamontowane w suwaku dolnym walcarki LUW-2

### 2.3.3. Przebieg badań

W badaniach doświadczalnych wykorzystano próbki ze stali w gatunku C45, pełne i drażone, o średnicy zewnętrznej równej  $\varnothing 30$  mm. Cechą charakterystyczną próbek była ich jednakowa długość wynosząca 180 mm. Przykłady próbek zastosowanych w badaniach doświadczalnych pokazano na rysunku 2.21.



**Rys. 2.20.** Narzędzia klinowe do walcowania odkuwek ze stopniem o przekroju poprzecznym owalnym

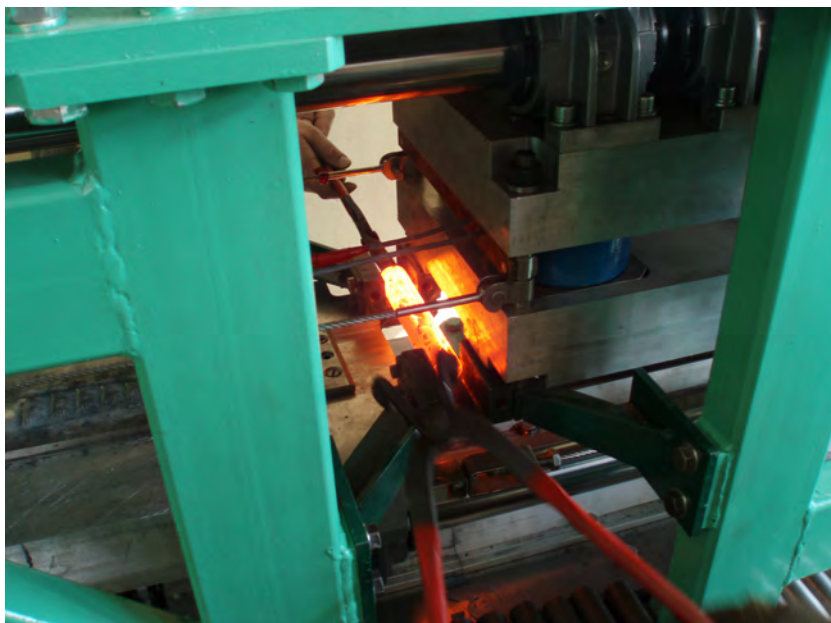


**Rys. 2.21.** próbki ze stali w gatunku C45 wykorzystane w badaniach doświadczalnych

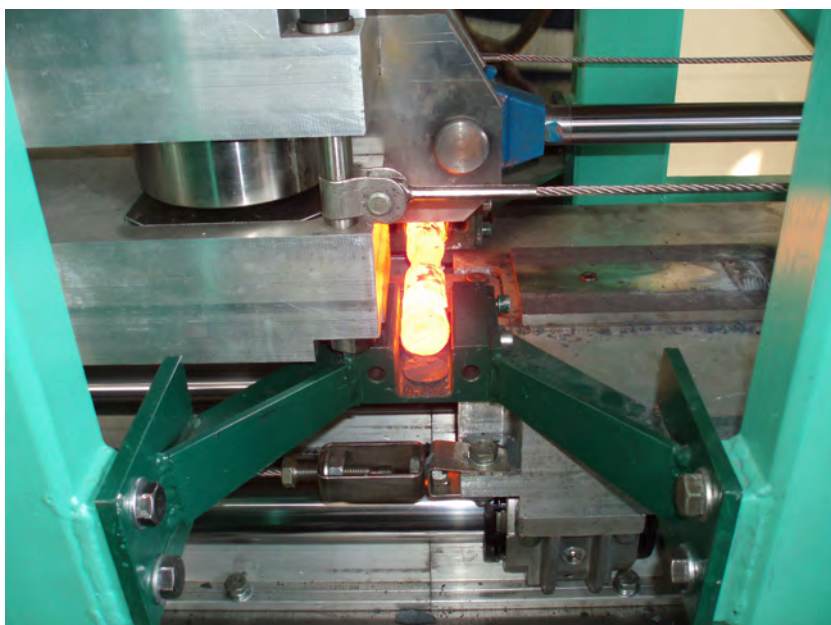
Badania doświadczalne realizowano według następującego schematu:

- ❑ nagrzewanie próbek do temperatury 1150 °C w piecu elektrycznym oporowym;
- ❑ umieszczenie próbki (wsadu) w podajniku walcarki (rys. 2.22);
- ❑ kształtowanie odkuwki za pomocą dwóch klinów, poruszających się przeciwbieżnie z prędkością 0,1 m/s każdy (rys. 2.23);
- ❑ wyjęcie odkuwki z podajnika (rys. 2.25);
- ❑ wycofanie klinów do położenia początkowego.





**Rys. 2.22.** Umieszczanie, nagrzanego do temperatury kształtowania, wsadu walcowego w podajniku walcarki laboratoryjnej LUW-2

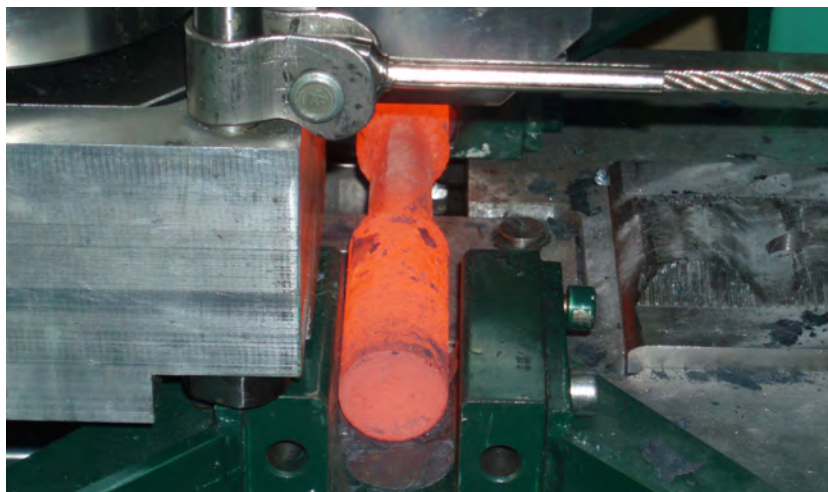


**Rys. 2.23.** Odkuwka bezpośrednio po procesie walcowania znajduje się nadal w podajniku walcarki



**Rys. 2.24.** Odkuwka ze stopniem o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu wyjęta z podajnika walcarki LUW-2

Postępując w opisany powyżej sposób ukształtowano z wsadu pełnego po 5 odkuwek ze stopniami o przekroju poprzecznym kwadratowym (rys. 2.24) i owalnym (rys. 2.25). Ponadto zbadano możliwość zastosowania w takim procesie wsadu drażonego. We wszystkich przypadkach rejestrowano siły kształtowania.



**Rys. 2.25.** Odkuwka ze stopniem o przekroju poprzecznym w kształcie owalu znajdująca się w podajniku walcarki LUW-2

Otrzymane w ten sposób odkuwki (po ostygnięciu) oczyszczono ze zgorzeliny, a następnie zmierzono ich wymiary charakterystyczne. Część odkuwek przecięto (prostopadle do ich osi wzdłużnej) celem wyznaczenia dokładnego zarysu ich przekroju poprzecznego. Otrzymane w ten sposób próbki pokazano na rys. 2.26.



**Rys. 2.26.** Odkuwki ze stopniami kształtowymi (owalnym i kwadratowym) otrzymane w laboratoryjnych próbach walcowania

Jak już wspomniano w trakcie prób odwalcowano również kilka próbek z wsadu drążonego. Jednakże jakość wykonania tych odkuwek (rys. 2.27) była gorsza od uzyskiwanej w procesie walcowania z wsadu pełnego (powstawały wgniecenia ścianki w miejscu początkowego wcinania klina, tj. w środku odkuwki). W związku z tym zaniechano dalszych badań w zakresie kształtowania przedmiotowych odkuwek z wsadów drążonych.

## 2.4. Rezultaty z badań

### 2.4.1. Dokładność geometryczna odkuwek

W ramach prac badawczych przeanalizowano kształty i wymiary odkuwek otrzymanych w procesie WPK zrealizowanym w warunkach laboratoryjnych. Szczegółowej analizie poddano kształty przekroi poprzecznych (i ich wymiary) uzyskane z symulacji numerycznej MES oraz z badań doświadczalnych i odniesiono je do zarysu teoretycznego, założonego do uzyskania.

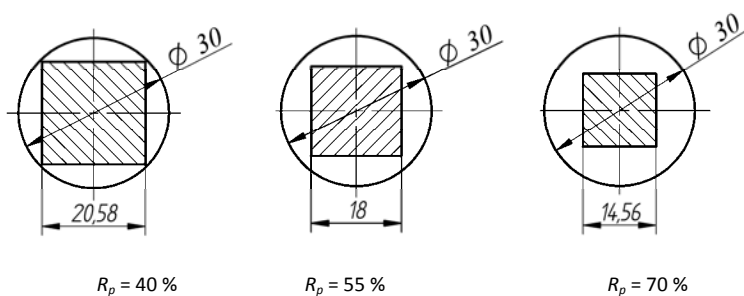




**Rys. 2.27.** Odkuwki o przekroju poprzecznym kwadratowym, odwalcowane z wsadu drążonego

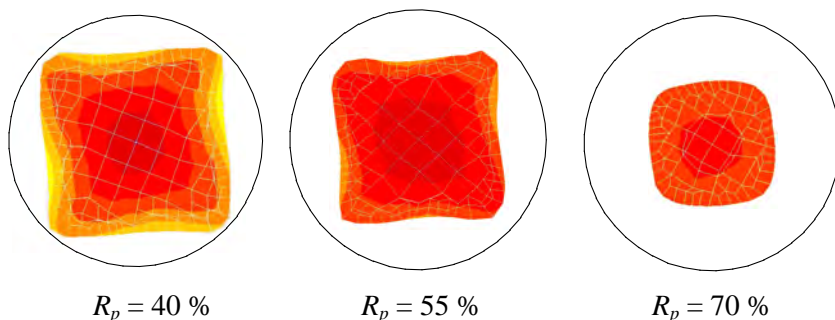
### Odkuwki ze stopniami o przekroju poprzecznym kwadratowym

Na rysunku 2.28 przedstawiono wymiary odkuwek o przekroju poprzecznym kwadratowym, odpowiadające trzem różnym redukcjom przekroju  $R_p$ , zakładane do uzyskania w procesie WPK. Dla każdego z podanych przypadków zbudowano po dziewięć modeli geometrycznych (w zależności od kątów  $\alpha$  i  $\beta$ ), które zastosowano w analizie MES.



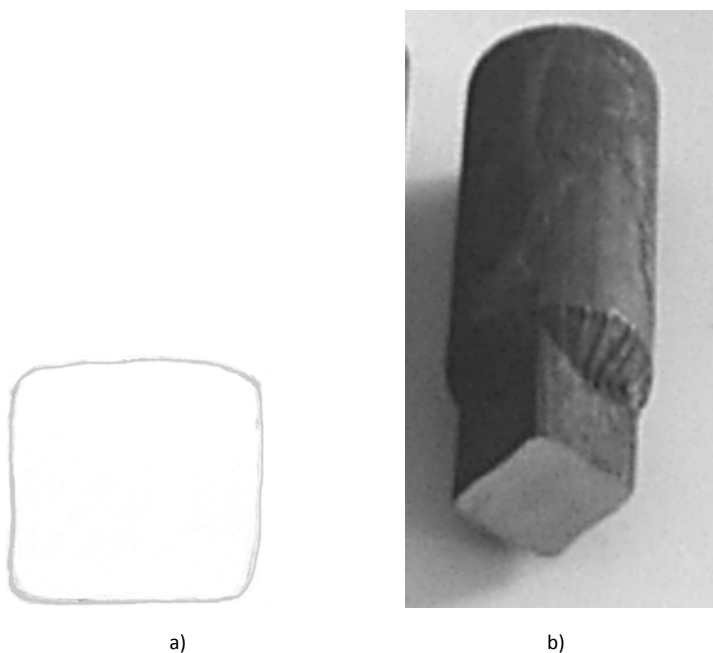
**Rys. 2.28.** Przyjęte w analizie wymiary przekroi poprzecznych odkuwek ze stopniem o przekroju poprzecznym kwadratowym, w zależności od redukcji  $R_p$

Na podstawie obliczeń numerycznych prognozowano kształty przekroju poprzecznego odkuwki po procesie walcowania. Przykładowe przekroje, otrzymane dla procesu WPK przebiegającego przy  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 7^\circ$ , pokazano na rysunku 2.29.



**Rys. 2.29.** Przekroje poprzeczne odkuwek (obliczone MES) uzyskiwane w procesie WPK przy  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$  i redukcji przekroju  $R_p$  podanej na rysunku

W ramach badań laboratoryjnych odwalcowano odkuwki (ze stali i ołowiu), posiadające stopień o przekroju poprzecznym kwadratowym. Kształt uzyskanego w ramach eksperymentu stopnia odkuwki stalowej przedstawiono na rysunku 2.30. Natomiast w tabeli 2.1 zestawiono wymiary otrzymane dla kilku przekroi poprzecznych odwalcowanego stopnia odkuwki.



**Rys. 2.30.** Zarys przekroju poprzecznego stopnia odkuwki otrzymanej w próbach laboratoryjnych a) oraz fotografia wyrobu uzyskanego w próbach walcowania b)

Analiza kształtu wyznaczonego numerycznie przekroju poprzecznego odkuwki wykazuje występowanie zaokrągleń naroży. Związane jest to przede wszystkim ze specyfiką symulacji numerycznej opartej o MES, w której przekrój dzielony jest na skończoną liczbę elementów. Wielkość tych elementów determinuje wartość promienia zaokrąglenia naroży otrzymanej odkuwki. Uzyskanie większych dokładności wiąże się z podziałem objętości odkuwki na mniejsze elementy, co znacznie zwiększa ich liczbę i znacząco wydłuża czas obliczeń. Przykładowo przy wykorzystaniu komputera osobistego PC z procesorem 2,8 GHz czas symulacji jednego przypadku wynosił od 24 ÷ 72 godzin. Zwiększenie liczby elementów o 50 % wydłużało ten czas nawet kilkakrotnie. Zaokrąglenie naroży związane jest również ze specyfiką procesu walcowania i kinematyką płynięcia metalu. Podczas kształtowania odkuwka toczy się po powierzchni roboczej narzędzia. W trakcie wyjścia z wrębu klina jej krawędź może ulec zaokrągleniu, co widoczne jest w odkuwce uzyskanej doświadczalnie (rys. 2.30).

Z analizy przekroju poprzecznego odkuwek odwalcowanych w próbach laboratoryjnych wynika, że kształtowany stopień odkuwki ulega niewielkiemu skręceniu w kierunku ruchu narzędzi. Spowodowane jest to prawdopodobnie natarciem narzędzi (wywołującym obrót) na płaskie powierzchnie kształtowanego stopnia odkuwki. Inną przyczyną takiego skręcenia przekroju, w stosunku do zarysu teoretycznego, może być niespełnienie założenia dotyczącego stałości promienia tocznego podczas walcowania (który przyjmowano za równy promieniowi wsadu). W rzeczywistości promień toczny odkuwki ulega ciągłym zmianom w zależności od kąta obrotu odkuwki. W efekcie występuje poślizg, który jest różny od założonego na etapie projektowania klinów profilowych.

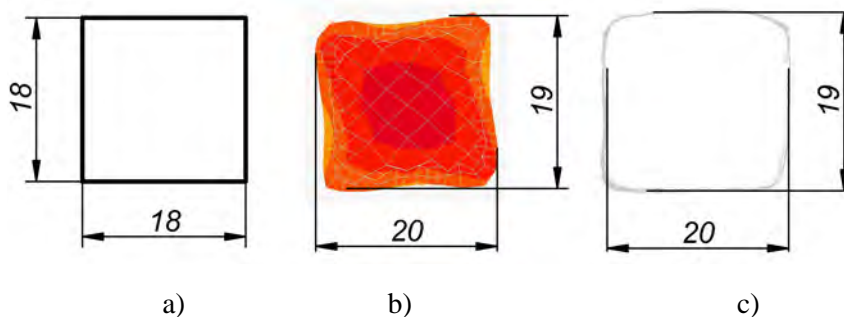
**Tab. 2.1.** Wymiary (w mm) przekroju poprzecznego odkuwek stalowych ze stopniem kwadratowym otrzymane w próbach laboratoryjnych

Lp.	Próbka I		Próbka II		Próbka III	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	19,2	20,5	19,8	21	19,1	20
2	19,3	20,4	19,5	20,5	19,3	20,2
3	19,5	20,5	19,4	20,2	19,5	20,5
4	19,6	20,5	19,6	20,5	19,6	20,5
5	19,4	20,4	19,3	20,6	19,6	20,4
6	19,6	20,4	19,2	20	19,6	20,2

Jednak należy zaznaczyć, że wymiary otrzymanego wyrobu mieszczą się w tolerancjach odkuwek przeznaczonych do dalszej obróbki mechanicznej.

Różnice wymiarowe odkuwek otrzymanych z symulacji numerycznych oraz prób doświadczalnych mogą być spowodowane również odkształceniem narzędzi i maszyny wykorzystanej podczas walcowania. W modelu numerycznym zakładano doskonale sztywne narzędzia, natomiast w procesie rzeczywistym występują odkształcenia sprężyste zarówno narzędzi jak i korpusu walcarki, będące następstwem działania sił kształtowania.

Na rysunku 2.31 zestawiono następujące przekroje poprzeczne odkuwki: zakładany do uzyskania, prognozowany MES oraz wyznaczony eksperymentalnie. Natomiast na rysunku 2.32 pokazano poszczególne zarysy przekroju poprzecznego walcowanego stopnia odkuwki naniesione na siebie. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, iż pole przekroju poprzecznego odkuwki jest nieznacznie większe od zakładanego do uzyskania pola kwadratu, który mieści się w zarysach obliczonym i wyznaczonym eksperymentalnie.



**Rys. 2.31.** Zestawienie kształtów i wymiarów przekroju poprzecznego odkuwki ze stopniem o przekroju kwadratowym: a) założonym do uzyskania; b) obliczonym MES; c) otrzymanym w próbach laboratoryjnych



**Rys. 2.32.** Porównanie otrzymanych zarysów przekroju poprzecznego odkuwki ze stopniem kwadratowym

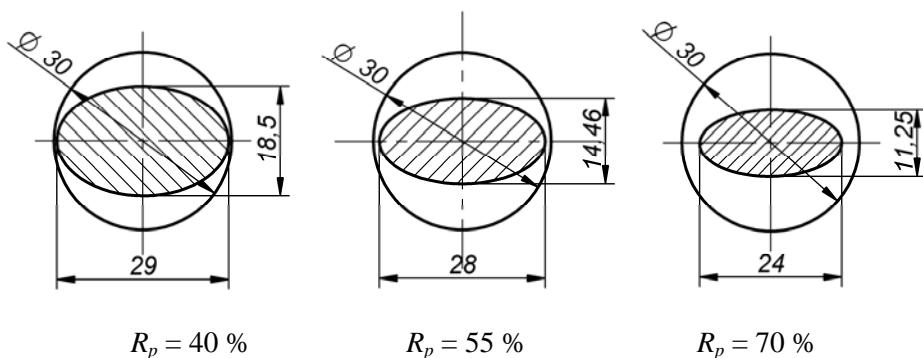
Zatem stosując metody obróbki skrawaniem z powodzeniem można będzie skorygować odwalcowany stopień odkuwki i nadać mu pożądaną kształt.

### Odkuwki ze stopniami o przekroju poprzecznym owalnym

Wyroby wydłużone posiadające stopnie o przekroju poprzecznym owalnym znajdują zastosowanie jako różnego rodzaju przedkuwki, które w dalszych operacjach są kute na prasach kuźniczych. Stosowanie kształtu owalnego ma za zadanie: zmniejszenie liczby operacji kuźniczych, ułatwienie wypełnienia wykroju w matrycach oraz zmniejszenie siły kształtowania. W związku z podanym zastosowaniem wyrobów dokładne odwzorowanie kształtu przekroju poprzecznego nie jest tutaj aż tak ważne jak w przypadku omawianym uprzednio.

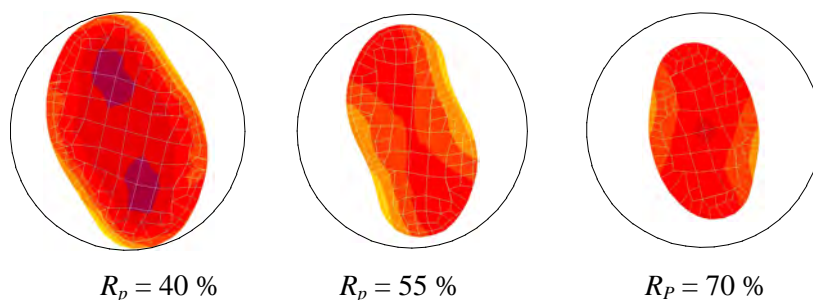
Wymiary i kształty przekroi poprzecznych odkuwek, odpowiadające różnym redukcjom  $R_p$ , analizowane w ramach obliczeń przedstawiono na rysunku 2.33. Każdy z podanych przypadków WPK analizowano kilkakrotnie, stosując różne wartości podstawowych parametrów procesu, tj.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_p$ . Przykładowe, obliczone numerycznie kształty odkuwek pokazano na rysunku 2.34.

Próby walcowania odkuwek ze stopniami owalnymi wykonano również w warunkach laboratoryjnych, kształtując odkuwki z ołowiu w gatunku Pb1 (w temperaturze otoczenia) oraz ze stali w gatunku C45 (przy temperaturze 1150 °C). Jedną z odkuwek otrzymanych w trakcie badań laboratoryjnych pokazano na rysunku 2.35, na którym przedstawiono również zarys przekroju poprzecznego uzyskanego stopnia.

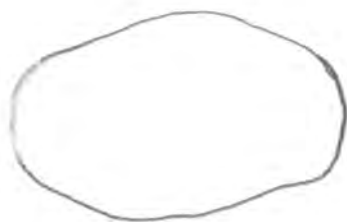


**Rys. 2.33.** Analizowane w ramach badań WPK odkuwki ze stopniem o owalnym przekroju poprzecznym, wraz z redukcją  $R_p$ , kształtowane przy:  $\alpha = 20^\circ$  oraz  $\beta = 7^\circ$

Natomiast w tabeli 2.2 zestawiono wymiary przekroi poprzecznych trzech odkuwek, na których odwalcowano stopnie o przekroju poprzecznym w kształcie owalu.



**Rys. 2.34.** Prognozowane MES przekroje poprzeczne odkuwek uzyskiwanych w procesach WPK przy:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$  i redukcji  $R_p$  podanej na rysunku



a)



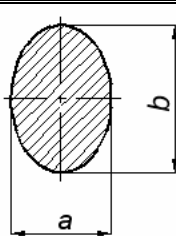
b)

**Rys. 2.35.** Zarys przekroju poprzecznego (a) oraz fotografia odkuwki otrzymanej w próbie walcowania (b)

Analizując kształt przekroju poprzecznego odkuwki otrzymanej z obliczeń MES i prób laboratoryjnych, zauważa się znaczne skrócenie tego przekroju (w kierunku przesuwu narzędzi) w odniesieniu do teoretycznego zarysu wyrobu. Taki kształt odkuwki, podobnie jak dla wyrobów ze stopniami kwadratowymi, jest wynikiem kinematyki płynięcia metalu. Narzędzia nacierając na powierzchnie boczne odkuwki powodują jej skrócenie i deformację. Skrócenie przekroju

odkuwki może być również związane ze znacznymi zmianami stopnia gniotu (od wartości minimalnej  $\delta_{min}$  wzdłuż większego odcinka osiowego owalu, do wartości maksymalnych  $\delta_{max}$  wzdłuż mniejszego odcinka osiowego owalu).

**Tab. 2.2.** Wymiary (w mm) przekroju poprzecznego odkuwek stalowych ze stopniem owalnym otrzymane w próbach laboratoryjnych



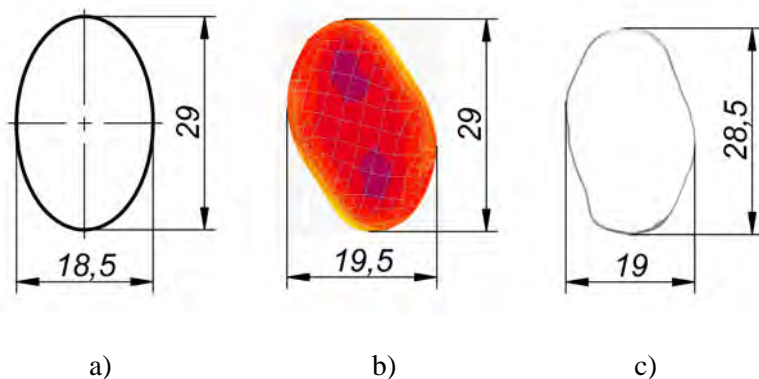
The diagram shows an oval cross-section with a horizontal diameter labeled 'a' and a vertical diameter labeled 'b'. The oval is filled with diagonal hatching lines.

Lp.	Próbka I		Próbka II		Próbka III	
	a	b	a	b	a	b
1	19,7	28,5	20,0	29,0	19,8	28,5
2	19,6	28,8	20,2	28,7	19,7	28,8
3	19,5	28,8	19,9	28,5	19,6	29,0
4	19,6	28,5	20,0	28,7	19,7	28,5
5	19,6	28,5	20,0	28,5	19,8	28,5
6	19,7	28,5	20,9	28,5	20,0	28,5

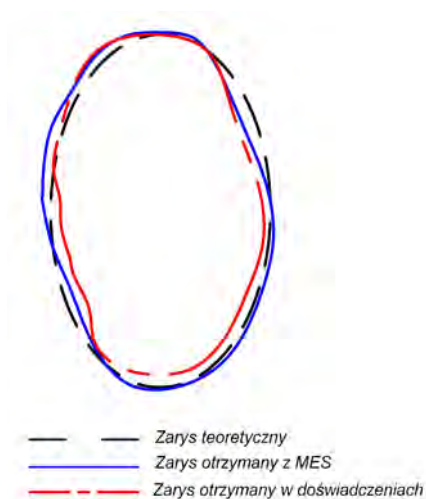
Tak duże zmiany gniotu pociągają za sobą znaczne zmiany promienia tocznego. Przyczynia się to do powstawania bardzo dużych poślizgów pomiędzy kształtowaną odkuwką a klinami. Natomiast wyznaczając zarys profili powierzchni roboczej klina przyjęto, że odkuwka toczy się jednostajnie, a promień toczny równy jest promieniowi materiału wsadowego.

Należy jednak zauważyć, że w przypadku kształtowania przedkówek, występujące skręcenie nie ma istotnego wpływu na dalszy przebieg procesu technologicznego oraz dokładność kutego wyrobu końcowego. Podobnie jak w poprzednim przypadku zauważa się różnice między wymiarami odkuwek otrzymanymi z symulacji numerycznych i prób laboratoryjnych a założonymi do użycia, co pokazano na rysunkach 2.36 i 2.37.

Przyczyny odnotowanych różnic są identyczne jak w przypadku odkuwek ze stopniami kwadratowymi i zostały omówione uprzednio. Należy jedynie zaznaczyć, że przy walcowaniu stopni owalnych występują większe wahania gniotu, co powoduje zintensyfikowanie się podanych błędów kształtu.



**Rys. 2.36.** Zestawienie kształtów i wymiarów przekroju poprzecznego odkuwki ze stopniem owalnym: a) założonym do uzyskania; b) obliczonym MES; c) otrzymanym w próbach laboratoryjnych



**Rys. 2.37.** Porównanie zarysów przekroju poprzecznego odkuwki ze stopniem owalnym

### Odkuwki ze stopniami o innych kształtach przekroju poprzecznego

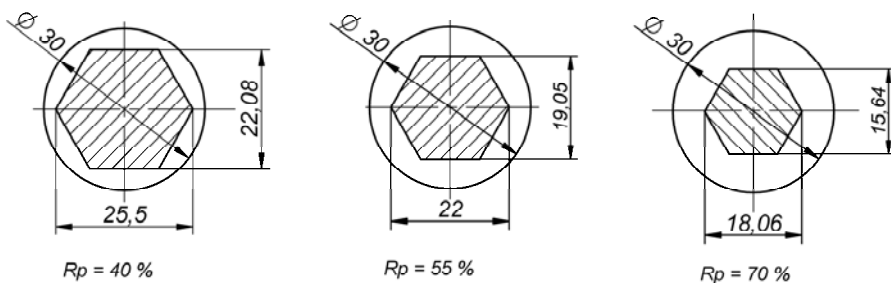
Ze względu na znaczne koszty narzędzi, proces walcowania odkuwek ze stopniami o przekroju poprzecznym w kształcie:

- sześciokąta,
- trójkąta,
- pięciokąta,
- koła z płaskimi ścięciami,

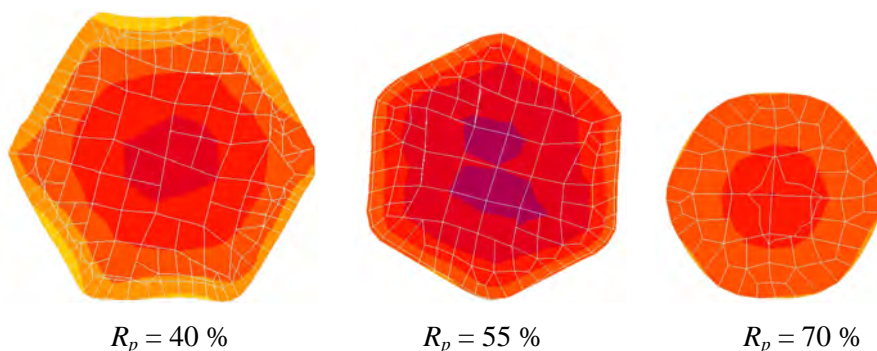
przeanalizowano jedynie numerycznie, stosując MES.



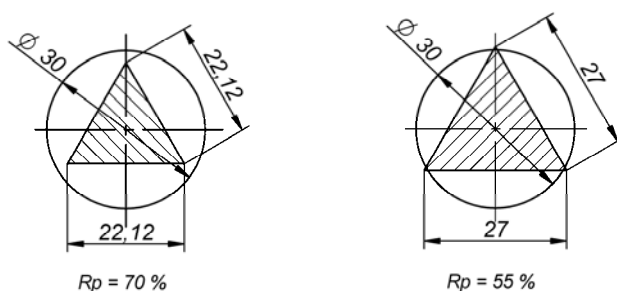
Obliczone numerycznie, dla wymienionych powyżej przypadków, zarysy przekroju poprzecznego w zestawieniu z kształtem zakładanym do wykonania przedstawiono na kolejnych rysunkach 2.38 ÷ 2.45.



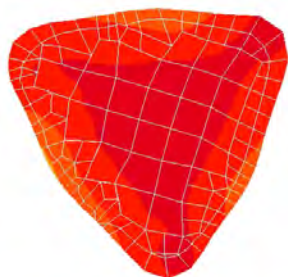
**Rys. 2.38.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami sześciokątnymi analizowane w ramach obliczeń MES



**Rys. 2.39.** Przekroje poprzeczne odkuwek otrzymane z symulacji MES procesów WPK przy:  $2L = 60$  mm;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\beta = 7^\circ$ ;  $R_p = 40\%$ ,  $55\%$ ,  $70\%$ ,  $T = 1150^\circ\text{C}$ , materiał – stal C45

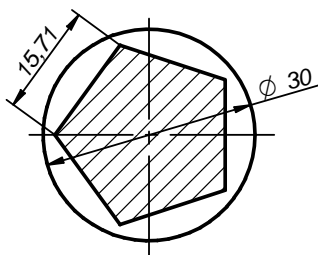
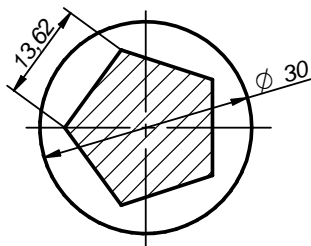


**Rys. 2.40.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami w kształcie trójkąta równobocznego, analizowane w ramach obliczeń MES

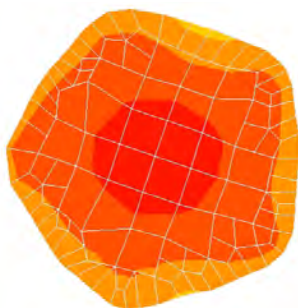
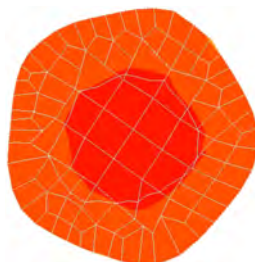

 $R_p = 55 \%$ 

 $R_p = 70 \%$ 

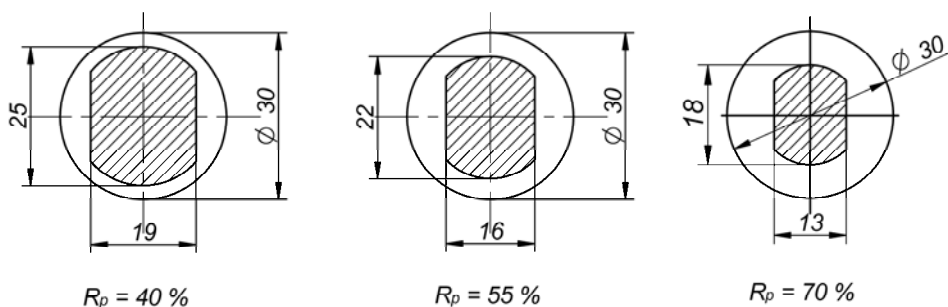
**Rys. 2.41.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami o przekroju trójkąta równobocznego otrzymane z symulacji MES procesów WPK przy:  $2L = 60$  mm;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\beta = 7^\circ$ ;  $R_p = 55 \%$ ,  $70 \%$ ,  $T = 1150^\circ\text{C}$ , materiał – stal C45


 $R_p = 40 \%$ 

 $R_p = 55 \%$ 

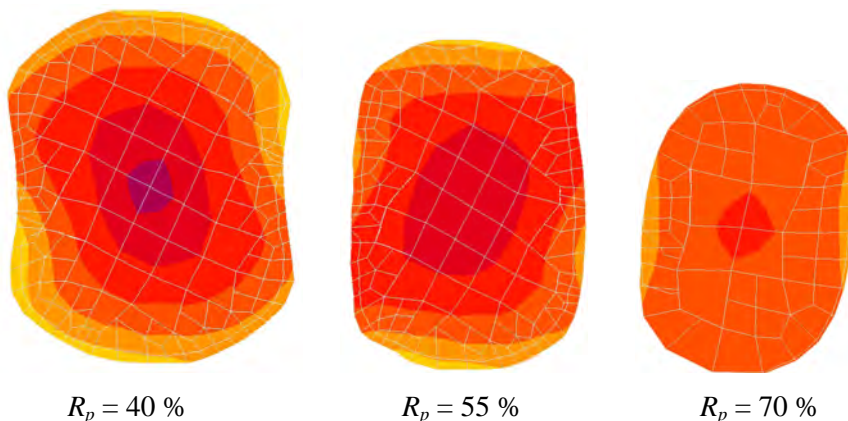
**Rys. 2.42.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami o zarysie pięciokąta analizowane z zastosowaniem MES


 $R_p = 40 \%$ 

 $R_p = 55 \%$ 

**Rys. 2.43.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami o przekroju pięciokąta otrzymane z symulacji MES procesu WPK, przy:  $2L = 60$  mm;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\beta = 7^\circ$ ;  $R_p = 40 \%$ ,  $55 \%$ ,  $T = 1150^\circ\text{C}$ , materiał – stal C45



**Rys. 2.44.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami posiadającymi płaskie ścięcia pod klucz, uwzględnione w analizie MES



**Rys. 2.45.** Przekroje poprzeczne odkuwek ze stopniami mającymi płaskie ścięcia, otrzymane z symulacji MES dla procesów WPK przy:  $2L = 60$  mm;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\beta = 7^\circ$ ;  $R_p = 40\%$ ,  $55\%$ ,  $70\%$ ,  $T = 1150^\circ\text{C}$ ; materiał – stal C45

Podobnie jak we wcześniej opisanych przypadkach (walcowanie na kwadrat i owal) również w przypadku innych kształtów przekroju poprzecznego odnotowano tendencję do zaokrąglania naroży. Stwierdzono również występowanie niewielkich odchylek wymiarów w stosunku do zakładanych do uzyskania. Przyczyny występowania tych niezgodności zostały opisane przy omawianiu procesów walcowania odkuwek ze stopniami kwadratowymi i owalnymi. Otrzymane wyniki badań potwierdzają możliwości kształtowania metodą WPK wyrobów wydłużonych posiadających stopnie o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. Dokładność wymiarowa tych wyrobów mieści się na ogół w granicach tolerancji przyjmowanych dla odkuwek wykonywanych metodami obróbki plastycznej na gorąco, a wyniki niedokładności geometryczne i wymiarowe mogą być usuwane w drodze dalszej obróbki mechanicznej. Ponadto, za-

uważono, że zmniejszenie redukcji przekroju poprzecznego  $R_p$  sprzyja zwiększeniu dokładności walcowania stopnia kształtowego.

#### 2.4.2. Siły w procesach WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi

W ramach analizy korzystając z oprogramowania MES wyznaczono też rozkłady sił w procesie WPK. Niektóre rezultaty obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi z prób laboratoryjnych, podczas których rejestrowano zmiany sił kształtowania. W ten sposób dokonano oceny trafności zastosowanej metody symulacji w analizie procesów WPK odkuwek kształtowych.

#### Odkuwki ze stopniami o przekroju poprzecznym kwadratowym

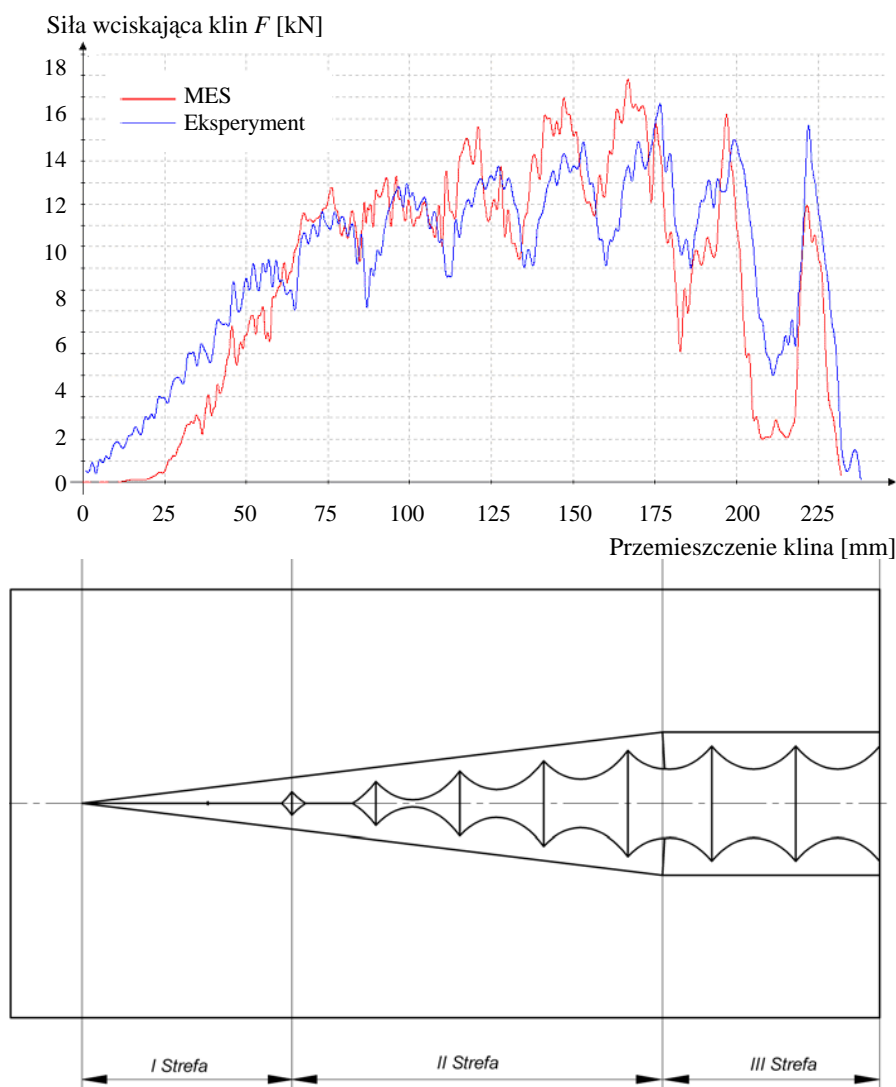
Porównanie sił wciskających klin, obliczonych MES i zmierzonych, dotyczące przypadku WPK przy  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $R_p = 55\%$  pokazano na rysunku 2.46. Analizując wykresy sił zamieszczone na tym rysunku stwierdza się, że różnice między siłami zmierzonymi i obliczonymi nie przekraczają 10%. Przy czym, wartości sił obliczone w oparciu o MES są większe od wartości wyznaczonych w trakcie prób doświadczalnych.

Na uwagę zasługuje podobny charakter przebiegu sił. W początkowej fazie procesu występuje prawie liniowy wzrost sił od zera do wartości, przy której zaczynają pojawiać się pierwsze wahania sił (strefa I – rys. 2.46). Taki rozkład sił jest charakterystyczny dla etapu wcinania się narzędzia w materiał i występuje w typowym procesie WPK odkuwek o przekroju kołowym. W tej fazie procesu ma miejsce ukształtowanie klinowego rowka na obwodzie odkuwki.

W następnej fazie (strefa II – rys. 2.46) występują wahania sił od wartości minimalnej do maksymalnej, a amplituda tych wahań rośnie w miarę zaawansowania procesu. Na tym etapie procesu siły zmieniają swoją wartość w dość dużych granicach, co związane jest z kształtowaniem zarysu kwadratowego na obwodzie odkuwki. Wówczas bowiem kształtowanie przebiega przy dużych zmianach wartości gniotu, towarzyszących zmianie kąta obrotu odkuwki. Tam gdzie gniot jest minimalny siły również są minimalne. Natomiast, gdy gniot jest największy to siły również przyjmują wartości maksymalne.

W ostatniej fazie (strefa III – rys. 2.46), tj. podczas kalibrowania, można również zauważyć wahania sił, które jednakże ulegają zmniejszeniu. W tym etapie procesu występuje wyrównanie nierówności kształtu odkuwki powstałych w fazach poprzednich. Nie ma tutaj już kształtowania odkuwki powierzchniami bocznymi narzędzi, co powoduje spadek wartości ekstremalnych sił.

Różnice jakie można zaobserwować pomiędzy siłami zmierzonymi i obliczonymi MES mogą wynikać z faktu, że kształtowany materiał dość intensywnie stygnie, a ilość ciepła oddawana do otoczenia i narzędzia może różnić się od ujętej w obliczeniach (zakładano tutaj stałe wartości współczynnika wymiany ciepła). Ponadto, własności materiałowe wsadu mogą odbiegać od zakładanych w obliczeniach.

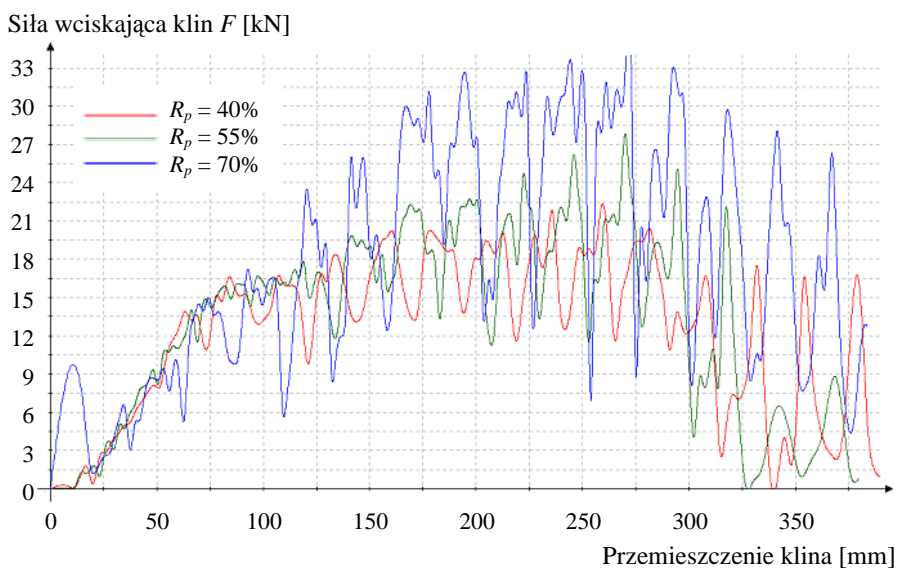


**Rys. 2.46.** Wykresy sił stycznych (wciskających klin) w procesie walcowania odkuwki o przekroju poprzecznym kwadratowym, uzyskane w analizie MES oraz w próbach laboratoryjnych przy:  $2L = 40$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $R_p = 55\%$

Zgodność sił obliczonych i zmierzonych uznaje się za dobrą zarówno pod względem ilościowym jak też jakościowym. Tym samym potwierdza się słuszność stosowania MES w analizie tak złożonych procesów obróbki plastycznej, jak WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi.

Na rysunku 2.47 porównano rozkłady sił stycznych obliczone dla procesów WPK odkuwek ze stopniami kwadratowymi, przebiegających przy różnych

wartościach redukcji przekroju poprzecznego  $R_p$ . Zaobserwowano, że zwiększenie redukcji przekroju poprzecznego powoduje wzrost wartości ekstremalnych sił kształtowania, które ulegają wahaniom od wartości minimalnej do maksymalnej (co wiąże się ze zmianami gniotu na obwodzie odkuwki). Przy redukcji przekroju poprzecznego wynoszącej  $R_p = 40\%$  siły wciskające narzędzia w kształtowany materiał osiągają wartości maksymalne rzędu  $F = 21$  kN, a amplituda wahań tych sił mieści się w przedziale około  $\Delta F = 7$  kN. Wraz ze wzrostem redukcji przekroju poprzecznego obserwuje się wzrost maksymalnych wartości sił stycznych, przy czym wartości minimalne tych sił prawie nie ulegają zmianie. Dla  $R_p = 55\%$  siła maksymalna osiąga wartość 27 kN, a amplituda wahań wzrasta do  $\Delta F = 14$  kN. Przy redukcji przekroju poprzecznego wynoszącej  $R_p = 70\%$ , siła maksymalna wynosi  $F = 34$  kN, natomiast amplituda wahań osiąga wartość  $\Delta F = 22$  kN (rys. 2.47). Opierając się na wynikach otrzymanych z przeprowadzonej analizy WPK odkuwek ze stopniami kwadratowymi przy różnych wartościach  $R_p$  stwierdzono, że amplituda wahań sił stycznych (wciskających narzędzie) gwałtownie rośnie przy zwiększaniu redukcji przekroju poprzecznego. Przy czym, wartości minimalne tych sił są do siebie zbliżone i nie zależą od redukcji przekroju  $R_p$ .



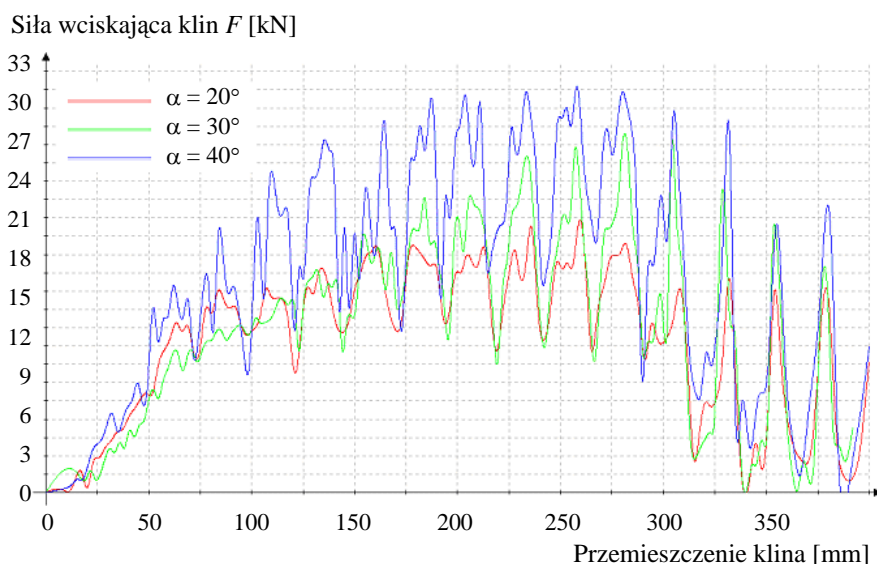
**Rys. 2.47.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwek o przekroju kwadratowym, obliczone MES, w zależności od redukcji przekroju  $R_p$ , dla:  $2L = 60$  mm,  $\beta = 7^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$

Na kolejnym rysunku 2.48 przedstawiono wpływ zmian kąta kształtowania  $\alpha$  na przebieg sił stycznych w procesie WPK. Analizując rozkłady sił zamiesz-

czony na tym rysunku zauważa się niewielki wzrost siły stycznej następujący wraz ze wzrostem kąta  $\alpha$  od  $20^\circ$  do  $40^\circ$ , przy zachowaniu pozostałych parametrów kształtowania.

Ponadto zaobserwowano, podobnie jak poprzednio, wzrost amplitudy wahań sił stycznych w miarę wzrostu wartości kąta kształtowania  $\alpha$ . Przy czym, wpływ tego parametru jest znacznie mniejszy niż w przypadku redukcji przekroju poprzecznego.

W większym zakresie na zmiany sił stycznych podczas procesu walcowania wpływa kąt rozwarcia klina  $\beta$  - rys. 2.49. Zauważono, że zwiększanie wartości kąta  $\beta$ , w zakresie od  $5^\circ$  do  $9^\circ$ , powoduje intensywny wzrost sił stycznych w procesie WPK. Ponadto wartość kąta rozwarcia klina określa długość narzędzi klinowych, co przekłada się na czas, w którym narzędzie styka się z wsadem, a w konsekwencji wpływa na temperaturę metalu w odkuwce kształtowanej. Pociąga to za sobą zwiększenie naprężeń uplastyczniających metalu wraz ze zmniejszeniem jego temperatury i wzrost siły stycznej w końcowej fazie procesu.

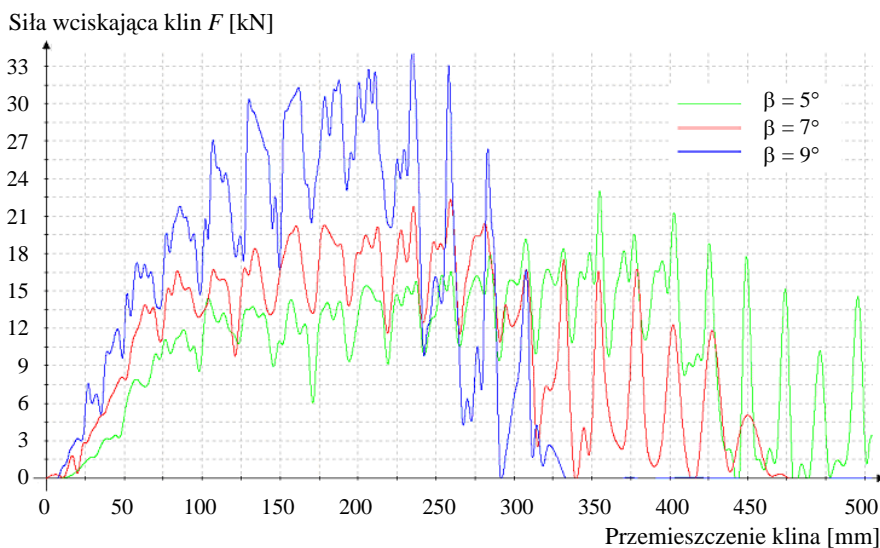


**Rys. 2.48.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) podczas walcowania odkuwek o przekroju kwadratowym, obliczone MES, w zależności od kąta kształtowania  $\alpha$  przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $R_p = 55\%$

Analizując wykresy sił (pokazane na rys. 2.49) zaobserwowano znaczny wzrost sił w początkowym etapie procesu, aż do osiągnięcia maksimum w strefie II (właściwego kształtowania klinowego) wraz ze zwiększaniem się wartości kąta rozwarcia klina  $\beta$ . Stwierdzono również, że amplituda wahań sił



rośnie wraz ze wzrostem kąta  $\beta$ . Spadek sił następuje w strefie III (etap kalibrowania odkuwki), gdzie siła minimalna spada niemal do zera. Również maksymalne wartości sił są tutaj znacznie mniejsze niż w poprzednich etapach kształtowania. Taki spadek sił w końcowym etapie procesu wiąże się ze specyfiką WPK, gdzie narzędzia klinowe przemieszczając się wywołują śrubowe rozszerzanie strefy odkształcenia (strefa I i II), zaś w omawianym etapie ma miejsce jedynie kalibrowanie odkuwki i wyrównanie niedokładności kształtu.



**Rys. 2.49.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwek o przekroju kwadratowym, obliczone MES, w zależności od kąta rozwarcia klina  $\beta$  przy:  $2L = 60$  mm;  $R_p = 55\%$

### Odkuwki ze stopniami o przekroju poprzecznym owalnym

Analizując proces walcowania odkuwek ze stopniami owalnymi porównano rozkłady sił otrzymane w badaniach eksperymentalnych oraz obliczone MES. Na rysunku 2.50 przedstawiono przebiegi sił uzyskane dla procesu WPK realizowanego przy:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $R_p = 40\%$ .

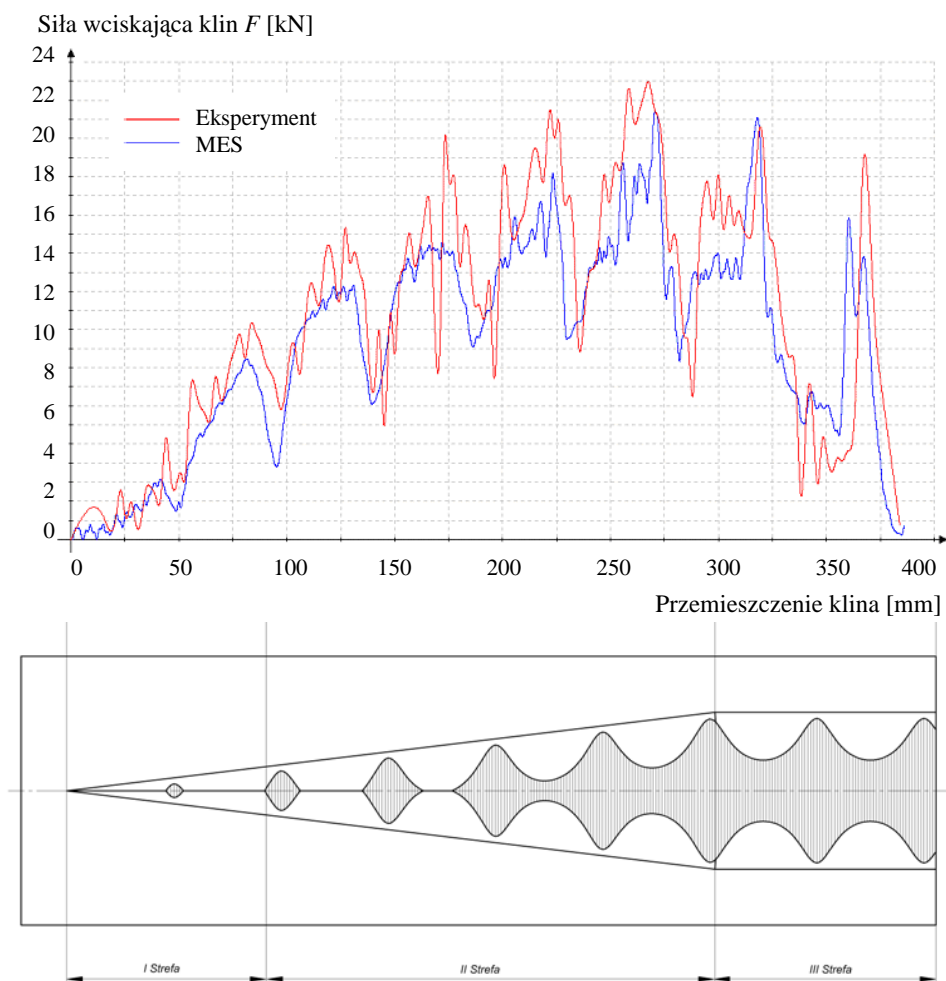
Analizując wykresy sił pokazane na rysunku 2.50, podobnie jak dla odkuwek ze stopniami kwadratowymi, wyróżniono trzy fazy kształtowania.

W początkowej fazie procesu obserwuje się prawie liniowy wzrost obu sił, od zera do wartości, przy której zaczynają pojawiać się pierwsze wahania sił. Ten etap procesu odpowiada wcinaniu się narzędzia w materiał, podczas którego na obwodzie odkuwki kształtowany jest rowek klinowy. Etap ten trwa do momentu,



gdy siła osiągnie swoje maksimum lokalne, po czym odnotowuje się spadek jej wartości.

W etapie drugim (strefa II – rys. 2.50) powierzchnie robocze narzędzi kształtują w sposób spiralny stopień o przekroju owalnym. Obserwuje się wówczas bardzo duże wahania wartości siły wciskającej klin w materiał, w następstwie dużych różnic gniotów na obwodzie odkuwki. Ponadto, wartości sił w kolejnych oscylacjach ulegają zwiększeniu (w stosunku do poprzednich), co jest następstwem zwiększania się szerokości walcowanego stopnia oraz zmniejszania temperatury materiału, w wyniku chłodzenia.

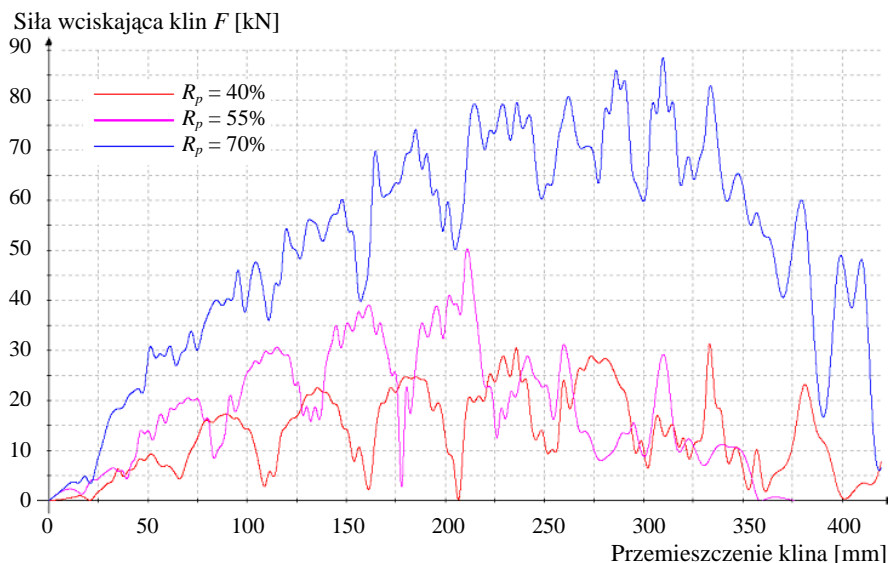


**Rys. 2.50.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) w procesie walcowania odkuwek o przekroju owalnym, obliczone MES, oraz zmierzone w procesie WPK przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $\alpha = 20^\circ$ ;  $R_p = 40\%$

Trzecia faza procesu walcowania (strefa III – rys. 2.50) rozpoczyna się z chwilą, gdy narzędzie zaczyna kształtować wyrób w strefie kalibrowania. W tej strefie następuje nieznaczny spadek wartości maksymalnych siły kształtowania. Wiąże się to przede wszystkim ze specyfiką procesu walcowania w tej strefie. Usuwane są tutaj jedynie nierówności powstałe w poprzednich fazach procesu. Nie ma natomiast spiralnego rozszerzania strefy kształtowania wzdłuż osi odkuwki, co miało miejsce w poprzednich etapach.

Na rys. 2.50 widoczne są różnice między wartościami sił otrzymanych w analizie MES oraz z badań doświadczalnych. Siły z symulacji numerycznej są o około 10-15 % większe od sił zmierzonych. Główną przyczyną tych rozbieżności mogą być różnice w warunkach procesu rzeczywistego i teoretycznego, różnice w temperaturze wsadu, oraz różne czasy trwania procesu, co znacznie wpływa na szybkość chłodzenia metalu i wartość sił kształtowania. Niemniej jednak uzyskanie jednakowego charakteru rozkładu sił oraz różnic ich wartości nie przekraczających 15% powoduje, że porównanie sił obliczonych i zmierzonych uznaje się za zadowalające.

Na rysunku 2.51 zestawiono rozkłady sił stycznych w procesie WPK odkuwek ze stopniami owalnymi, występujących przy różnych wartościach redukcji przekroju  $R_p$ . Prezentowane rozkłady sił wyznaczono z symulacji numerycznej.

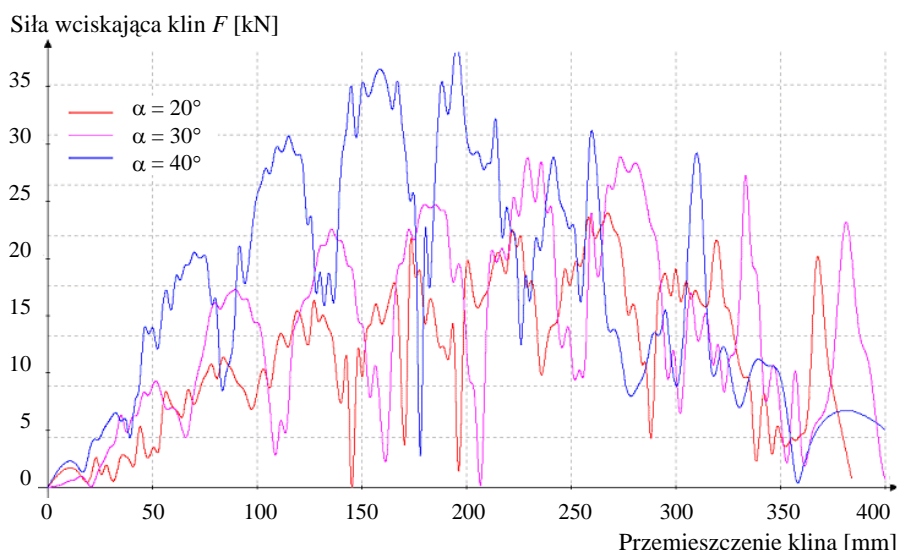


**Rys. 2.51.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwek o przekroju owalnym, obliczone MES, w zależności od redukcji przekroju  $R_p$  przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$

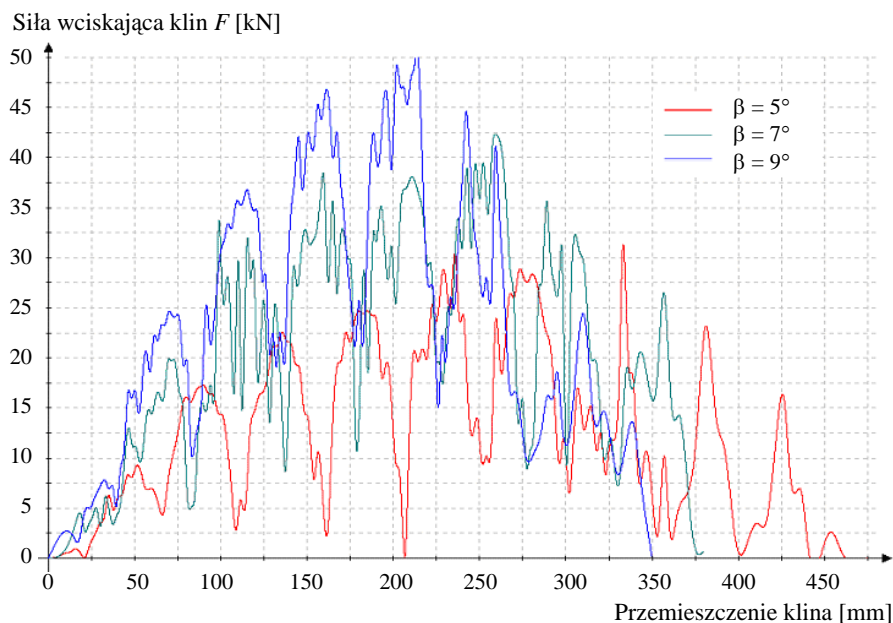
Na podstawie obliczeń stwierdzono, że ze zwiększeniem redukcji przekroju występuje wzrost wartości ekstremalnych sił kształtowania, przy czym występują wahania tych sił od wartości minimalnej do maksymalnej (co wiąże się ze zmianami gniotu na obwodzie odkuwki).

Kolejny rysunek 2.52 przedstawia wpływ zmian kąta kształtowania  $\alpha$  na wartość sił stycznych występujących w procesie WPK odkuwek ze stopniami owalnymi. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że zwiększenie kąta  $\alpha$  powoduje wzrost sił kształtowania, któremu jednocześnie towarzyszą większe wahania sił. Świadczy to o tym, że w procesie WPK należy stosować mniejsze kąty kształtowania  $\alpha$ , gdyż wówczas proces walcowania przebiega bardziej płynnie. Ponadto, przy mniejszej amplitudzie zmian sił zmniejsza się ryzyko wystąpienia poślizgów i zniekształcenia odkuwki, prowadzącej do jej zniszczenia.

Istotny wpływ na siłę styczną w procesie WPK ma kąt rozwarcia klina  $\beta$  (rys. 2.53). Podobnie jak w przypadkach walcowania odkuwek o przekroju poprzecznym kwadratowym, zwiększenie kąta rozwarcia klina  $\beta$  w zakresie od  $5^\circ$  do  $9^\circ$  powoduje wzrost sił stycznych. Ponadto, wartość kąta rozwarcia klina ma istotne znaczenie na długość narzędzi, a tym samym na czas, w którym stykają się one z wsadem i warunkuje temperaturę końcową odkuwki. Analizując rys. 2.53 zaobserwowano również, że zwiększenie kąta  $\beta$  powoduje wzrost amplitudy wahań sił.



**Rys. 2.52.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwki o przekroju owalnym, obliczone MES, w zależności od kąta kształtowania  $\alpha$ , przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $R_p = 40\%$



**Rys. 2.53.** Rozkłady sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwki o przekroju owalnym, obliczone MES, w zależności od kąta rozwarcia klina  $\beta$  przy:  $2L = 60$  mm;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $R_p = 40\%$

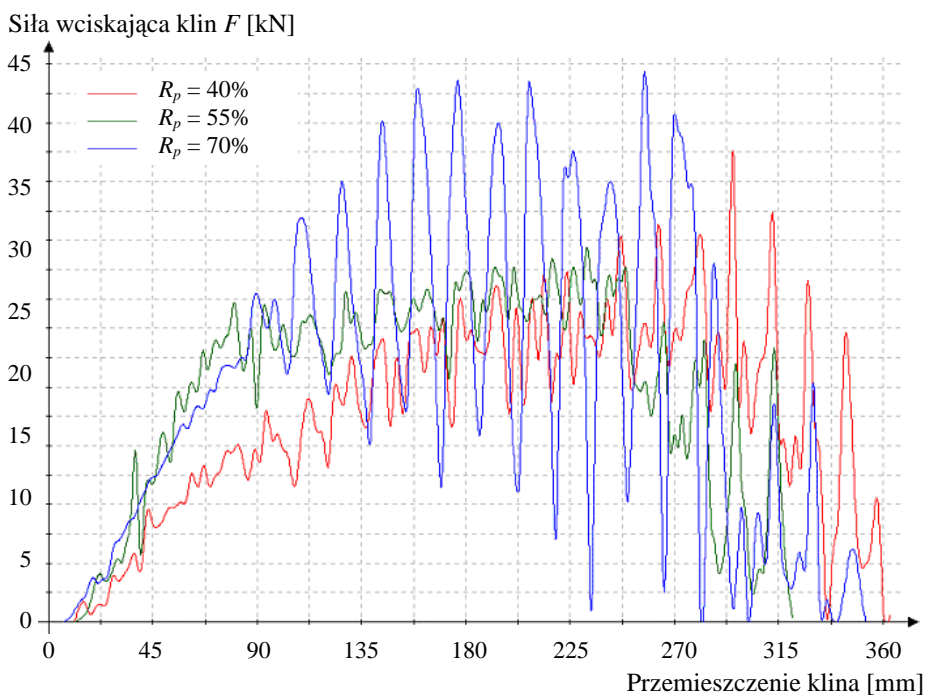
Reasumując można stwierdzić, że wzrost wszystkich badanych parametrów kształtowania (tj.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_p$ ) powoduje zwiększenie siły walcowania.

### Inne odkuwki ze stopniami kształtowymi

Jak wspomniano wcześniej w przypadku pozostałych analizowanych odkuwek, ze względu na duże koszty wykonania narzędzi, badania ograniczono wyłącznie do symulacji numerycznej wykonywanej metodą elementów skończonych.

Na rysunku 2.54 przedstawiono rozkłady sił obliczone dla procesów walcowania odkuwek ze stopniami o przekrojach sześciokątnych, przebiegających przy redukcji przekroju  $R_p = 40\%$ ,  $55\%$  oraz  $70\%$ . Przyjęto, że odkuwki kształtowane są ze stali C45 nagrzanej do temperatury  $1150^\circ\text{C}$ , a kąty narzędzi są równe  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ . Wraz ze wzrostem redukcji przekroju  $R_p$  wzrasta wartość siły wciskającej narzędzia w materiał. Zaobserwowano również, że częstotliwość wahań sił jest znacznie większa niż w przypadkach opisanych uprzednio. Taki rozkład sił (rys. 2.54) związany jest ściśle z kształtem przekroju poprzecznego walcowanego stopnia. Podczas obrotu odkuwki ma miejsce większa liczba zmian wartości gniotu niż podczas walcowania odkuwek ze stopniami

o przekrojach kwadratowym i owalnym. Stąd też obserwuje się większą liczbę oscylacji siły w czasie jednego pełnego obrotu odkuwki.

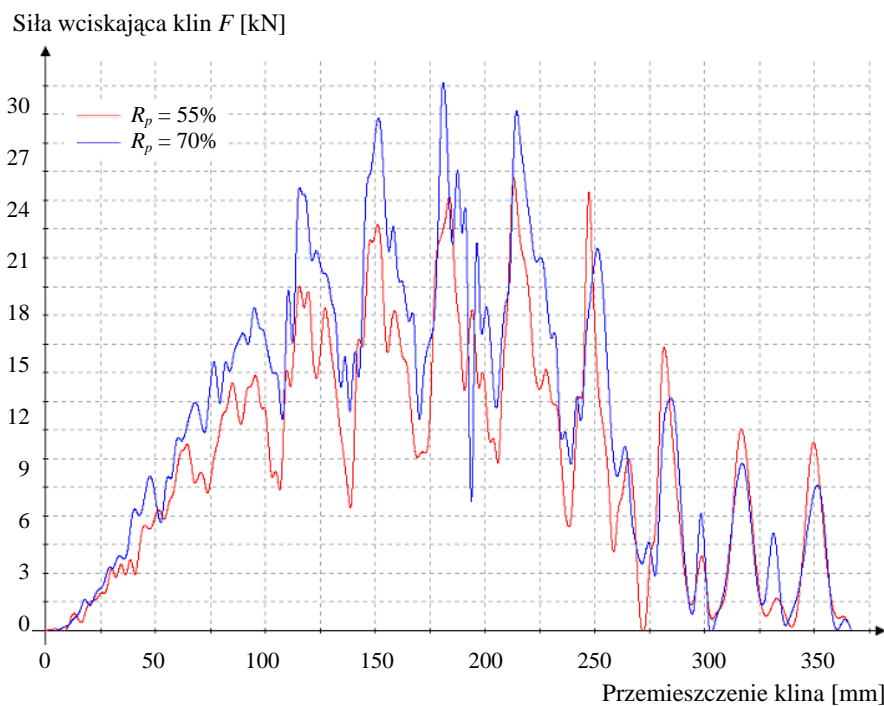


**Rys. 2.54.** Wykresy sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwki ze stopniem o przekroju poprzecznym sześciokątnym, obliczone MES, w zależności od redukcji przekroju  $R_p$ , przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $R_p = 40, 55, 70\%$ ,  $T = 1150$  °C, materiał walcowany – stal C45

Analizując informacje zawarte na rys. 2.54 zauważa się, że zwiększenie  $R_p$ , w zakresie od 40 % do 55 % powoduje niewielki wzrost sił stycznych w początkowym etapie kształtowania. Nie obserwuje się natomiast znaczącego wzrostu amplitudy wahań tych sił dla tego przedziału. Zwiększając wartość  $R_p$  do 70% w początkowej fazie nie obserwuje się znaczącego wzrostu siły, natomiast bardzo duży wzrost siły maksymalnej oraz amplitudy siły pojawia się w strefie właściwego kształtowania. W trzeciej fazie procesu zarówno wartość siły jak i jej wahania bardzo szybko ulegają zmniejszeniu. Podobny efekt wywołuje wzrost kąta kształtowania  $\alpha$  oraz kąta rozwarcia klina  $\beta$ .

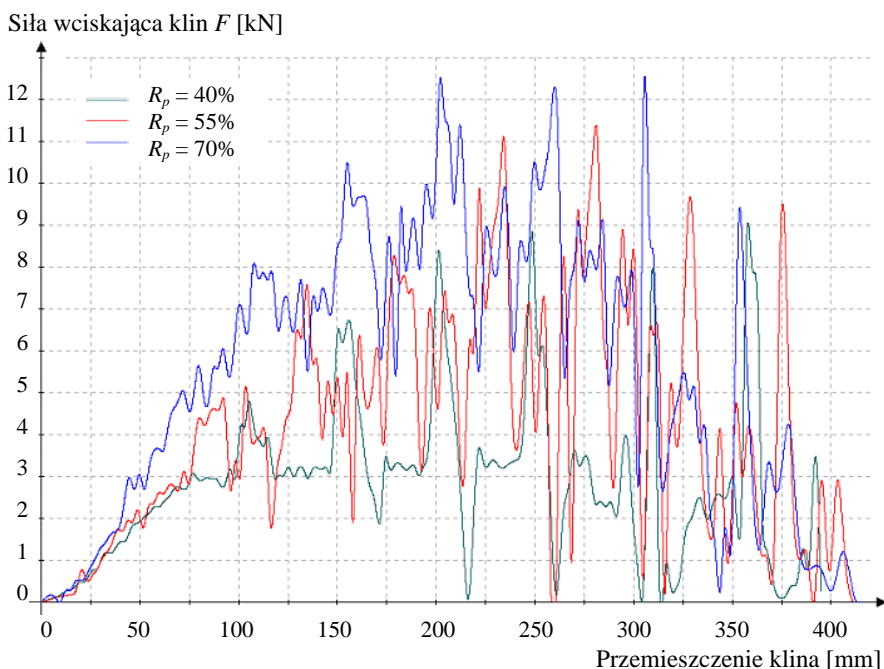
Rysunek 2.55 przedstawia rozkłady sił stycznych obliczone MES w procesach kształtowania odkuwek ze stopniami o przekroju poprzecznym trójkątnym, w zależności od wartości redukcji przekroju  $R_p$ . W początkowym etapie kształtowania obserwuje się wzrost sił z niewielkimi wahaniami ich wartości, przy czym dla obu przebiegów różnice w ich wartościach są małe. Znaczące zmiany

w rozkładach sił pojawiają się dopiero w strefie właściwego kształtowania, gdzie obserwuje się zarówno zwiększenie wartości jak i amplitudy zmian. W trzeciej fazie kształtowania (kalibrowanie) następuje spadek sił, a rozkłady dla obu zastosowanych redukcji przekroju są zbliżone.



**Rys. 2.55.** Wykresy sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwki ze stopniem o przekroju poprzecznym trójkątnym, obliczone MES, dla różnych redukcji przekroju  $R_p$  przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ,  $T = 1150^\circ\text{C}$ , materiał walcowany – stal C45

Zmiany w rozkładach sił obliczone MES dla procesów kształtowania odkuwek mających stopnie walcowe z płaskimi ścięciami pokazano na rysunku 2.56. Walcowanie analizowano przy różnych wartościach redukcji przekroju  $R_p$  dla odkuwek ze stali C45 kształtowanych przy temperaturze  $1150^\circ\text{C}$ . Pozostałe parametry procesu WPK podano w opisie rysunku. Analizując otrzymane rozkłady sił obserwuje się (podobnie jak w poprzednich przypadkach), początkowy wzrost sił, który jest zbliżony do liniowego - strefa wcinania. W dalszym etapie kształtowania pojawiają się rozbieżności w otrzymanych rozkładach sił. Zauważono, że ze wzrostem wartości redukcji przekroju  $R_p$  następuje zwiększenie sił kształtowania, wzrasta również amplituda wahań tych sił. Bardzo charakterystyczny jest wykres otrzymany przy kształtowaniu z redukcją  $R_p = 40\%$ . Występuje tutaj taka chwila, gdy siła oscyluje wokół stałych wartości (strefa właściwego kształtowania klinowego) z lokalnymi jej wahaniami.



**Rys. 2.56.** Wykresy sił stycznych (wciskających klin) w procesach walcowania odkuwki ze stopniem kołowym z płaskimi ścięciami, obliczone MES, dla różnych redukcji przekroju  $R_p$ , przy:  $2L = 60$  mm;  $\beta = 7^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ,  $T = 1150$  °C, materiał walcowany - stal C45

Odpowiada to kształtowaniu płaskich ścięć na walcowym przekroju formowanego stopnia. Przy większych wartościach redukcji przekroju trudniej jest zaobserwować tego typu prawidłowość, gdyż występują tutaj większe amplitudy zmian sił. Można jednak wyróżnić okresy, gdy kształtowany jest zarys kołowy (oscylacje siły wokół stałej wartości) oraz kształtowy, gdzie mają miejsce gwałtowne skoki wartości sił w efekcie zmian gniotu.

Ze względu na ograniczoną objętość opracowania podano tutaj tylko rozkłady sił w zależności od zmian redukcji przekroju poprzecznego  $R_p$ . Nie podano natomiast rozkładów zmian sił w zależności od parametrów kątowych stosowanych narzędzi klinowych.





### 3. Walcowanie poprzeczne wyrobów ze stopniami kształtowymi bez redukcji przekroju

Z analizy przedstawionej w rozdziale 2 wynika, iż lepsze odwzorowanie kształtu przekroju poprzecznego ma miejsce wówczas, gdy kształtuje się z mniejszą redukcją przekroju poprzecznego  $R_p$ . Zatem za celowe uznano sprawdzenie jak kształtowanie to będzie przebiegać wtedy, gdy redukcji przekroju poprzecznego nie będzie, tj. przy  $R_p=0\%$ .

#### 3.1. Kalibrowanie narzędzi

Koncepcja walcowania poprzecznego WP (przy redukcji przekroju poprzecznego  $R_p=0\%$ ) wymaga odpowiedniego sprofilowania powierzchni narzędzi. Sposób doboru kształtu narzędzi jest analogiczny do przedstawionego w rozdziale 2.1. Poniżej podano metodę doboru narzędzi zabezpieczających kształtowanie odkuwek mających stopień o przekroju poprzecznym kwadratowym.

Na rys. 3.1 pokazano zarysy przekroju poprzecznego odkuwki (kwadrat o boku  $a=26,9$  mm) oraz wsadu do walcowania (koło o średnicy  $\varnothing 30$  mm). Z powodu symetrii występującej w przypadku analizowanym wystarczające jest określenie zarysu narzędzia odpowiadającego wykonaniu przez odkuwkę 1/8 obrotu, tj. dla kąta obrotu wynoszącego  $\varphi=45^\circ$ .

Dla określenia zarysu narzędzia podany kąt  $\varphi$  dzieli się na  $n$  równych części. W efekcie otrzymuje się kąt podziału równy:

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi}{n}. \quad (3.1)$$

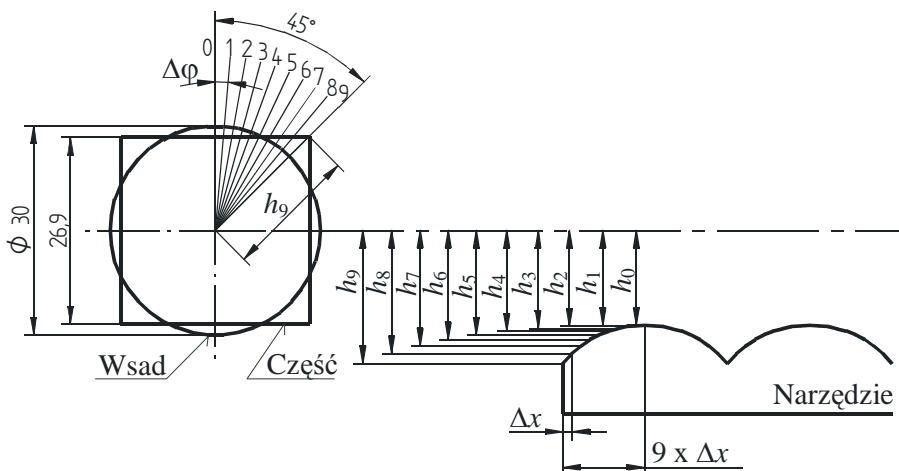
Następnie oblicza się wysokość występu narzędzi  $h_i$  w płaszczyznach określonych położeniem linii  $i = 0, 1, 2, \dots$ . W analizowanym przypadku wynosi ona:

$$h_i = \frac{a}{2 \cos(i \Delta \varphi)}. \quad (3.2)$$

Ostatecznie dokonuje się sprofilowania narzędzi (w sposób pokazany na rys. 3.1) zakładając jednakową wartość przemieszczenia liniowego  $\Delta x$  narzędzia, odpowiadającego obrotowi odkuwki o kąt  $\Delta \varphi$ , obliczanego z zależności:

$$\Delta x = \Delta \varphi r_0, \quad (3.3)$$

gdzie:  $r_0$  – promień wsadu,  $\Delta \varphi$  - elementarny kąt obrotu odkuwki.



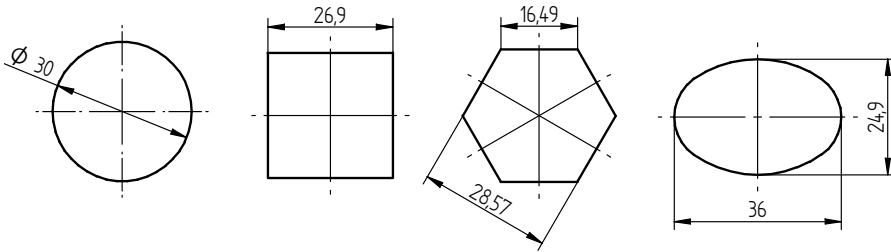
**Rys. 3.1.** Schemat ilustrujący sposób wyznaczania zarysu narzędzia, w procesach walcowania poprzecznego wyrobów o przekroju poprzecznym różnym od kołowego

### 3.2. Analiza numeryczna

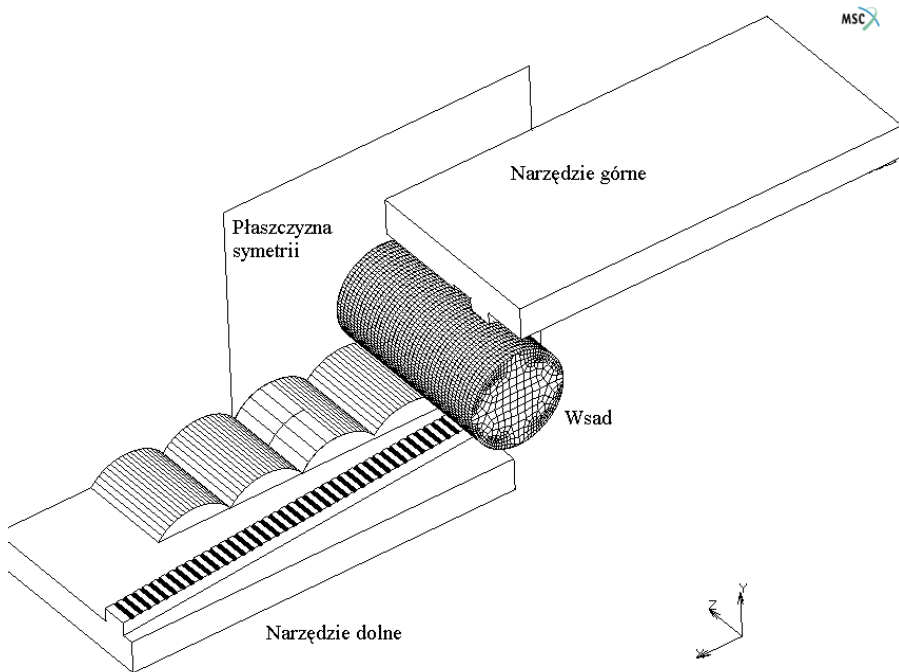
Dla sprawdzenia możliwości walcowania poprzecznego (WP) odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego wykorzystano modelowanie numeryczne, bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). W ramach analizy badano możliwości kształtowania odkuwek o przekroju poprzecznym w kształcie: kwadratu, sześciokąta i owalu. Wymiary przekroji poprzecznych analizowanych odkuwek, kształtowanych z wsadu cylindrycznego o średnicy  $\varnothing 30$  mm przedstawiono na rys. 3.2.

Na potrzeby obliczeń opracowano trzy modele geometryczne pokazane na kolejnych rysunkach 3.3÷3.5. Narzędzia projektowano w programie CAD Solid Edge, z uwzględnieniem metodyki podanej w rozdziale 3.1. Następnie eksportowano je do użytego w obliczeniach numerycznych programu MSC.SuperForm 2005, za pomocą plików w formacie \*.igs. W obliczeniach wykorzystano

symetrię kształtu odkuwki, co pozwoliło na dwukrotne zmniejszenie liczby elementów zastosowanych do zamodelowania odkuwki, oraz skróciło w sposób znaczący czas obliczeń.



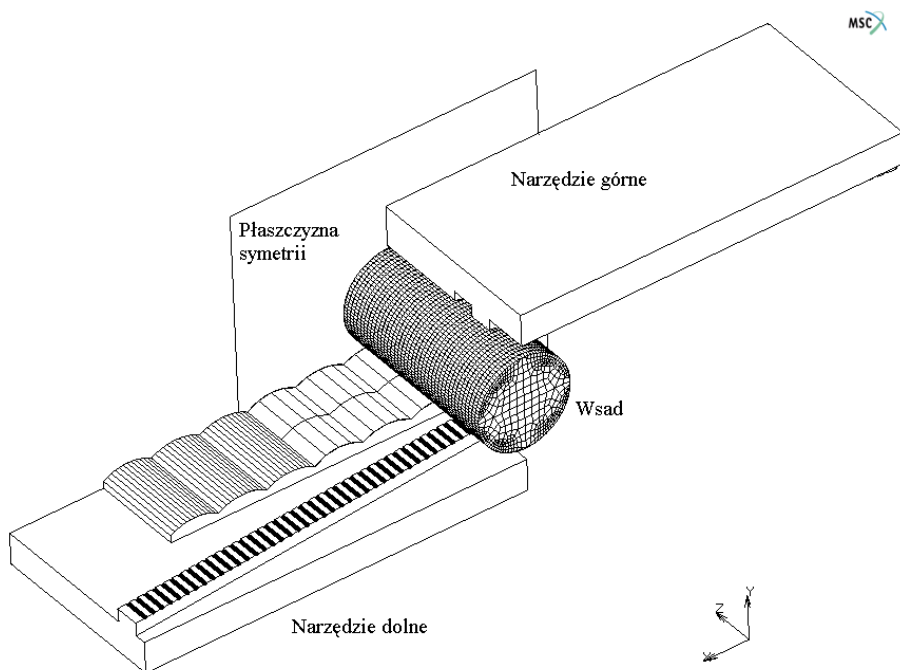
**Rys. 3.2.** Zarysy przekroju poprzecznego wsadu (pierwszy z lewej) oraz odkuwek uzyskiwanych w procesie walcowania poprzecznego



**Rys. 3.3.** Model geometryczny MES procesu WP odkuwki o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu

W obliczeniach przyjęto, że pożądany kształt przekroju poprzecznego odkuwki będzie uzyskiwany w trakcie jej jednego obrotu. Ponadto, narzędzia wyposażono w specjalne ścieżki prowadzące, których zadaniem było nadanie ruchu

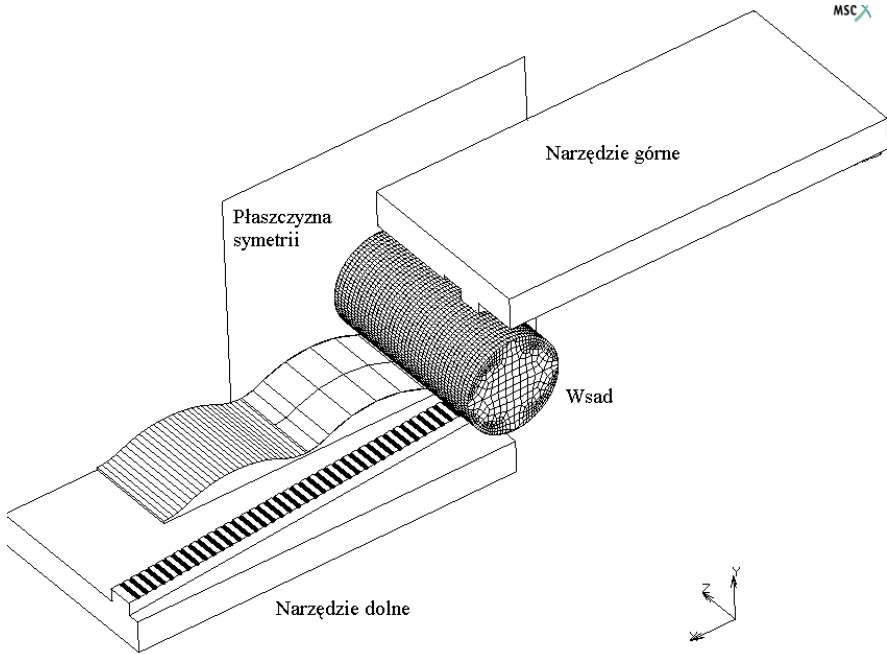
obrotowego odkuwce w tych momentach, gdy kształtowanie przebiegało przy gnioście ujemnym (metal podlegał wciskaniu w wybrania klinów), tj. wtedy gdy zarys przekroju poprzecznego odkuwki (rys. 3.1) leży na zewnątrz zarysu przekroju poprzecznego wsadu.



**Rys. 3.4.** Model geometryczny MES procesu WP odkuwki o przekroju poprzecznym w kształcie sześciokąta

W obliczeniach założono, że materiał, z którego kształtowane są próbki to stal w gatunku C45. Model materiałowy tej stali zaczerpnięto z biblioteki wykorzystanego w obliczeniach oprogramowania MSC.SuperForm 2005. Przyjęto, że wsad nagrzewany jest do temperatury walcowania  $1150^{\circ}\text{C}$  oraz, że temperatura narzędzi kształtujących jest stała i wynosi  $30^{\circ}\text{C}$ . Inne parametry przyjmowane w obliczeniach to: współczynnik wymiany ciepła między narzędziami a metalem równy  $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ; współczynnik wymiany ciepła między metalem a otoczeniem równy  $0,35 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ; czynnik tarcia  $m=1,0$ ; prędkość narzędzi  $v=0,125 \text{ m/s}$ .

W trakcie obliczeń ze względu na niewielkie zmiany kształtu przekroju poprzecznego nie stosowano przebudowy siatki elementów, czyli tzw. remeshing'u.



**Rys. 3.5.** Model geometryczny MES procesu WP odkuwki o przekroju poprzecznym w kształcie owalu

### 3.3. Badania doświadczalne

Procesy WP odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego poddano również analizie w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. W badaniach tych wykorzystano walcarkę laboratoryjną LUW-2, pokazaną na rys. 2.15 i opisaną w rozdziale 2.3.1.

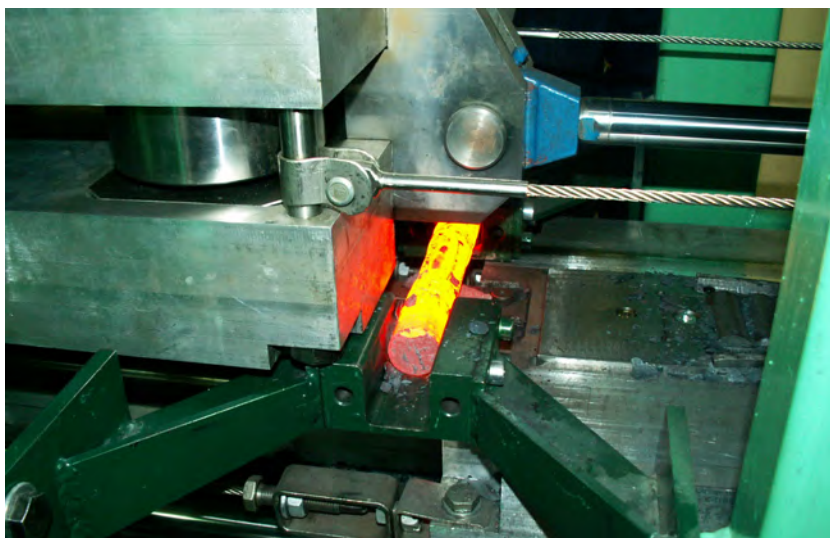
Walcarkę uzbrojono w specjalne zestawy narzędziowe, pokazane na rys. 3.6, zabezpieczające procesy WP cylindrycznego wsadu na kwadrat, sześciokąt i owal. Narzędzia wykorzystane w badaniach miały budowę modułową. Składały się z: oprawy, ścieżek prowadzących oraz wymiennych wkładek walcujących (umożliwiających walcowanie na kwadrat, owal i sześciokąt). Zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne pozwoliło na znaczne zmniejszenie kosztów wykonania narzędzi, dla których wkładki walcujące wykonywane były na obrabiarkach sterowanych numerycznie.

Próby walcowania realizowano w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Próbki o wymiarach  $\varnothing 30 \times 180$  mm (ze stali w gatunku C45) nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym (rys. 2.16) do temperatury  $1150^{\circ}\text{C}$ . Następnie walcowano je przy prędkości przemieszczania narzędzi równej  $0,125$

m/s. Podczas badań kształtowano próbki z wsadu pełnego (rys. 3.7) i drażonego (rys. 3.8).



**Rys. 3.6.** Zestawy narzędziowe wykorzystane w procesach WP odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego



**Rys. 3.7.** Próbka z wsadu pełnego po procesie kształtowania na sześcioąt



**Rys. 3.8.** Próbkę z wsadu drążonego odkształconą w procesie WPK

W rezultacie wykonanych badań wykazano, że w procesie walcowania poprzecznego możliwe jest kształtowanie odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego i to zarówno z wsadu pełnego (rys. 3.9), jak i drążonego (rys. 3.10).



**Rys. 3.9.** Odkuwki z wsadu pełnego otrzymane w analizowanych procesach WPK



**Rys. 3.10.** Odkiewki z wsadu drażonego otrzymane w analizowanych procesach WPK

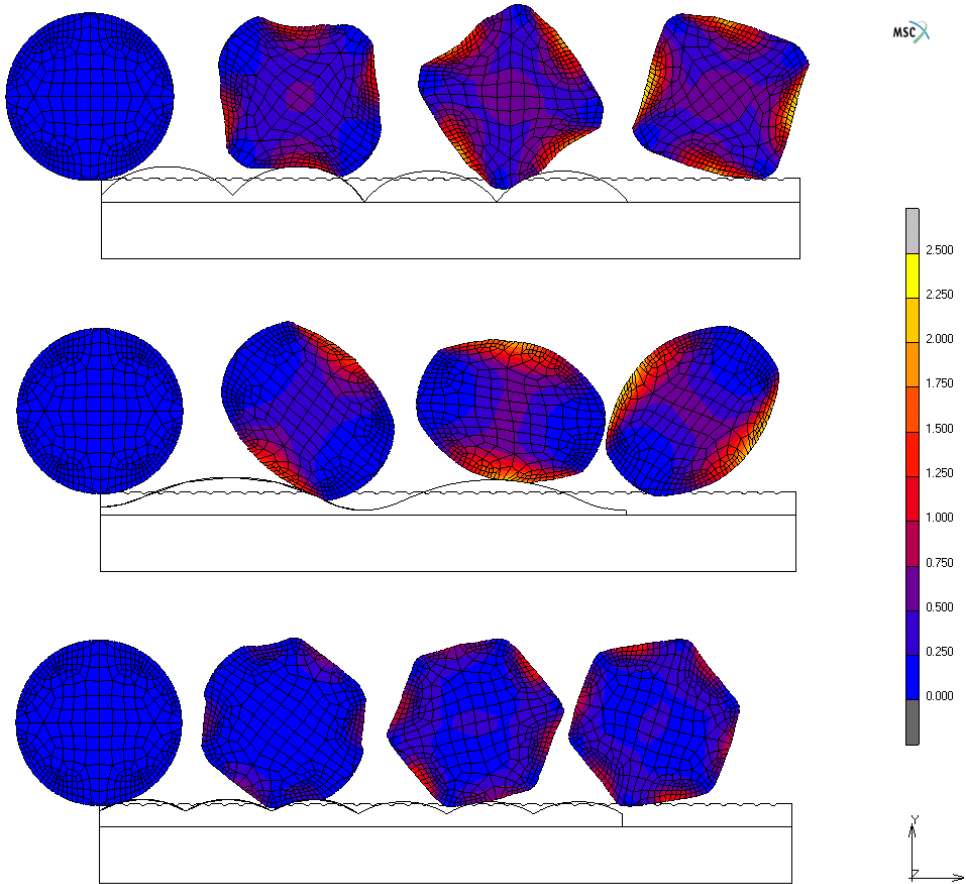
### 3.4. Uzyskane wyniki

W efekcie wykonanych obliczeń wyznaczono między innymi zmiany przekroju poprzecznego wyrobu kształtowanego w procesie WP. Zmiany te pokazano na rysunku 3.11. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że materiał w procesie walcowania poprzecznego uzyskuje pożądany kształt przekroju poprzecznego. Równocześnie widać, że największe niedokładności walcowania powstają wtedy, gdy kształtowanie realizowane jest z gniotem ujemnym. Wówczas występują trudności z prawidłowym ukształtowaniem naroży przekroju poprzecznego, które przyjmują charakterystyczny (zaokrąglony) kształt będący następstwem obtaczania odkiewki po powierzchni narzędzi. Na podstawie wykonanych obliczeń można stwierdzić, że stosowanie procesu WPK jest w pełni uzasadnione w kształtowaniu odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. Ponadto zauważono, że odwzorowanie kształtu przekroju poprzecznego wyrobu walcowanego jest tym lepsze im mniejsze są różnice w wartościach gniotu zastosowanego podczas walcowania. Można zatem stwierdzić, że efektywność walcowania poprzecznego wzrasta w tych procesach, w których zarys przekroju poprzecznego wyrobu mniej odbiega od zarysu materiału wsadu.

Na rys. 3.11 pokazano również jak zmieniają się odkształcenia w procesie walcowania poprzecznego. Zgodnie z oczekiwaniami największe wartości odkształcenia występują w tych procesach, w których walcowanie realizowane jest z największym gniotem. Z tego powodu metal jest intensywnie odkształcany w obszarach lokalizowanych w sąsiedztwie środków boków kwadratu,



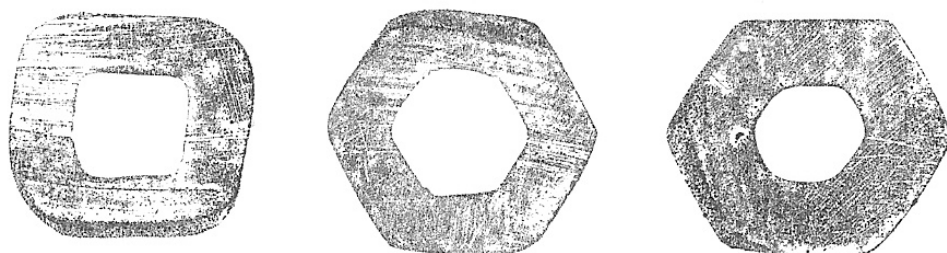
sześciokąta oraz większego łuku owalu. Równocześnie w tych obszarach odkuwek, które walcowane są z gniotem ujemnym (tj. tam gdzie metal wyciskany jest w wybrania w narzędziach) intensywności odkształcenia mają wartości minimalne. Można zatem stwierdzić, że metal w narożach przekroju poprzecznego nie jest przerabiany plastycznie, co może powodować zróżnicowanie własności wytrzymałościowych wyrobów otrzymywanych tą technologią kształtowania.



**Rys. 3.11.** Zmiany kształtu przekroju odkuwek w procesie WP na kwadrat (a), owal (b) i sześciokąt (c) z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

W badaniach doświadczalnych kształtowano również próbki z wsadów drążonych, tulei o grubości ścianek wynoszącej 6 mm i 7,5 mm (przy średnicy zewnętrznej równej  $\varnothing 30$  mm). Zarysy przekrojów poprzecznych próbek odkształconych w procesach WP pokazano na rysunku 3.12. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że podczas walcowania odkuwki na kwadrat dochodzi

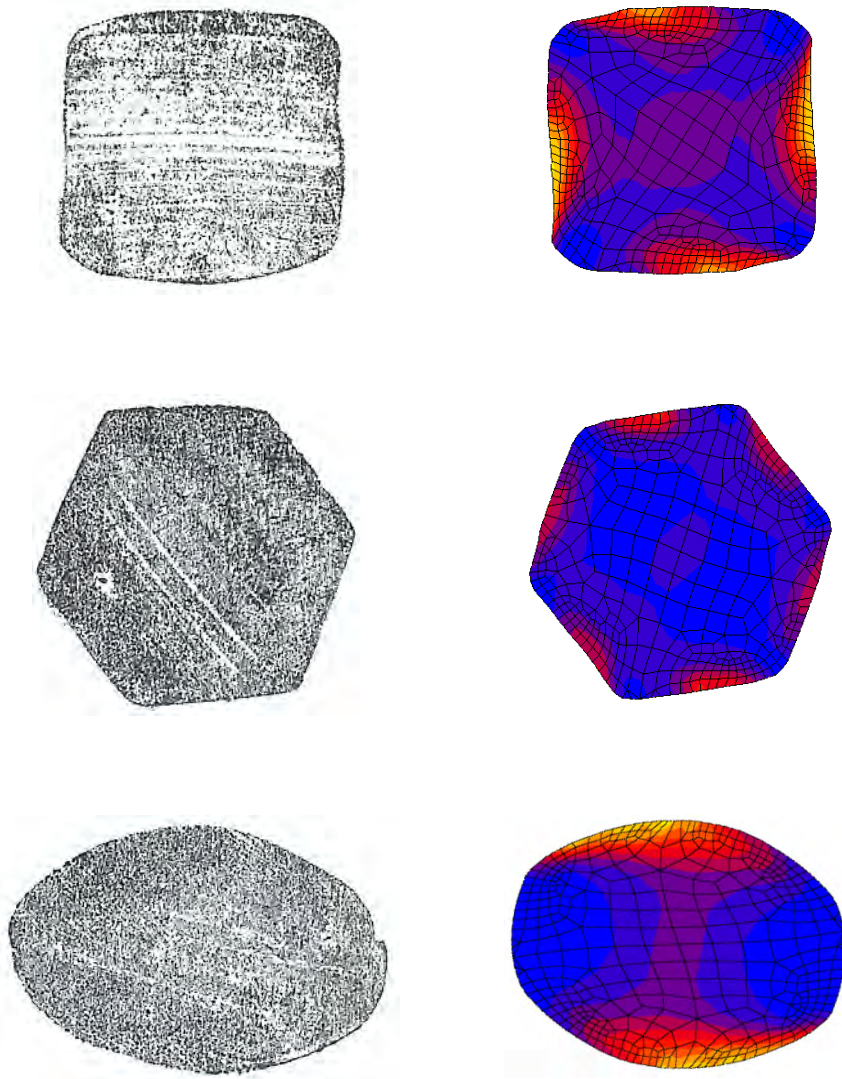
do dużych zniekształceń przekroju poprzecznego – szczególnie w obszarach naroży, które są silnie zaokrąglone. Można nawet przyjąć, iż zniekształcenia te dyskwalifikują proces WP jako metodę kształtowania odkuwek drażonych o zarysie zewnętrznym w kształcie kwadratu. Równocześnie można stwierdzić, iż analizowana metoda kształtowania może być z powodzeniem stosowana w procach walcowania na sześciokąt, gdzie zarys przekroju poprzecznego uzyskiwany jest w tolerancjach właściwych dla procesów kształtowania plastycznego na gorąco.



**Rys. 3.12.** Zarysy przekroi poprzecznych wyrobów drażonych uzyskanych efekcie wykonanych badań doświadczalnych

Na rys. 3.13 zestawiono kształty przekroi poprzecznych odkuwek otrzymanych metodą WP, realizowanego w warunkach laboratoryjnych, oraz uzyskanych z symulacji MES. Porównanie tych zarysów wskazuje na dobrą zgodność wyników numerycznych z rezultatami z badań doświadczalnych. Ponadto, można stwierdzić, że proces WP może być skutecznie stosowany w kształtowaniu odkuwek o przekroju poprzecznym w kształcie sześciokąta i owalu. Natomiast w przypadku odkuwki walcowanej na kwadrat, dokładność odwzorowania zarysu przekroju poprzecznego była gorsza niż w typowym procesie WPK, co opisano w rozdziale 2 niniejszego opracowania.

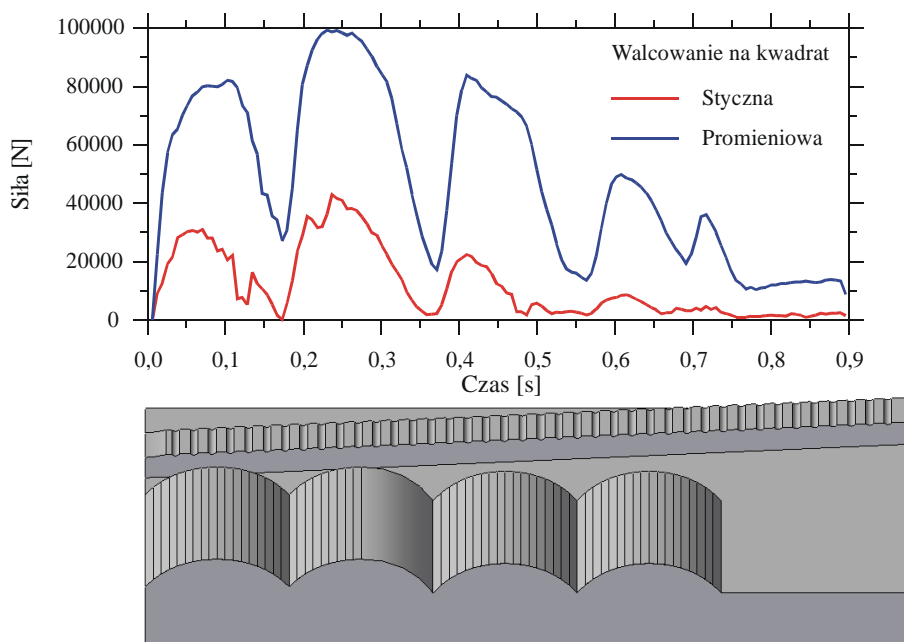
Odnośnie dokładności wykonania poszczególnych odkuwek stwierdzono, że w procesach WPK realizowanych w warunkach laboratoryjnych uzyskano wyroby o następujących wymiarach:  $26,9^{+0,7}$  mm (bok kwadratu),  $28,57^{+0,8}_{-0,6}$  mm (odległość między powierzchniami równoległymi stopnia o przekroju poprzecznym w kształcie sześciokąta);  $36^{+0,4}$  mm i  $24,9^{-0,3}$  mm (odpowiednio długość dłuższej i krótkiej osi owalu). Zatem podsumowując można stwierdzić, iż dokładność kształtowania metodą WP nie odbiega od uzyskiwanej w typowych procesach kształtowania plastycznego na gorąco.



**Rys. 3.13.** Kształty przekroi poprzecznych otrzymane w procesie WP realizowanego w warunkach doświadczalnych (kolumna z lewej) i symulowanego w oparciu o MES (kolumna z prawej)

Na kolejnych rysunkach 3.14÷3.16 pokazano jak w trakcie procesu WPK zmieniają się siły (styczna oraz promieniowa) podczas kształtowania na kwadrat (rys. 3.14), sześciokąt (rys. 3.15) oraz owal (rys. 3.17). Stwierdzono, iż siły te zmieniają się z wartością w trakcie walcowania, w zależności od bieżącego gniotu. Tam gdzie gniot jest duży również siły kształtowania są duże i odwrotnie, tam gdzie gniot jest mniejszy występuje spadek wartości sił kształtowania. W efekcie

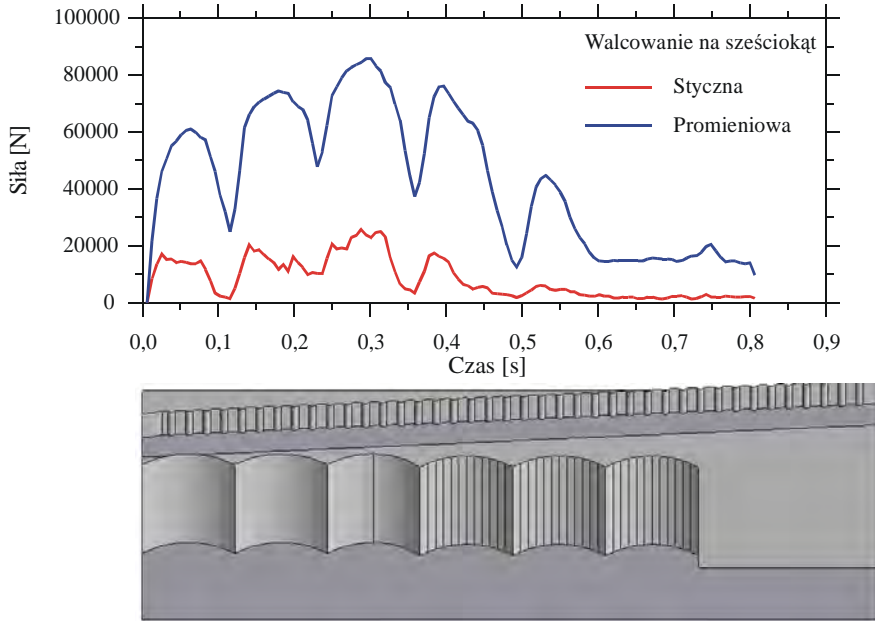
występuje charakterystyczna, dla procesów kształtowania odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego, oscylacja sił kształtowania. Przy czym liczba pików sił (przypadających na jeden obrót odkuwki) jest uzależniona od kształtu przekroju poprzecznego stopnia walcowanego i wynosi od 2 (przekrój owalny) do 6 (przekrój w kształcie sześciokąta). Ponadto zauważono, iż siła promieniowa jest około 2,5 raza większa od siły stycznej (wciskającej narzędzie). Zależność między składowymi siły walcowania jest zgodna z odnotowaną dla typowych procesów WPK [33].



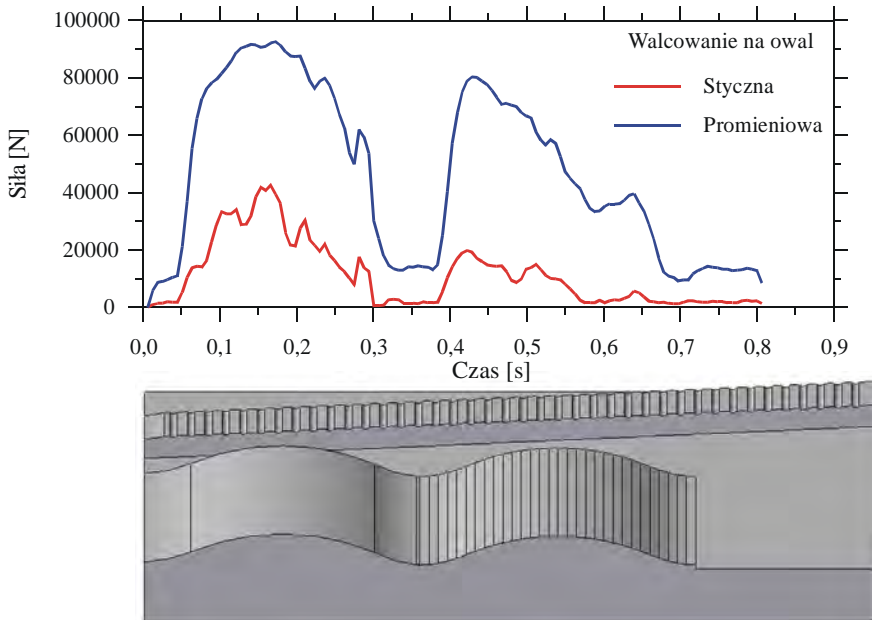
**Rys. 3.14.** Rozkłady sił działających na narzędzie w procesie walcowania poprzecznego stopnia odkuwki o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu

Podsumowując można stwierdzić, iż stosowanie metody walcowania poprzecznego odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego jest w pełni uzasadnione w przypadku kształtowania wyrobów o zarysie nie odbiegającym w sposób istotny od zarysu wsadu. Niewątpliwą zaletą tego schematu walcowania jest skrócenie długości narzędzia do wartości wynikającej z wykonania przez odkuwkę tylko jednego obrotu, niezbędnego do zamiany kształtu kołowego na inny (kwadratowy, sześciokątny, owalny itp.).

3. Walcowanie poprzeczne odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego 73



Rys. 3.15. Rozkłady sił działających na narzędzie w procesie walcowania poprzecznego stopnia odkuwki o przekroju poprzecznym w kształcie sześciokąta



Rys. 3.16. Rozkłady sił działających na narzędzie w procesie walcowania poprzecznego stopnia odkuwki o przekroju poprzecznym w kształcie owalu



## 4. Walcowanie poprzeczno - klinowe odkuwek z wsadu kształtowego

W pewnych przypadkach korzystnym wydaje się stosowanie w procesach WPK wsadów o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. I tak przy produkcji odkuwek wydłużonych, które mają na przeważającej długości przekrój kształtowy (długość stopnia cylindrycznego jest nieznaczna) nieopłacalne jest kształtowanie z wsadu walcowego. Z podobną sytuacją mamy do czynienia wówczas, gdy największy przekrój poprzeczny odkuwki jest kształtowy.

Mając na uwadze podane powyżej powody dokonano analizy procesu WPK z wsadu kształtowego (o przekroju poprzecznym sześciokątnym i kwadratowym). W badaniach ograniczono się do przypadku walcowania z wsadu kształtowego odkuwek mających, umieszczony centralnie, pojedynczy stopień walcowy.

### 4.1. Kalibrowanie narzędzi (klinów)

Przebieg projektowania narzędzi klinowych do kształtowania odkuwek z wsadu kształtowego jest identyczny jak w procesach typowych, w których wykorzystywane są wsady walcowe. Należy jednak pamiętać o tym, że w tym przypadku kształtowania przerób plastyczny materiału należy opisywać za pomocą redukcji względnej  $R_p$  – zależność (1.2), a nie stopniem gniotu  $\delta$  - wzór (1.1). W razie konieczności korzystania z wzorów uzależnionych od stopnia gniotu  $\delta$  należy w pierwszej kolejności określić na podstawie redukcji  $R_p$  wartość  $\delta_{sr}$ , którą oblicza się z zależności:

$$\delta_{sr} = \sqrt{\frac{1}{1 - R_p}}. \quad (4.1)$$

W praktyce proces projektowania narzędzi sprowadza się do określenia wartości kąta rozwarcia klina  $\beta$  i kąta kształtującego  $\alpha$ , na podstawie których (po uwzględnieniu wymiarów odkuwki) dobierane są pozostałe wymiary narzędzi.

Do obliczenia kąta rozwarcia klina  $\beta$  można stosować zależność podaną po raz pierwszy przez Balina [4]:

$$\sin \beta = 0,009 \cdot \frac{\mu}{\sin \alpha}, \quad (4.2)$$

w której współczynnik tarcia  $\mu$  należy przyjmować wg [4] z przedziału  $0,4 \div 0,5$ .

Z kolei w pracach [1, 9] przedstawiono zależności empiryczne pozwalające wyznaczać parametry geometryczne klinów w procesach walcowania odkuwek ze stali konstrukcyjnych. Po uwzględnieniu specyfiki procesu WPK z wsadów kształtowych zależności te można przedstawić w następującej postaci:

$$\beta \leq \arctg \left( \frac{0,3 + 0,01d_z}{\delta_{sr}^3} \right), \quad 3^\circ \leq \beta \leq 15^\circ, \quad (4.3)$$

$$\alpha = 80 \cdot \operatorname{tg} \beta + 15 + \frac{d_z}{4}, \quad 15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ, \quad (4.4)$$

gdzie kąty  $\alpha$  i  $\beta$  wyrażone są w stopniach,  $\delta_{sr}$  opisane jest zależnością (4.2), zaś  $d_z$  oznacza średnicę zastępczą wynikającą z równości pól przekroji poprzecznych wsadu kształtowego i walca o średnicy  $d_z$ .

Według Fu i Dean'a [14] oraz Koizumiego i in. [22] proces WPK przebiega stabilnie (bez poślizgu oraz zerwania odkuwki) wtedy, gdy kąty  $\alpha$  i  $\beta$  spełniają warunek:

$$0,04 \leq \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \leq 0,08. \quad (4.5)$$

W roku 1979 Hayama [39] zaproponował nową metodę obliczania wartości kątów  $\alpha$  i  $\beta$  powiązanych z redukcją przekroju poprzecznego  $R_p$ , gwarantującą uzyskanie odkuwki wolnej zarówno od wad wewnętrznych jak i powierzchniowych. Zależność między kątami  $\alpha$  i  $\beta$  oraz optymalną wartością redukcji  $R_{pop}$  jest wg tego autora określona przez:

$$R_{pop} = (0,15 + 0,0038 \cdot \alpha) \beta^{0,325}, \quad (4.6)$$

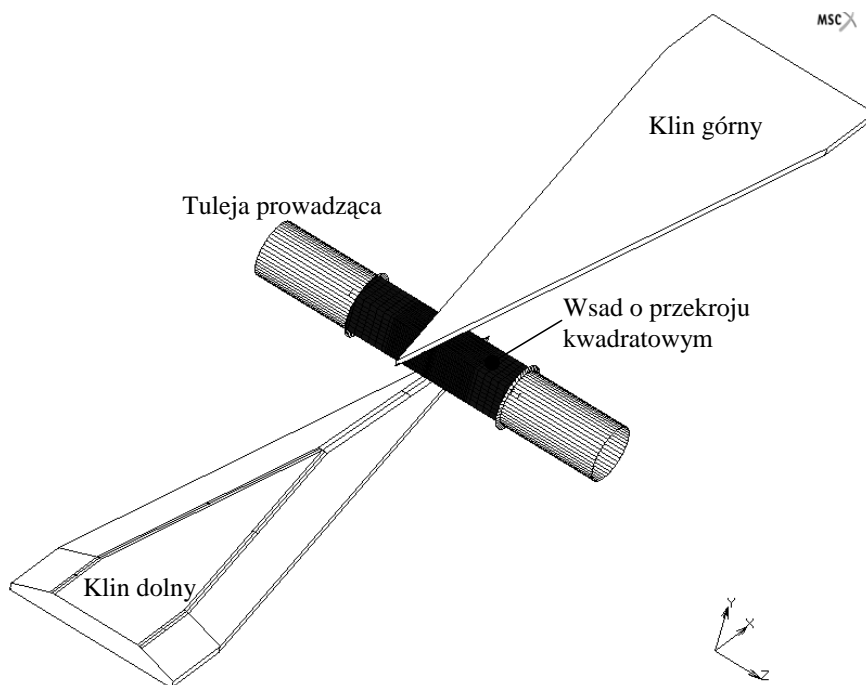
$$1,93 \cdot \beta^{-0,925} \geq 0,15 + 0,0038 \alpha \geq M \cdot \beta^{-0,325}, \quad (4.7)$$

gdzie:  $M$  – stała materiałowa ( $M = 0,35 \div 0,4$ ), a kąty  $\alpha$  i  $\beta$  wyrażane są w stopniach.

## 4.2. Analiza numeryczna

W celu sprawdzenia możliwości kształtowania metodą WPK odkuwek z wsadu kształtowego wykorzystano modelowanie numeryczne, bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). Obliczenia wykonano w programie MSC.SuperForm 2005. Na potrzeby obliczeń opracowano szereg modeli procesu WPK z wsadu kształtowego, z których jeden pokazano na rys. 4.1.





**Rys. 4.1.** Jeden z opracowanych modeli MES procesu WPK odkuwki z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym

W skład każdego z modeli wchodziły dwa przemieszczające się przeciwnie (z prędkością 0,1 m/s każdy) jednakowe kliny, dwie tuleje prowadzące (stabilizujące pozycję odkuwki w czasie walcowania) oraz wsad (modelowany za pomocą elementów 8-węzłowych). W obliczeniach założono, że kliny (określone kątami  $\alpha=20^\circ$  i  $\beta=9^\circ$ ) umożliwiają odwalcowanie na odkuwce stopnia cylindrycznego o długości  $l=65$  mm.

W obliczeniach analizowano dwa warianty procesu WPK, tj. z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym i sześciokątnym. Wymiary poprzeczne wsadów dobrano w ten sposób, by ich pole przekroju poprzecznego równe było polu przekroju walca o średnicy  $\varnothing 30$  mm. W każdym wariantcie rozważono po pięć przypadków walcowania, charakteryzowanych przez redukcję przekroju poprzecznego  $R_p$  równą: 25%, 45%, 60%, 70% i 80%.

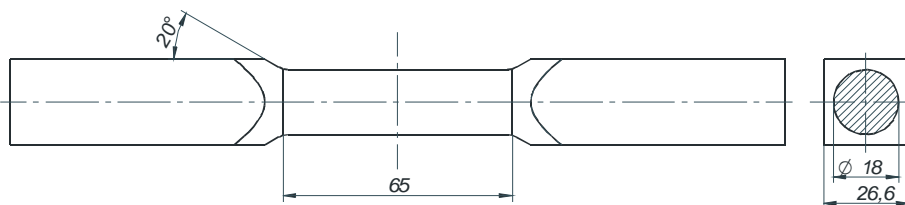
W analizie założono termomechaniczny schemat obliczeń. Założono, że materiał przed walcowaniem jest nagrzewany do temperatury  $1150^\circ\text{C}$ , zaś temperatura klinów jest jednakowa i wynosi  $50^\circ\text{C}$ . Pozostałe parametry przyjęte w obliczeniach to: współczynnik wymiany ciepła między materiałem a otoczeniem równy  $350 \text{ W/m}^2\text{K}$ , współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami równy  $10\,000 \text{ W/m}^2\text{K}$  oraz temperatura otoczenia równa  $30^\circ\text{C}$ . Założono, że odkuwki kształtowane są ze stali w gatunku C45,

której model materiałowy przyjęto z biblioteki zastosowanego programu MSC.SuperForm 2005. W obliczeniach przyjęto model tarcia stałego, uzależniony od prędkości poślizgu i opisany zależnością (2.4). Założono równocześnie, iż czynnik tarcia  $m$  (ze względu na stosowanie nacięć technologicznych na powierzchniach bocznych klinów) przyjmuje wartość graniczną  $m=1,0$ .

### 4.3. Walidacja modelu MES

Dla zweryfikowania obliczeń numerycznych procesu WPK z wsadów kształtowych wykonano następujące próby walcowania odkuwek:

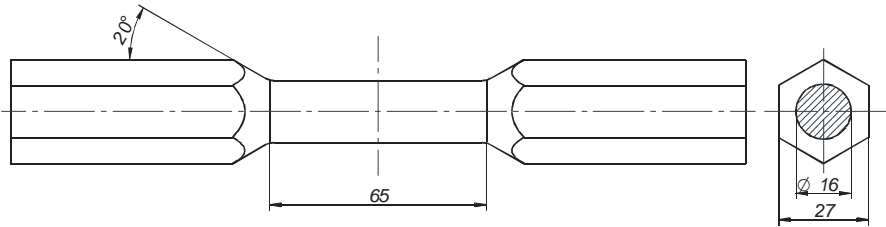
- z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym (rys. 4.2), zakładając następujące parametry kształtowania: redukcja przekroju  $R_p = 64 \%$ , kąt kształtowania  $\alpha = 20^\circ$ , kąt rozwarcia klina  $\beta = 9^\circ$ , długość stopnia walcowanego  $2L = 65 \text{ mm}$ , prędkość przemieszczenia się klinów  $v = 0,1 \text{ m/s}$ ;
- z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym (rys. 4.3.), przebiegającym przy następujących parametrach procesu: redukcja przekroju  $R_p = 71,6 \%$ , kąt kształtowania  $\alpha = 20^\circ$ , kąt rozwarcia klina  $\beta = 9^\circ$ , długość stopnia walcowanego  $2L = 65 \text{ mm}$ , prędkość przemieszczenia się klinów  $v = 0,1 \text{ m/s}$ .



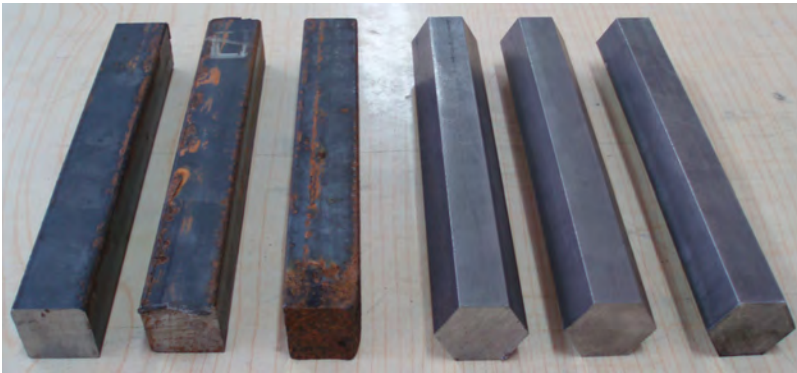
**Rys. 4.2.** Odkuwka ze stopniem walcowym, kształtowana z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym

Badania doświadczalne wykonano wykorzystując płasko-klinową walcarkę laboratoryjną LUW-2 (rys. 2.15), znajdującą się na wyposażeniu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. W badaniach wykorzystano wsady kształtowe (rys. 4.4) o długości 180 mm.

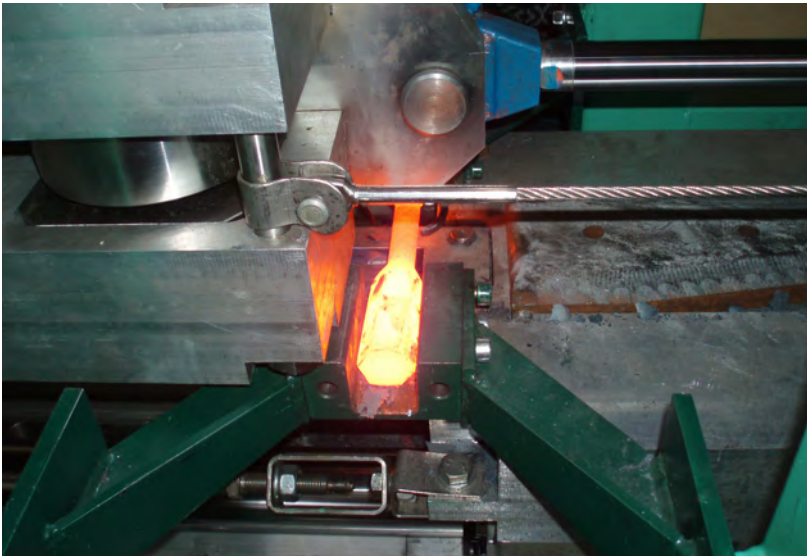
Próbki przed walcowaniem nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym (rys. 2.16) do temperatury 1150°C. Następnie umieszczano je w podajniku walcarki i poddawano kształtowaniu (rys. 4.5), w czasie którego rejestrowano siły walcowania. Po procesie walcowania odkuwki wyjmowano z podajnika walcarki i poddawano oględzinom (rys. 4.6).



**Rys. 4.3.** Odkuwka ze stopniem walcowym, kształtowana z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątym



**Rys. 4.4.** Wsady kształtowe ze stali C45 wykorzystane w badaniach doświadczalnych



**Rys. 4.5.** Odkuwka odwalcowana z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątym



**Rys. 4.6.** Odkuwka odwalcowana z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym

W efekcie wykonanych prób walcowania, prowadzonych w warunkach obróbki plastycznej na gorąco (wsady nagrzewano do temperatury  $T=1150^{\circ}\text{C}$ ), stwierdzono, że metodą WPK można z powodzeniem kształtować wyroby z wsadu o przekroju poprzecznym różnym od kołowego – rys. 4.7.

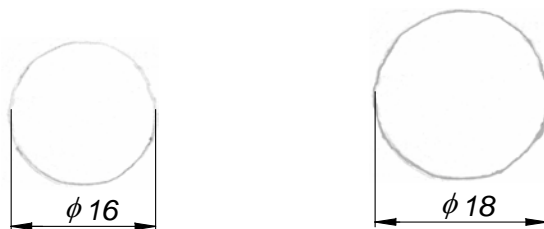


**Rys. 4.7.** Próbki ze stali C45 odwalcowane w procesie WPK, z wykorzystaniem wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym i kwadratowym (pokazano ½ próbek)

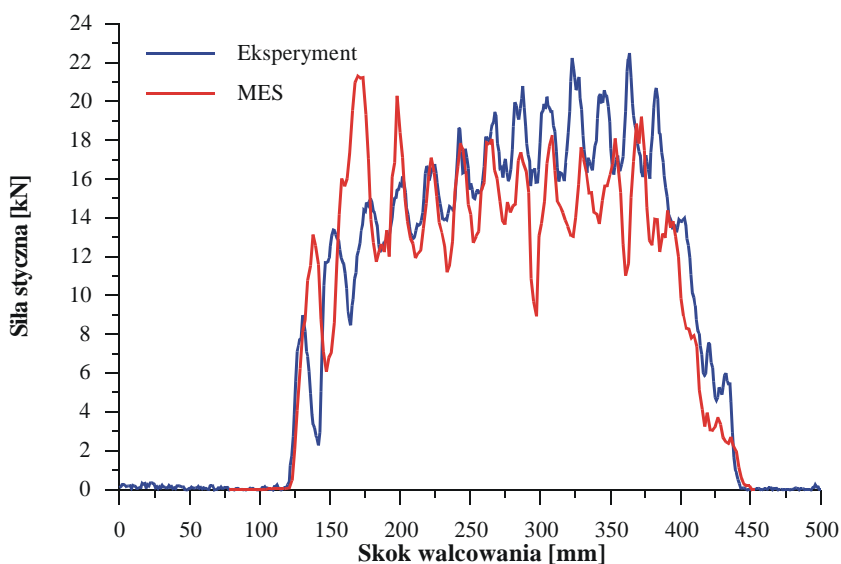
Na kolejnym rys. 4.8 pokazano zarys przekroju poprzecznego otrzymanego stopnia walcowanego w analizowanych przypadkach WPK z wsadu kształtowego. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż dokładność wykonania stopnia odkuwki nie odbiega od dokładności uzyskiwanej w typowych procesach WPK z wsadu walcowego.

Przypadki WPK z wsadu kształtowego zrealizowane w warunkach laboratoryjnych zamodelowano również MES-em zachowując identyczność parametrów walcowania. W efekcie takiego postępowania uzyskano możliwość porównania siły stycznej (wciskającej klin) obliczonej i zmierzonej doświadczalnie.

Otrzymane zestawienia sił pokazano na kolejnych rysunkach: 4.9 – WPK z wsadu o przekroju kwadratu i 4.10 – WPK z wsadu o przekroju sześciokąta.



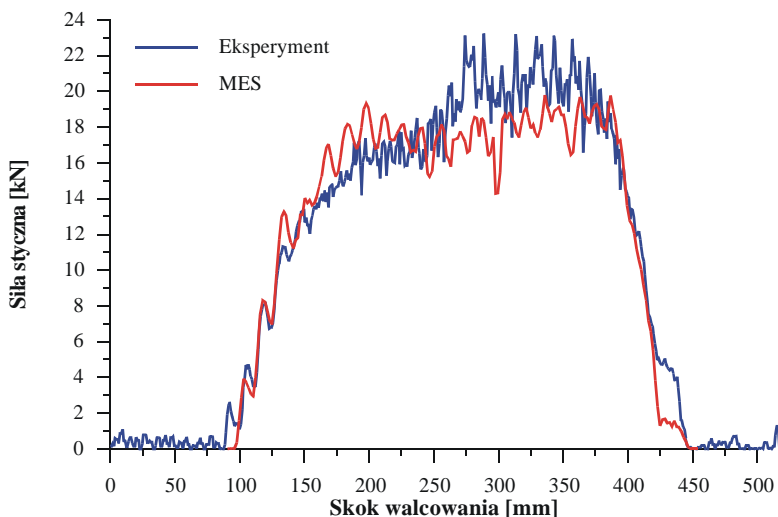
**Rys. 4.8.** Zarys przekroju poprzecznego stopni odkuwek otrzymanych w próbach laboratoryjnych walcowania w temperaturze 1150°C próbek z prętów o przekroju poprzecznym: a) sześciokątnym, b) kwadratowym



**Rys. 4.9.** Porównanie sił stycznych (wciskających klin) obliczonych i zmierzonych w procesie WPK ze wsadu kwadratowego przy redukcji  $R_p=64\%$

Otrzymane zestawienia sił wskazują na dobrą zgodność. Jednakże ze względu na występujące oscylacje, których miejsce wystąpienia związane jest ze sposobem ułożenia wsadu w procesie walcowania utrudnione jest porównanie ilościowe sił obliczonych i zmierzonych. Ten problem może być ominięty przez porównanie prac wykonanych przez narzędzie klinowe w analizowanych procesach WPK. Wyniosły one odpowiednio:

- 4140 J (na podstawie MES) i 4558 J (z badań eksperymentalnych) dla procesu WPK z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym;
- 5020 J (na podstawie MES) i 5268 J (z badań eksperymentalnych) dla procesu WPK z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym.

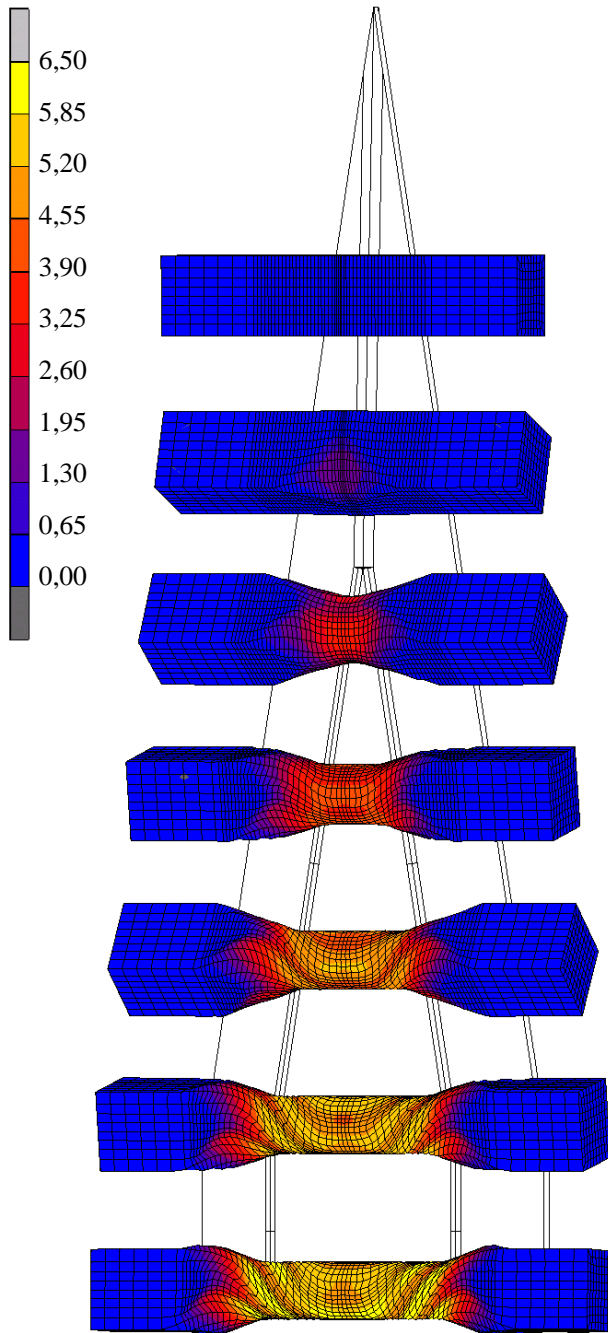


**Rys. 4.10.** Porównanie sił stycznych (wciskających klin) obliczonych i zmierzonych w procesie WPK ze wsadu sześciokątnego przy redukcji  $R_p=71,6\%$

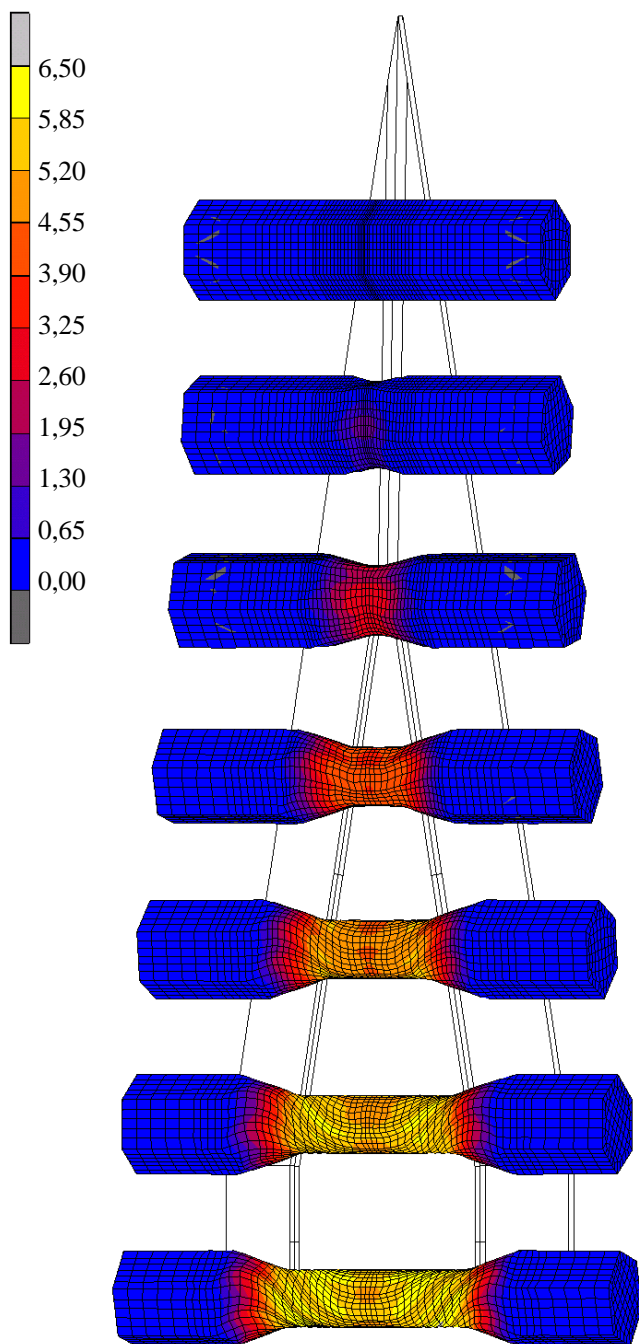
Oznacza to, że różnice odnotowane dla procesu WPK symulowanego i zrealizowanego eksperymentalnie w przypadku wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym wynoszą 9,17%, a dla wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym tylko 4,71%. Można zatem stwierdzić, iż zastosowanie MES pozwala na dobre odwzorowanie warunków kształtowania.

#### 4.4. Uzyskane wyniki

W efekcie wykonanych obliczeń prześledzono w sposób szczegółowy przebieg procesu WPK odkuwek z wsadu kształtowego – o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu (rys. 4.11) oraz sześciokąta (rys. 4.12). Analiza danych zamieszczonych na tych rysunkach wykazuje, iż w obu przypadkach kształtowania walcowany stopień odkuwki uzyskuje pożądany kształt cylindryczny. Jednakże w efekcie zmieniającego się gniotu bezwzględnego rozkład odkształceń występujących na powierzchni odwalcowanego stopnia nie jest jednorodny, jak ma to miejsce w procesie WPK z wsadu walcowego.



**Rys. 4.11.** Progresja odkuwki oraz rozkład intensywności odkształcenia w procesie WPK z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym, przebiegającym przy:  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz  $R_p=60\%$



**Rys. 4.12.** Progresja odkuwki oraz rozkład intensywności odkształcenia w procesie WPK z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym, przebiegającym przy:  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz  $R_p=60\%$

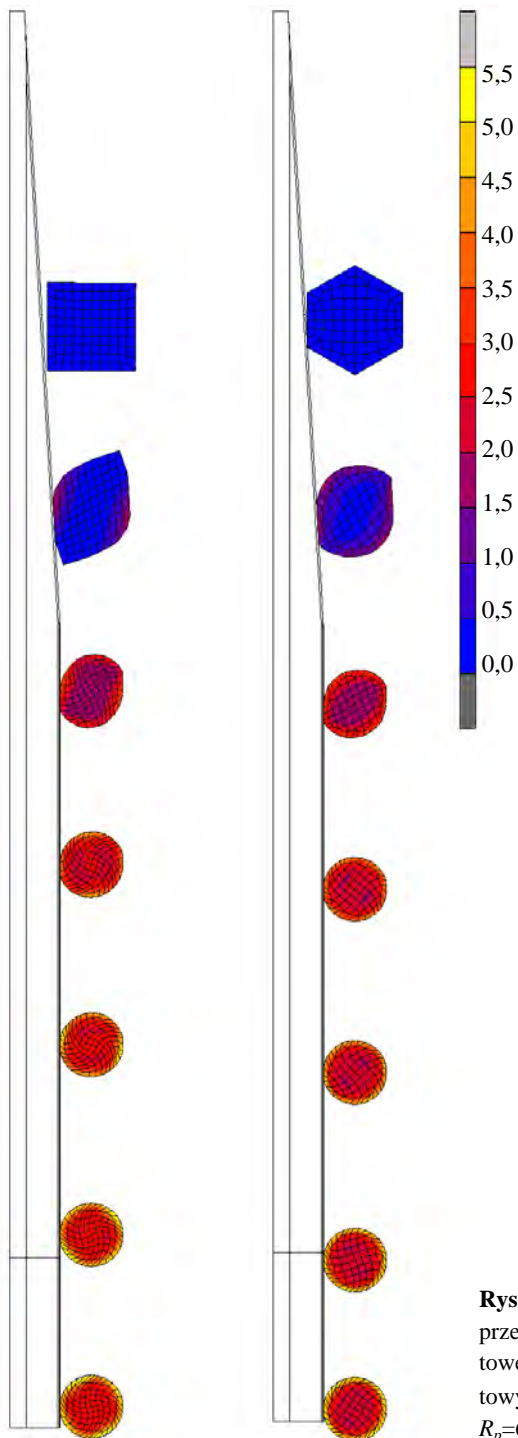


Jest to szczególnie widoczne w przypadku kształtowania odkuwki z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym (rys. 4.11), gdzie dysproporcje o wartościach gniotu bezwzględnego są znacznie większe niż podczas walcowania z wsadu sześciokątnego. Dodatkowo analizując siatki elementów skończonych (w omawianych przypadkach walcowania) można stwierdzić, że metal w stopniu kształtowanym ulega silnemu płynięciu w kierunku stycznym. Świadczy o tym skrócenie linii siatek przebiegających początkowo równoległe do osi wzdłużnej wsadu. Jest ono znacznie większe w procesie walcowania z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym, który charakteryzuje większa zmienność gniotu niż w procesie WPK z wsadu sześciokątnego.

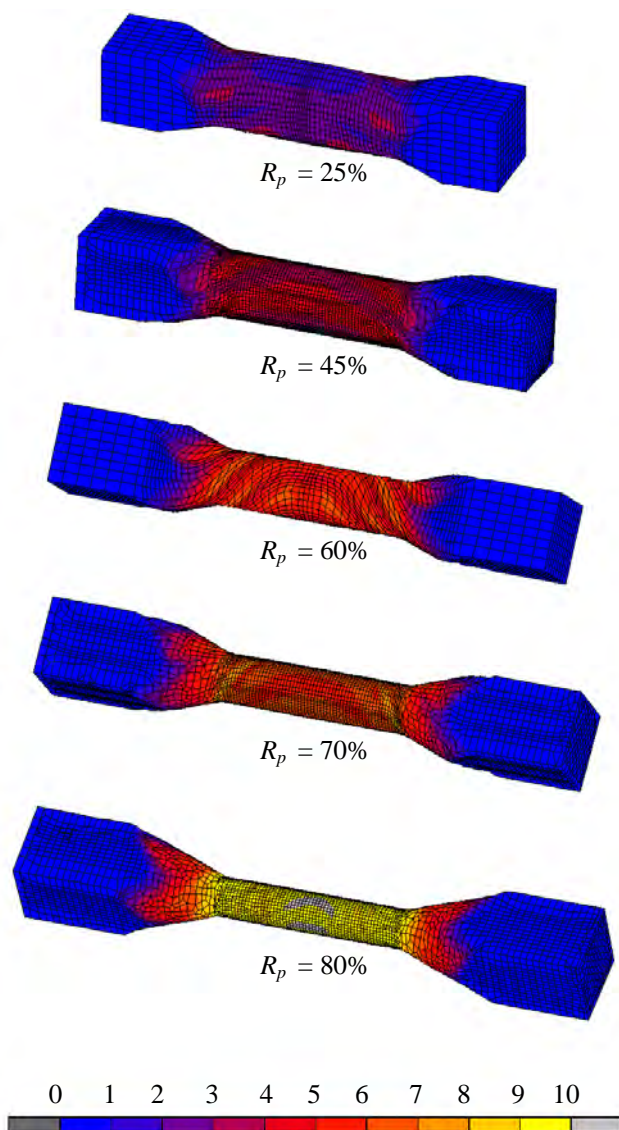
Na kolejnym rys. 4.13 pokazano jak zmienia się kształt przekroju poprzecznego podczas procesu WPK z wsadu kształtowego.

Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że w początkowej fazie kształtowania przekrój ulega silnej owalizacji, znacznie większej niż w tradycyjnym procesie WPK z wsadu walcowego. Oznacza to, iż proces WPK z wsadu kształtowego jest bardziej podatny na wystąpienie poślizgu niekontrolowanego w stosunku do procesów realizowanych metodą tradycyjną. Ponadto, powoduje to większe trudności w usuwaniu owalizacji przekroju poprzecznego, co może pociągnąć za sobą konieczność wydłużenia narzędzia w strefie kalibrowania. Należy przy tym zauważyć, iż wymienione trudności są bardziej widoczne przy kształtowaniu z wsadu kwadratowego (bardziej odbiegającego od przekroju kołowego) niż sześciokątnego.

Procesy WPK z wsadu kształtowego przebiegają tym pewniej, im większa jest redukcja przekroju poprzecznego. Jest to efektem zmniejszania dysproporcji między wartościami gniotu bezwzględnego następującego w wyniku zbliżania narzędzi do siebie. Na rys. 4.14 i 4.15 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia w procesach WPK realizowanych klinami o kątach  $\alpha = 20^\circ$  i  $\beta = 9^\circ$ , przy różnych redukcjach przekroju poprzecznego (od 25% do 80%). W następstwie wykonanych obliczeń stwierdzono, iż metodą WPK można zredukować przekrój poprzeczny w bardzo dużym zakresie (do 80% co odpowiada średniemu stopniowi gniotu  $\delta_{sr} = 2,24$ ). Są to wartości podobne do uzyskiwanych w typowych procesach WPK, realizowanych z wykorzystaniem wsadu walcowego. Ponadto, zgodnie z oczekiwaniami wykazano, iż kształtowanie metodą WPK z większą redukcją przekroju poprzecznego pociąga za sobą wzrost intensywności odkształcenia w odwalcowanym stopniu odkuwki. Większe jest również skrócenie warstw metalu w tej części wyrobu.



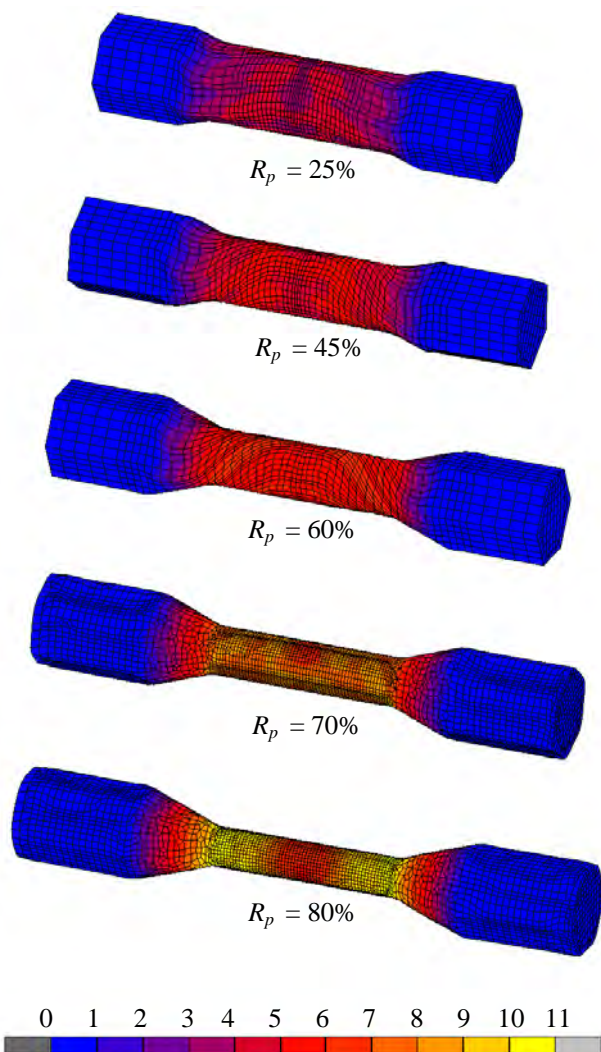
**Rys. 4.13.** Zmiana kształtu przekroju poprzecznego w procesie WPK z wsadu kształtowego (o przekroju poprzecznym kwadratowym i sześciokątnym) przy:  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=7^\circ$  oraz  $R_p=60\%$



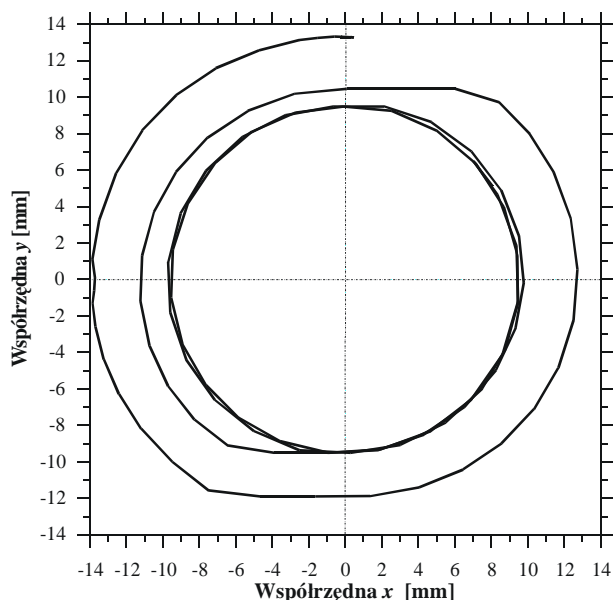
**Rys. 4.14.** Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwkach walcowanych z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym, przy:  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz redukcji  $R_p$  podanej na rysunku

Interesująco przedstawiają się trajektorie opisujące przemieszczanie się węzła (początkowo zlokalizowanego na powierzchni zewnętrznej wsadu, w odległości  $r$  od środka obrotu) w analizowanych przypadkach WPK przebiegających przy redukcji przekroju poprzecznego wynoszącej 60%. Trajektorie te pokazano na kolejnych rysunkach 4.16 (WPK z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym) i 4.17 (WPK z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym). Z da-

nych zamieszczonych na tych rysunkach wynika, iż pożądaný kształt kołowy przekroju poprzecznego uzyskiwany jest w czasie około pięciu cykli odkształcenia. Dla porównania, podczas typowego procesu WPK klinami płaskimi z wsadu walcowanego do prawidłowego ukształtowania stopnia potrzebne są tylko 3 cykle odkształcenia [27]. Fakt ten jest kolejnym potwierdzeniem konieczności wydłużenia strefy kalibrowania w narzędziach stosowanych w procesach WPK z wsadu kształtowego.



**Rys. 4.15.** Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwkach walcowanych z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym, przy:  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz redukcji  $R_p$  podanej na rysunku

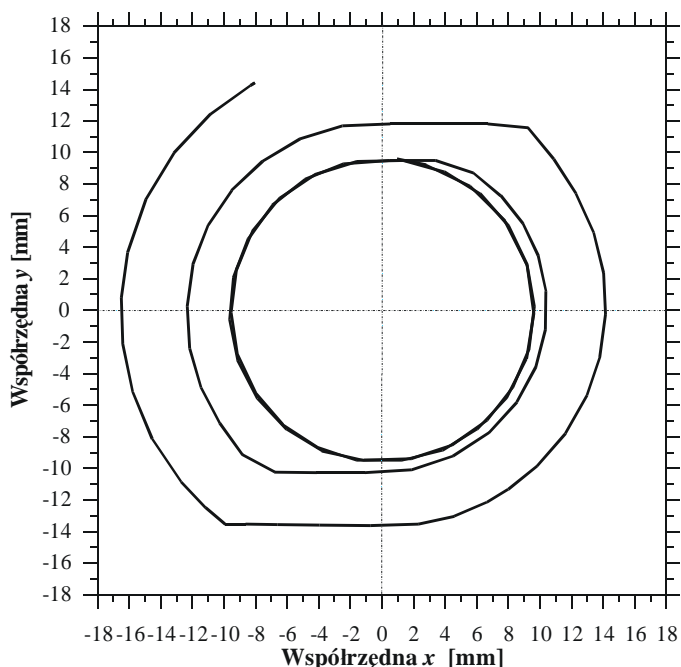


**Rys. 4.16.** Trajektoria przemieszczania wężła znajdującego się początkowo w odległości  $r=13,3$  mm od środka przekroju poprzecznego w procesie WPK z wsadu kwadratowego, przy  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz  $R_p=60\%$

Ciekawe spostrzeżenia nasuwa analiza obliczonych za pomocą MES rozkładów składowych siły walcowania: stycznej (wciskającej klin) oraz rozporowej (działającej prostopadle do powierzchni narzędzia). Pokazano je na rysunkach 4.18 (WPK z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym) oraz 4.19 (WPK z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym).

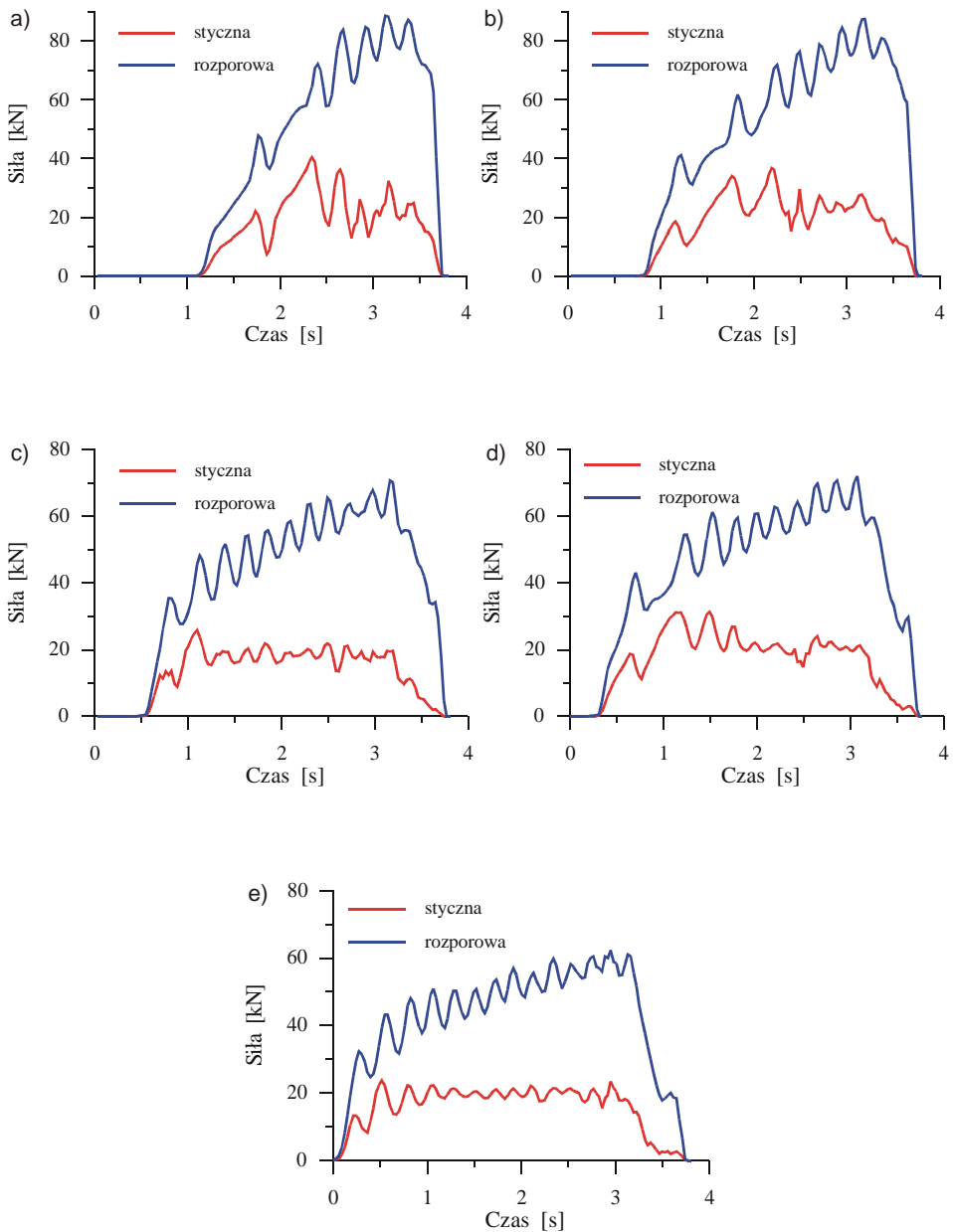
Cechą charakterystyczną otrzymanych przebiegów sił jest ich oscylacyjny (wahadłowy) charakter, będący następstwem zmian w wartościach gniotu bezwzględnego podczas walcowania. Oscylacje te są bardziej widoczne dla przypadków walcowania z wsadu kwadratowego, gdzie występują również większe zróżnicowania w wartościach gniotu bezwzględnego.

Pewne zaskoczenie może budzić fakt zmniejszania się sił (stycznej i rozporowej) w efekcie zwiększania redukcji przekroju poprzecznego. Bowiem w typowych procesach WPK zwiększeniu redukcji przekroju towarzyszy wzrost sił kształtowania. Wy tłumaczenia tego faktu należy upatrywać w trudnościach związanych z usuwaniem owalizacji w kształtowanym stopniu odkuwki, objawiającym się wydłużeniem strefy odkształcenia w tej części odkuwki. Powoduje to zwiększenie powierzchni kontaktu materiał-narzędzie, która jest tym większa im większa jest średnica stopnia walcowanego. Paradoksalnie więc przy mniejszej wartości redukcji  $R_p$  występuje większe pole powierzchni styku materiał – narzędziem, a w konsekwencji również większe są siły kształtowania.



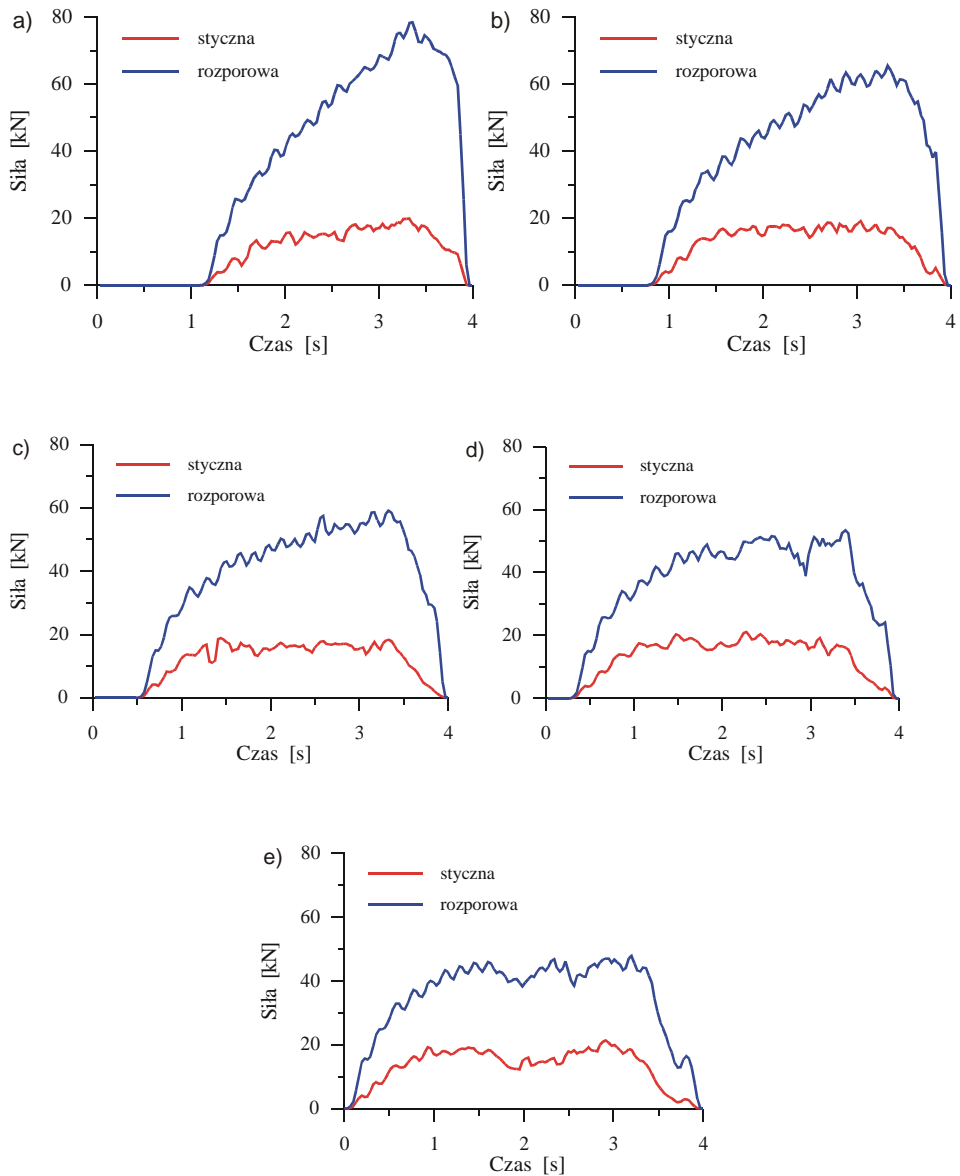
**Rys. 4.17.** Trajektoria przemieszczania węzła znajdującego się początkowo w odległości  $r=16,5$  mm od środka przekroju poprzecznego w procesie WPK z wsadu sześciokątnego, przy  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz  $R_p=60\%$

Proces WPK z wsadów kształtowych może być zakłócony w efekcie wystąpienia zjawisk ograniczających, identycznych jak w typowych procesach WPK, tj.: niekontrolowanego poślizgu, przewężenia walcowanego stopnia oraz pęknięcia metalu w strefie osiowej. Szczególnie niebezpieczny w procesach WPK z wsadu kształtowego przebiegających przy małej redukcji przekroju poprzecznego  $R_p$  jest niekontrolowany poślizg, w trakcie którego narzędzia ślizgają się po materiale (zdzierając jego warstwy wierzchnie) i niejednokrotnie powodują wyginanie wsadu i jego przesuwane po narzędziach, co może doprowadzić do uszkodzenia oprzyrządowania. Przykłady braków powstałych w procesach WPK z wsadu kształtowego, w następstwie wystąpienia niekontrolowanego poślizgu pokazano na rys. 4.20. Dla uniknięcia tego ograniczenia zaleca się prowadzić procesy WPK z wsadu kształtowego stosując redukcje przekroju poprzecznego  $R_p > 30\%$  (wartość ta jest większa od  $R_p=25\%$ , przy której procesy analizowane MES przebiegały stabilnie, gdyż w rzeczywistości nie ma tak dobrego prowadzenia wyrobu podczas walcowania jak w teorii; występują dodatkowe opory powodowane tarciem w podajniku, niewielkie przekoszenia i przesunięcia wsadu wynikające z luzu w podajniku itp.).



**Rys. 4.18.** Siły działające na narzędzie klinowe w procesie WPK z wsadu o przekroju poprzecznym kwadratowym przy  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz: a)  $R_p=25\%$ , b)  $R_p=45\%$ , c)  $R_p=60\%$ , d)  $R_p=70\%$ , e)  $R_p=80\%$

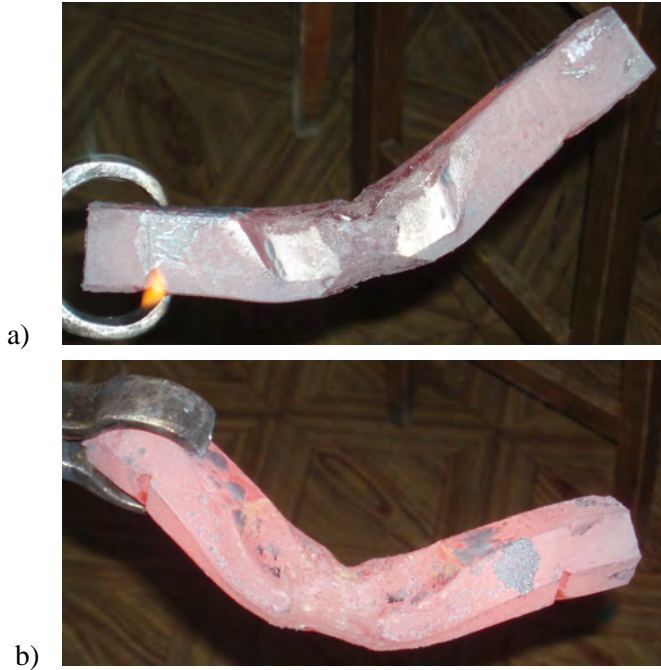
Wystąpienie pozostałych ograniczeń (przewężenia i pęknięcia metalu), można z powodzeniem prognozować stosując zależności (warunki) opracowane dla procesów typowych, które podane są w literaturze specjalistycznej [29, 37].



**Rys. 4.19.** Siły działające na narzędzie klinowe w procesie WPK z wsadu o przekroju poprzecznym sześciokątnym  $\alpha=20^\circ$ ,  $\beta=9^\circ$  oraz: a)  $R_p=25\%$ , b)  $R_p=45\%$ , c)  $R_p=60\%$ , d)  $R_p=70\%$ , e)  $R_p=80\%$



Należy przy tym pamiętać o zastępowaniu stopnia gniotu  $\delta$  występującego w tych zależnościach średnim stopniem gniotu  $\delta_{sr}$  – obliczanym z wzoru (3.1).



**Rys. 4.20.** Próbkę z wsadu kształtowego; a) kwadratowego; b) sześciokątnego zniszczone w wyniku wystąpienia zjawiska poślizgu, mającego miejsce przy zbyt małej wartości redukcji przekroju  $R_p$



## 5. Walcowanie wałków ze stopniem mimośrodowym

Mimośród to część maszyny w postaci tarczy okrągłej osadzonej na wale, której oś nie pokrywa się z osią wału. Części z mimośrodami są szeroko wykorzystywane w budowie maszyn. Używa się ich zwykle do zamiany ruchu obrotowego na ruch liniowy (np. w elementach zaciskowych) w takich maszynach jak: samochody osobowe, ciężarowe, ciągniki rolnicze. Części tego typu ze względu na charakter pracy muszą być wytrzymałe i odporne na odkształcenie.

Wały mimośrodowe o dużych gabarytach wykonuje się za pomocą kucia swobodnego (rys. 5.1), a w przypadku wyrobów mniejszych stosuje się na ogół kucie matrycowe. Pierwsza z podanych metod jest mało ekonomiczna, wymaga wysokich kwalifikacji od kowala i jest stosowana wyłącznie w produkcji małoseryjnej. Zastosowanie kucia matrycowego pozwoliło na: zwiększenie wydajności procesu, wzrost oszczędności materiału oraz polepszenie precyzji wykonania części (wadą tej metody jest zaś wysoki koszt matrycy oraz wieloetapowość procesu).



**Rys. 5.1.** Wał mimośrodowy dużych rozmiarów ukształtowany metodą kucia swobodnego

Wydaje się, że stosując metodę WPK można także kształtować wałki mające stopnie mimośrodowe. Za takim rozumowaniem przemawiają między innymi wyniki analizy literatury specjalistycznej [14, 18, 21].

## 5.1. Nowe metody kształtowania wałków mimośrodowych

Elementy mimośrodowe kształtowano dotychczas głównie metodami kucia swobodnego lub matrycowego. Jednakże wraz z rozwojem techniki opracowywano nowe metody kształtowania części tego typu. Należy zaliczyć do nich kucie mimośrodu w trójsuwakowej prasie kuźniczej (TPK) oraz walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) wałków mimośrodowych.

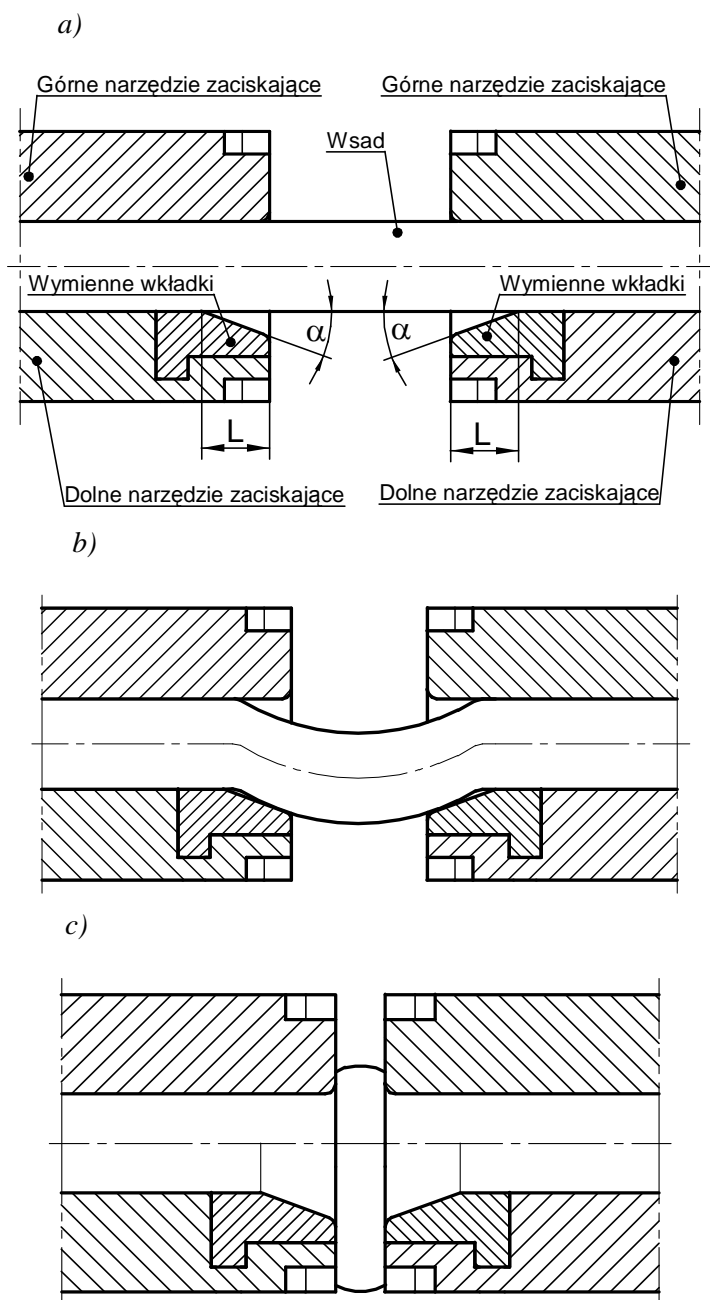
Kucie w trójsuwakowej prasie kuźniczej [57] części z mimośrodem pokazano na rys. 5.2. Komplet narzędzi zabezpieczających tę technologię kształtowania składa się z dwóch górnych i dwóch dolnych matryc zaciskających (mających specjalne wybrania). W początkowej fazie procesu przez ukształtowanie narzędzi wymuszone jest wyboczenie wsadu w części środkowej, która następnie jest स्पेczzana. W efekcie takiego działania w tej części odkuwki powstaje mimośród. Można go opisać za pomocą ramienia  $e$ , w sposób zgodny z rys. 5.3. Na podstawie badań numerycznych i eksperymentalnych [57] stwierdzono, iż wartość ramienia mimośrodu  $e$ , możliwego do otrzymania w procesie kucia w prasie trójsuwakowej zależy od wcięcia wykroju  $L$  oraz kąta pochylenia wcięcia  $\alpha$  (patrz rys. 5.2) i zgodnie z zależnością:

$$e = (0,229 + 0,178\alpha)(0,080 + 0,067L). \quad (5.1)$$

Walcowanie poprzeczno-klinowe wg sposobu opracowanego w Chinach [18] polega na ukształtowaniu wyrobu osiowo-symetrycznego i następnym oddziaływaniu na jego poszczególne stopnie siłami powodującymi ich przemieszczenie w kierunku promieniowym (rys. 5.4).

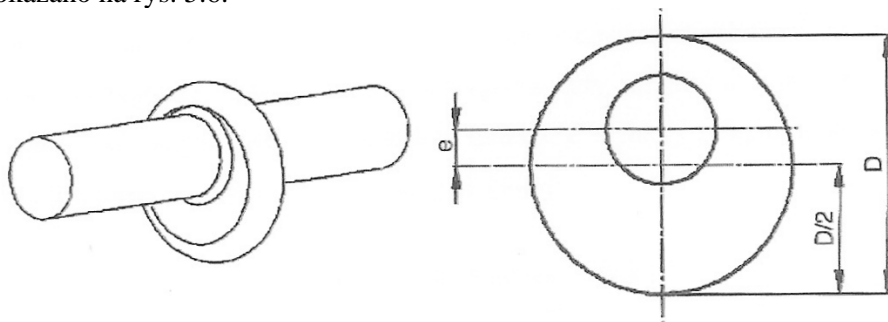
W celu sprawdzenia tej koncepcji walcowania wałków mimośrodowych wykonano szereg analiz, dotyczących procesu walcowania wałka (ze wsadem o średnicy  $\varnothing 30$  mm) mającego stopień centralny o średnicy  $\varnothing 16$  przesunięty mimośrodowo o wartość  $e$  (równą 2, 3 lub 4 mm).

Do ukształtowania wałka ze stopniem mimośrodowym o szerokości 30 mm rozważano użycie narzędzi o konstrukcji pokazanej na rys. 5.5. Mają one budowę typowych narzędzi do WPK, które dodatkowo za strefą kalibrowania są wyposażone w specjalne wkładki mające wywołać przemieszczenie promieniowe stopnia kształtowanego odkuwki.

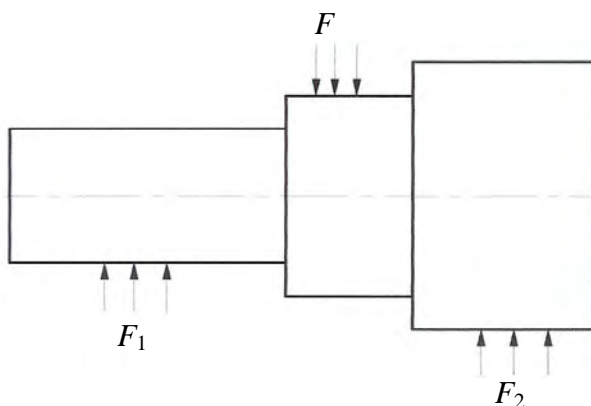


**Rys. 5.2.** Schemat kształtowania mimośrodru w prasie trójswakowej: a) zaciśnięcie wsadu, b) wyboczenie materiału spęczanego, c) etap końcowy procesu (spęczanie mimośrodu)

Sprawdzenie podanej koncepcji walcowania stopnia mimośrodowego przeprowadzono w oparciu o modelowanie numeryczne. Zbudowano szereg modeli geometrycznych procesów walcowania odkuwki z wsadu cylindrycznego, dwoma przemieszczającymi się przeciwnie klinami płaskimi, z których jeden pokazano na rys. 5.6.



Rys. 5.3. Wał mimośrodkowy wraz z zaznaczonym ramieniem mimośrodu  $e$

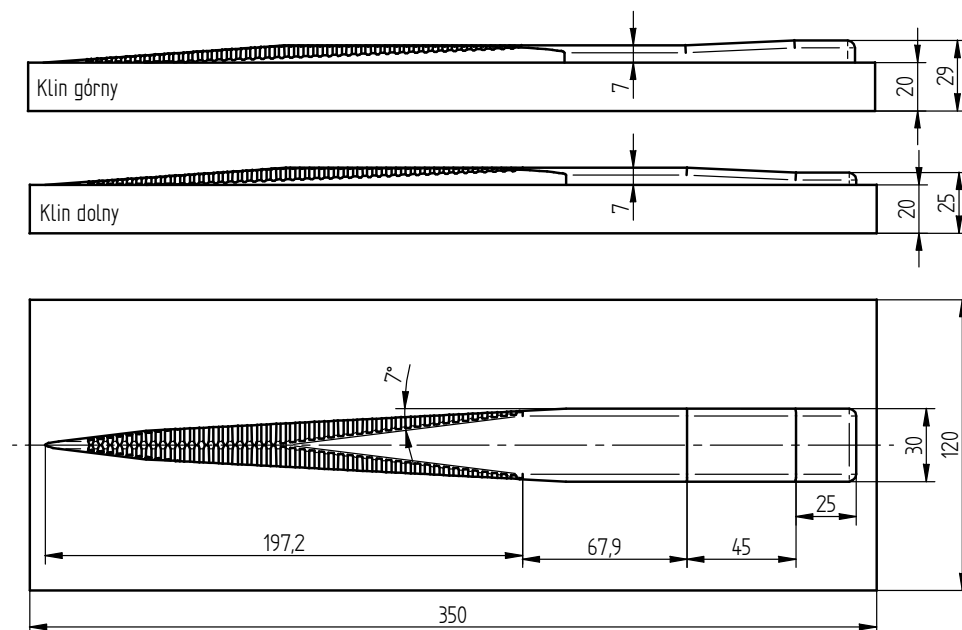


Rys. 5.4. Siły działające na wyrób walcowany podczas kształtowania stopnia mimośrodowego wg [18]

Analizując przebieg procesu WPK za pomocą takiego narzędzia (rys. 5.7) można stwierdzić, że przebiega on stabilnie (bez zakłóceń) do momentu wytworzenia części będącej bryłą osiowo-symetryczną. W końcowej fazie procesu, gdy kształtowany jest mimośród dochodzi do niepożądanego wygięcia kształtowanego stopnia środkowego. Wygięcie to jest tym większe im większe jest ramię mimośrodu  $e$ . Ponadto, zwiększeniu ramienia  $e$  towarzyszy wzrost zniekształcenia odkuwki kształtowanej – dobrze widoczny na rys. 5.8.

## 5.2. Walcowanie mimośrodowe wg koncepcji własnej

W procesie WPK wyrób kształtowany jest w efekcie oddziaływania narzędzi (klinów), przemieszczających się przeciwnie, które stopniowo wciskając się we wsad (odcinek pręta) powodują jego obrót dookoła osi obrotu. Wystarczy zatem spowodować by położenie osi wsadu podczas wcinania się klinów uległo zmianie (w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ruchu narzędzi) aby kliny wdrażały się we wsad mimośrodowo w stosunku do jego osi. Efekt ten można uzyskać wykorzystując w początkowej fazie procesu WPK specjalne wkładki prowadzące (prowadnice), usytuowane w narzędziu w sposób pokazany na rys. 5.9. Zarys wkładki prowadzącej zależy od rozmiaru ramienia mimośrodowego  $e$  oraz od promienia wsadu  $r_0$ .



**Rys. 5.5.** Zestaw narzędzi klinowych (charakteryzowanych kątem kształtującym  $\alpha=30^\circ$ ) do walcowania odkuwki z przewężeniem o szerokości 30 mm i średnicy  $\varnothing 16$  mm oraz mimośrodem  $e = 2$  mm

Można go obliczyć (dla układu zgodnego z rys. 5.9) korzystając z następujących zależności:

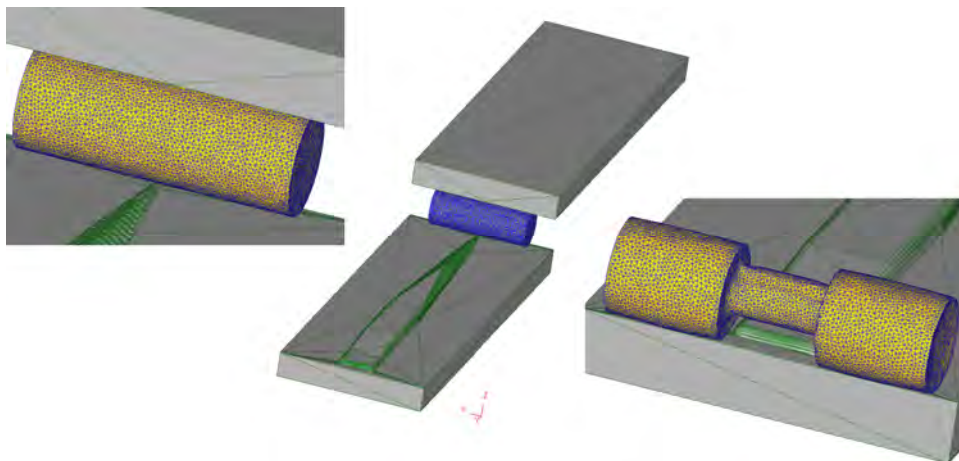
- prowadnica górna

$$y = r_0 + e \sin \frac{x}{r_0}, \quad (5.2)$$

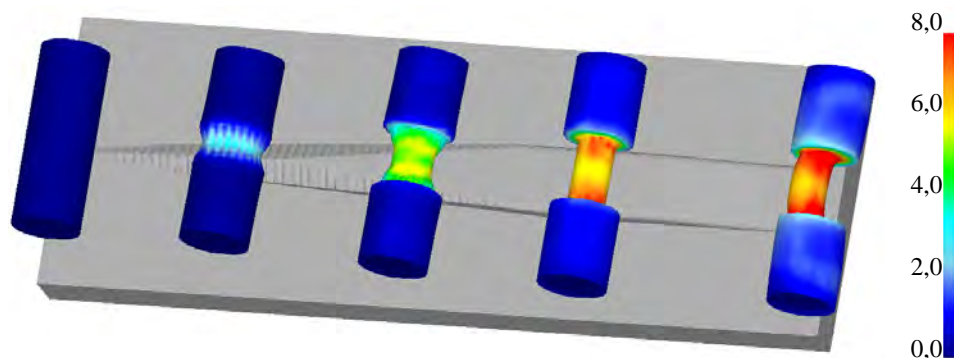
□ prowadnica dolna

$$y = -r_0 + e \sin \frac{-x}{r_0}. \quad (5.3)$$

Założono, że dla odwalcowania pełnego mimośrodowego wkładki prowadzące muszą oddziaływać na wsad na długości zapewniającej wykonanie przez niego przynajmniej jednego obrotu.



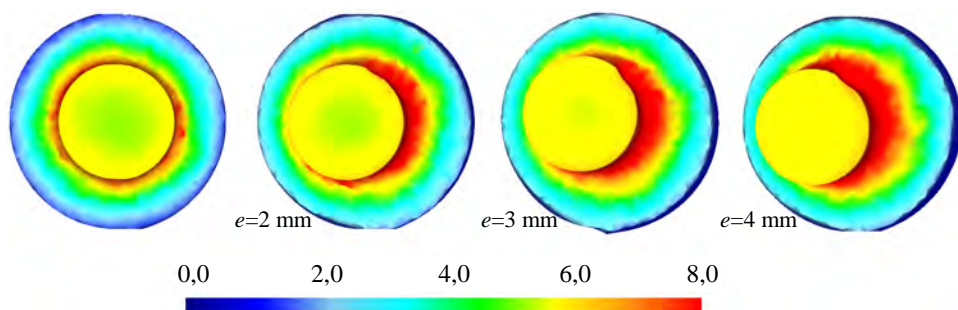
**Rys. 5.6.** Model geometryczny procesu WPK walca mimośrodowego, realizowanego wg pomysłu podanego w pracy [18], oraz podział elementu kształtowanego na elementy



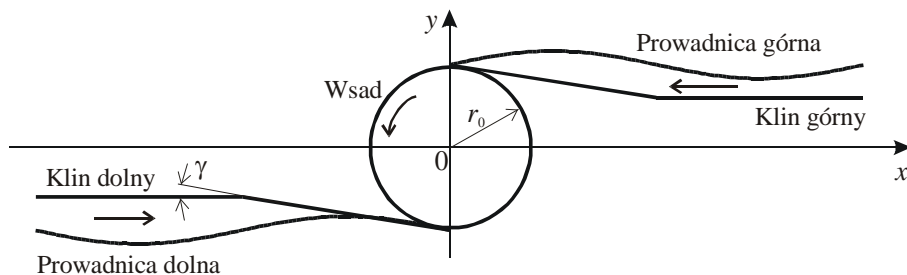
**Rys. 5.7.** Progresa kształtu odkuwki ze stopniem mimośrodowym, charakteryzowanym przez  $e=4$  mm, kształtowanym wg sposobu podanego w pracy [18]



Przykład segmentu narzędziowego zabezpieczającego realizację procesu WPK wałka z ramieniem mimośrodowym  $e = 2,5$  mm pokazano na rys. 5.10. Klin ten charakteryzowany jest przez kąt rozwarcia klina  $\beta = 6,5^\circ$  oraz kąt kształtujący  $\alpha = 30^\circ$ . Ponadto, na powierzchniach bocznych ma wykonane nacięcia technologiczne, mające na celu zwiększenie tarcia na powierzchni kontaktu materiał-narzędzie. Wymiary klina zostały tak dobrane by możliwe było jego zamontowanie w walcierce laboratoryjnej LUW-2.



**Rys. 5.8.** Kształt przekroju poprzecznego stopnia mimośrodowego (charakteryzowanego przez parametr  $e$ ), kształtowanego wskutek przepchnięcia stopnia cylindrycznego (rys. z lewej)

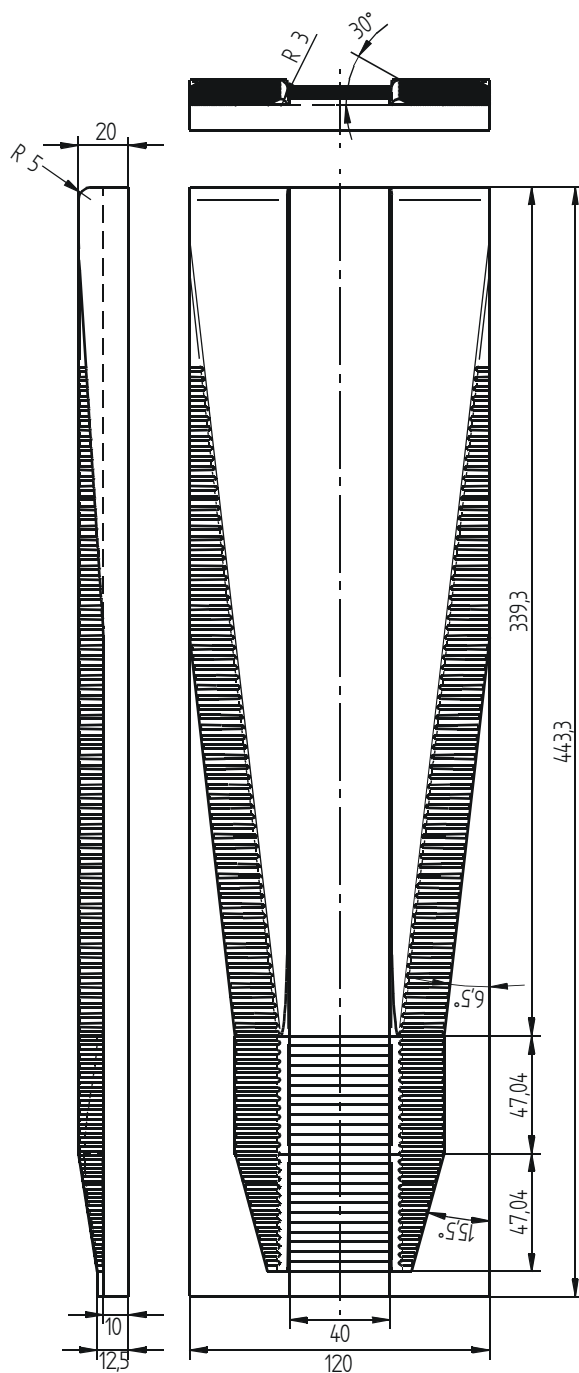


**Rys. 5.9.** Proponowany, nowy schemat procesu WPK wałka ze stopniem mimośrodowym

### 5.2.1. Analiza numeryczna

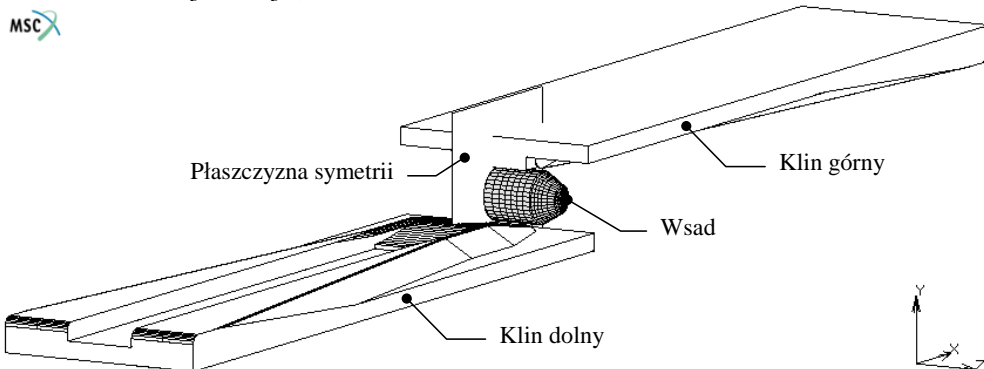
W celu sprawdzenia możliwości kształtowania wałka mimośrodowego wg proponowanej koncepcji, wykonano obliczenia numeryczne w programach MSC.SuperForm 2005 oraz DEFORM-3D. W trakcie obliczeń sprawdzono możliwość walcowania wałka (z wsadu o średnicy  $\text{Ø}30$  mm) mającego czopy (stopnie) boczne o średnicy  $\text{Ø}18$  mm, przesunięte mimośrodowo o wartość  $e = 2,5$  mm w stosunku do stopnia środkowego o średnicy  $\text{Ø}30$  mm.

Na rys. 5.10 pokazano model geometryczny procesu WPK, w którym ze względu na symetrię wzdłużną symulację ograniczono do  $\frac{1}{2}$  odkuwki.

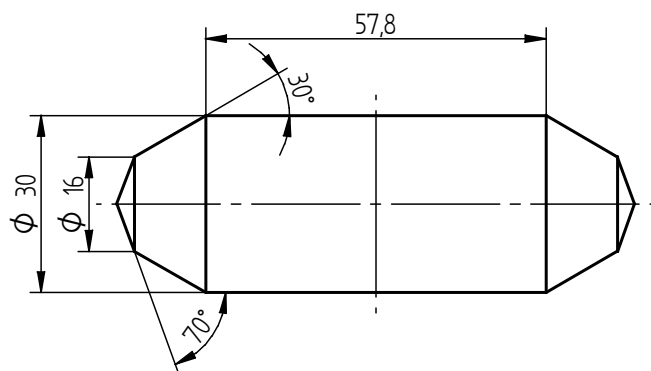


**Rys. 5.10.** Klin do WPK wałka ze stopniem centralnym o ramieniu mimośrodowym  $e=2,5$  mm, z zaznaczonymi ważniejszymi parametrami

W obliczeniach uwzględniono dwa rodzaje wsadu (o tej samej średnicy zewnętrznej), tj. walcowy z zakończeniami stożkowymi (wykonanymi zgodnie z rys. 5.11) oraz cylindryczny o wymiarach  $\text{Ø}30 \times 77 \text{ mm}$ . Na potrzeby obliczeń założono, że: wsad wykonany ze stali w gatunku C45 nagrzewany jest do temperatury  $1150^\circ\text{C}$ , narzędzia w czasie kształtowania mają stałą temperaturę  $50^\circ\text{C}$  i poruszają się przeciwnie z prędkością  $0,125 \text{ m/s}$ ; współczynnik wymiany ciepła między metalem a narzędziami wynosi  $5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ , a między metalem a otoczeniem  $0,2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ , czynnik tarcia na powierzchni styku metal-narzędzie ma wartość stałą równą  $1,0$ .



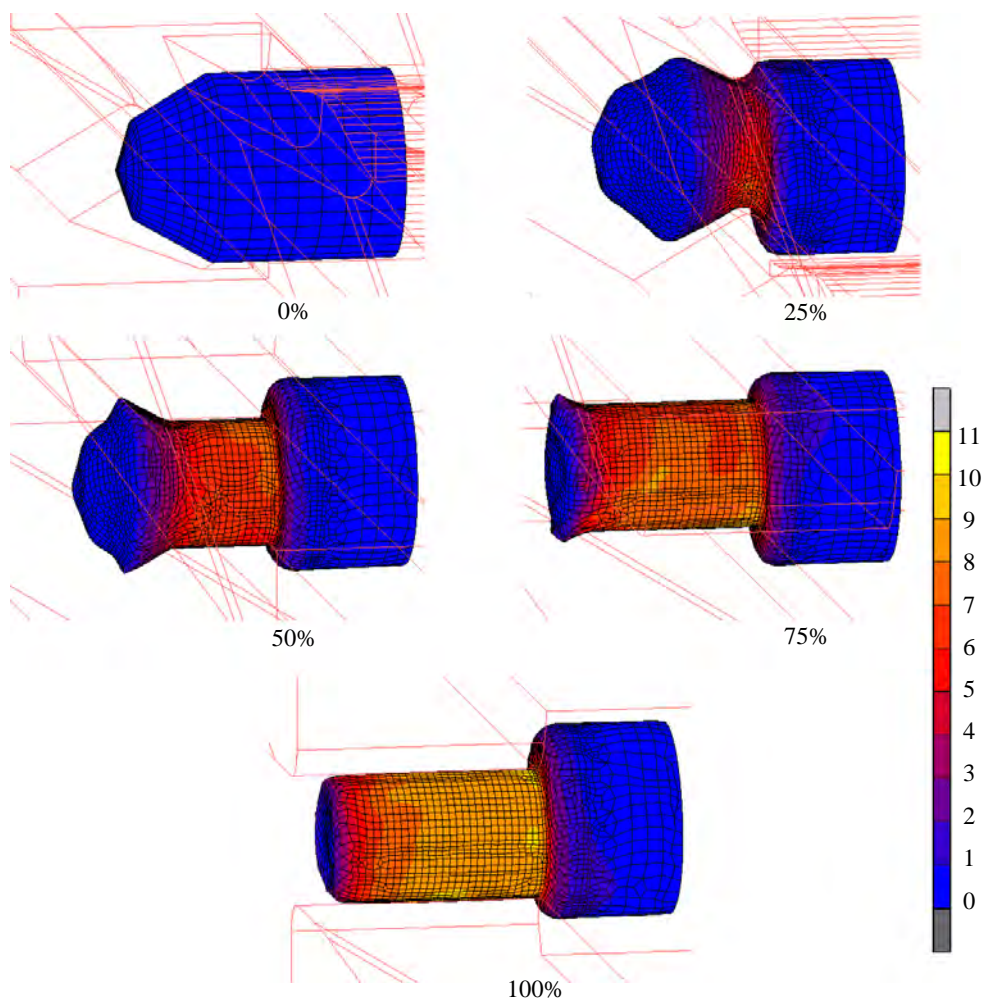
**Rys. 5.11.** Model procesu WPK (zbudowany w programie MSC.SuperForm 2005) wałka mającego stopień centralny przesunięty mimośrodowo względem stopni skrajnych



**Rys. 5.12.** Wymiary wsadu walcowego z zakończeniami stożkowymi, przyjmowanego w analizie numerycznej procesu walcowania wałka mimośrodowego

W efekcie wykonanych obliczeń (w programie MSC.SuperForm) prześlędzono jak zmienia się kształt odkuwki w obu analizowanych przypadkach WPK. Stwierdzono, że wkładki prowadzące umożliwiają skuteczne wcięcie się klinów

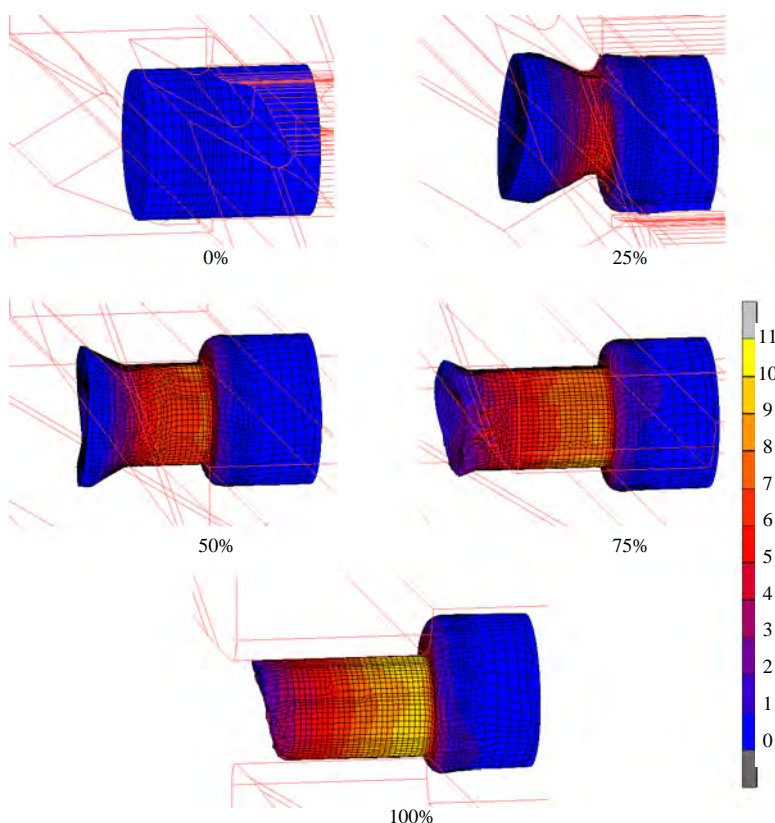
we wsad mimośrodowo w stosunku do jego osi. Dalszy przebieg kształtowania (po wyjściu z wkładek prowadzących) jest stabilny i nie zniekształca mimośrodowo. Zauważono także, iż stosowanie wsadu z zakończeniami stożkowymi jest korzystne, gdyż otrzymana w tej sytuacji powierzchnia czołowa odkuwki jest względnie prostopadła do osi stopnia odkuwki kształtowanej – rys. 5.13. Natomiast wtedy, gdy walcuje się z wsadu walcowego, powierzchnia czołowa jest nieregularna i wklęsła (rys. 5.14), co pociąga za sobą konieczność stosowania noży odcinających niezbędnych do usunięcia końców odkuwek zdeformowanych przez lej czołowy - rys. 5.15.



**Rys. 5.13.** Progresja kształtu odkuwki walcowanej (przy  $e=2,5$  mm) z wsadu zukosowanego z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

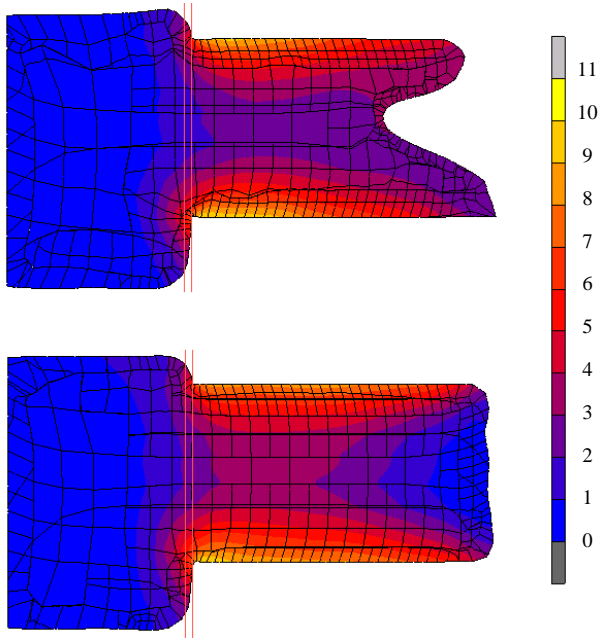
Na podstawie tego rysunku można także wnioskować, iż charakter płynięcia w analizowanym procesie WPK jest powierzchniowy. Odształcenia układają się koncentrycznie i przyjmują wartości największe w pobliżu powierzchni zewnętrznej stopnia walcowanego. Jest to charakterystyczne dla procesów WPK.

Pomyślne rezultaty obliczeń uzyskanych z symulacji wykonanych w programie MSC.SuperForm 2005 wpłynęły na decyzję o rozszerzeniu obliczeń, które wykonano w środowisku programu DEFORM-3D. Obliczeniami tymi objęto przypadki walcowania z wsadów ze zukosowanymi końcami, kształtowanych przy założeniu, że  $e = 1,5; 2,5$  oraz  $3,5$  mm. W symulacjach przyjęto identyczne parametry procesu z zakładanymi w symulacjach przeprowadzonych w systemie MSC.SuperForm. Równocześnie w obliczeniach stosowano rozbudowane modele narzędzi, które ujmowały zarówno promienie zaokrągłeń jak i wprowadzone na powierzchniach bocznych nacięcia technologiczne. Jeden z przyjętych dla tych obliczeń modeli geometrycznych procesu WPK wałka mimośrodowego pokazano na rys. 5.16.



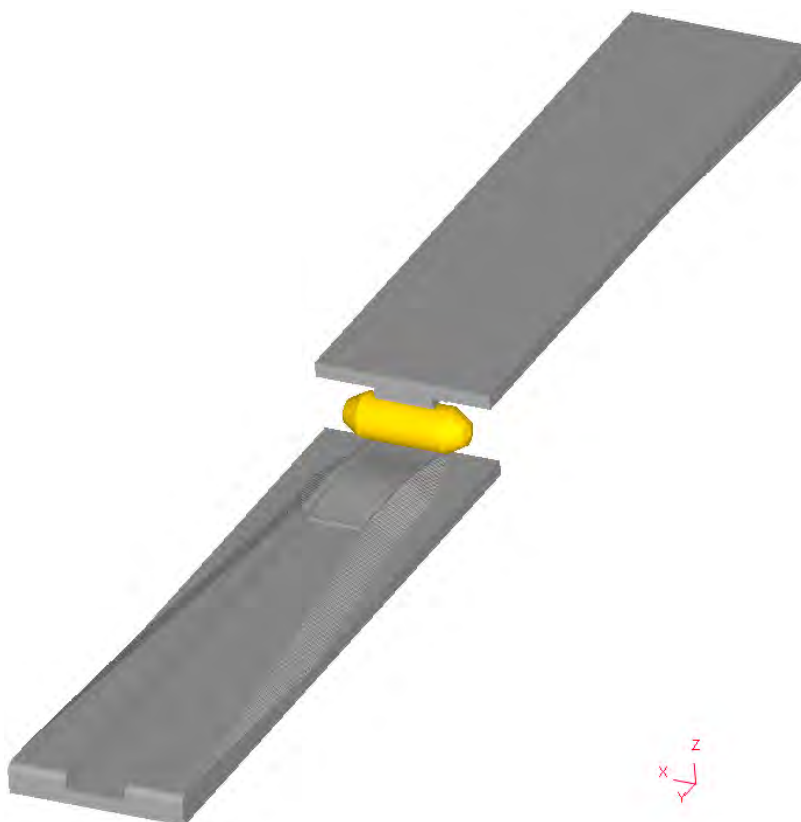
**Rys. 5.14.** Progresja kształtu odkuwki walcowanej (przy  $e=2,5$  mm) z wsadu walcowego z zaznaczonym rozkładem intensywności odształcenia

W efekcie wykonanych obliczeń w programie DEFORM-3D prześlędzono jak zmienia się kształt odkuwki w procesie WPK wałka mimośrodowego, realizowanym wg koncepcji własnej. Wyniki tych obliczeń są zgodne z otrzymanymi w systemie MSC.SuperForm i potwierdzają skuteczność opracowanej metody kształtowania wałków mimośrodowych. Ponadto pokazują one, że mimo znacznego czasu kształtowania temperatura metalu utrzymuje się w zakresie właściwym dla procesów obróbki plastycznej na gorąco. Najmniejsza temperatura występuje w warstwach przypowierzchniowych stopni odwalcowanych, co jest dobrze widoczne na rys. 5.18. Można przypuszczać, iż jest to efektem intensywnego odprowadzania ciepła z odkuwki do narzędzi, który jest jednakże łagodzony przez zamianę na ciepło pracy odkształcenia plastycznego oraz pracy tarcia.

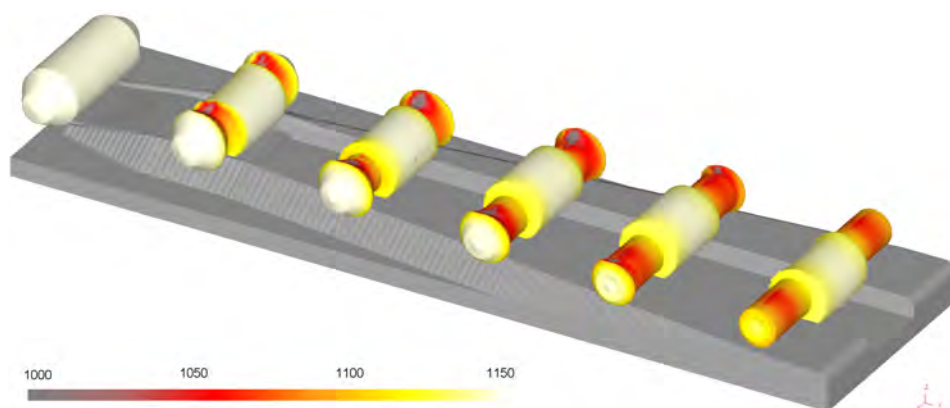


**Rys. 5.15.** Przekroje wzdłużne ½ odkuwek walcowanych przy  $e=2,5$  mm z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

Na kolejnym rys. 5.19 pokazano rozkłady kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama, wyznaczone dla analizowanej odkuwki wałka mimośrodowego (z ramieniem  $e = 2,5$  mm). Otrzymane rezultaty obliczeń wskazują, iż w analizowanym procesie WPK nie ma większego niebezpieczeństwa pęknięcia metalu niż w typowych procesach WPK. Zatem dla przewidywania możliwości wystąpienia pęknięcia metalu w procesie WPK wałków mimośrodowych można stosować wytyczne opracowane dla konwencjonalnych procesów WPK.

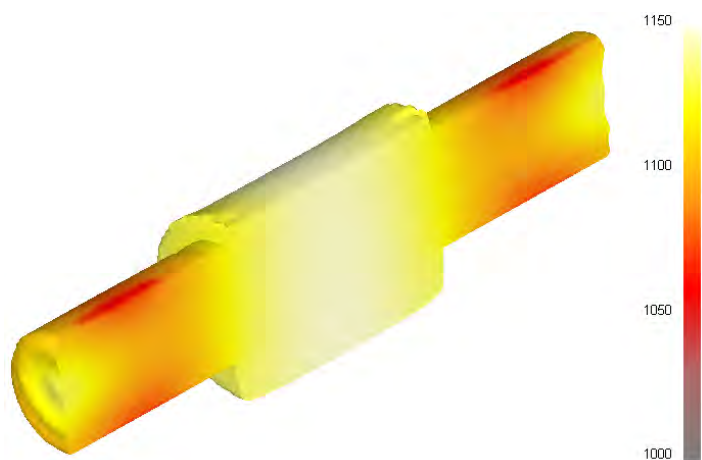


**Rys. 5.16.** Model geometryczny MES procesu WPK wałka mimośrodowego, zbudowany w programie DEFORM-3D

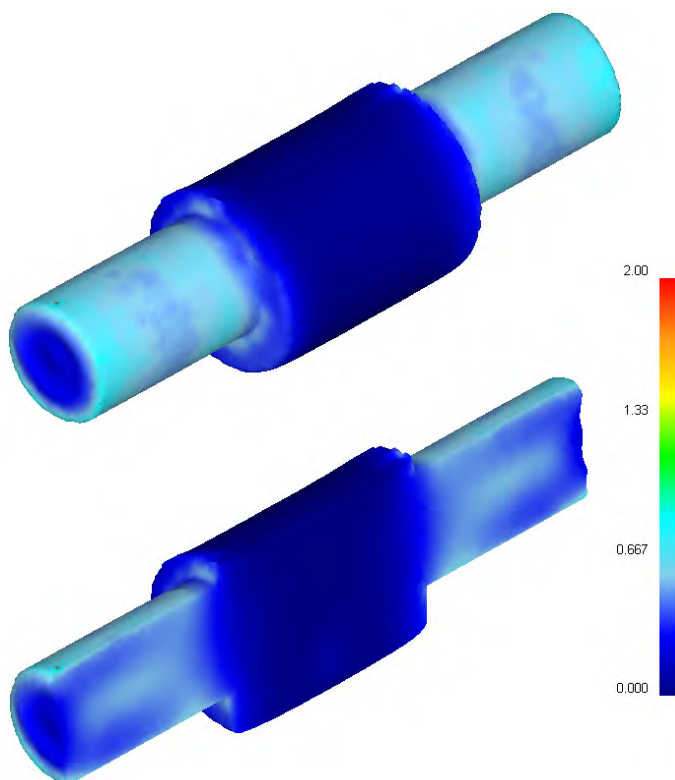


**Rys. 5.17.** Zmiana kształtu odkuwki w procesie WPK wałka mimośrodowego, z zaznaczonym rozkładem temperatury metalu





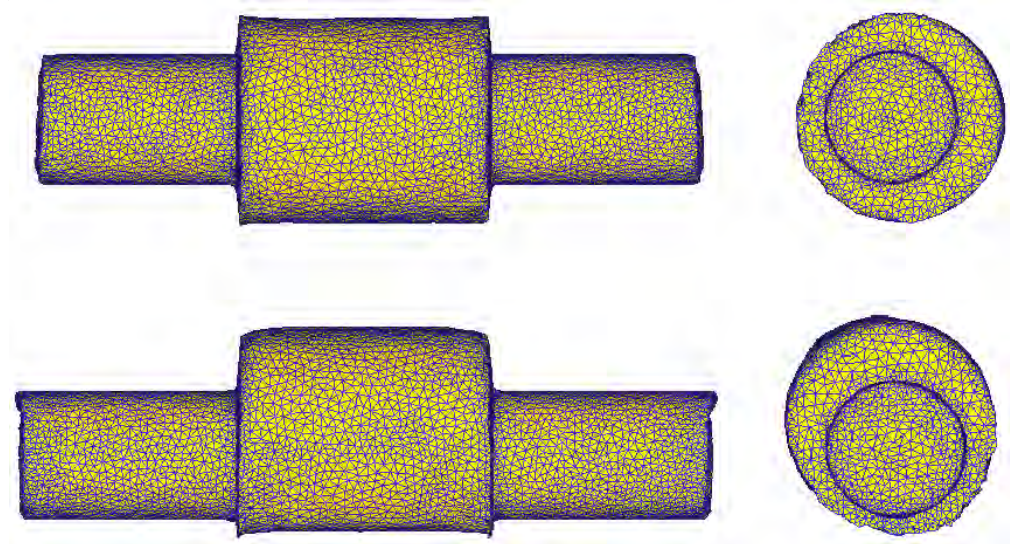
**Rys. 5.18.** Rozkład temperatury (w °C) w przekroju wzdłużnym wałka mimośrodowego otrzymanego metodą WPK



**Rys. 5.19.** Rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama, obliczony dla wałka kształtowanego metodą WPK przy  $e=2,5$  mm



Należy jednakże zauważyć, że zwiększenie ramienia mimośrody  $e$  powoduje wzrost trudności w realizacji procesu WPK. Przejawia się on w większym zniekształceniu przekroju poprzecznego wsadu, przemieszczanego pionowo w początkowej fazie procesu WPK. Efekt ten jest dobrze widoczny na rys. 5.20, na którym pokazano prognozowane numerycznie kształty wałków walcowanych przy  $e = 1,5$  mm oraz  $e = 3,5$  mm.

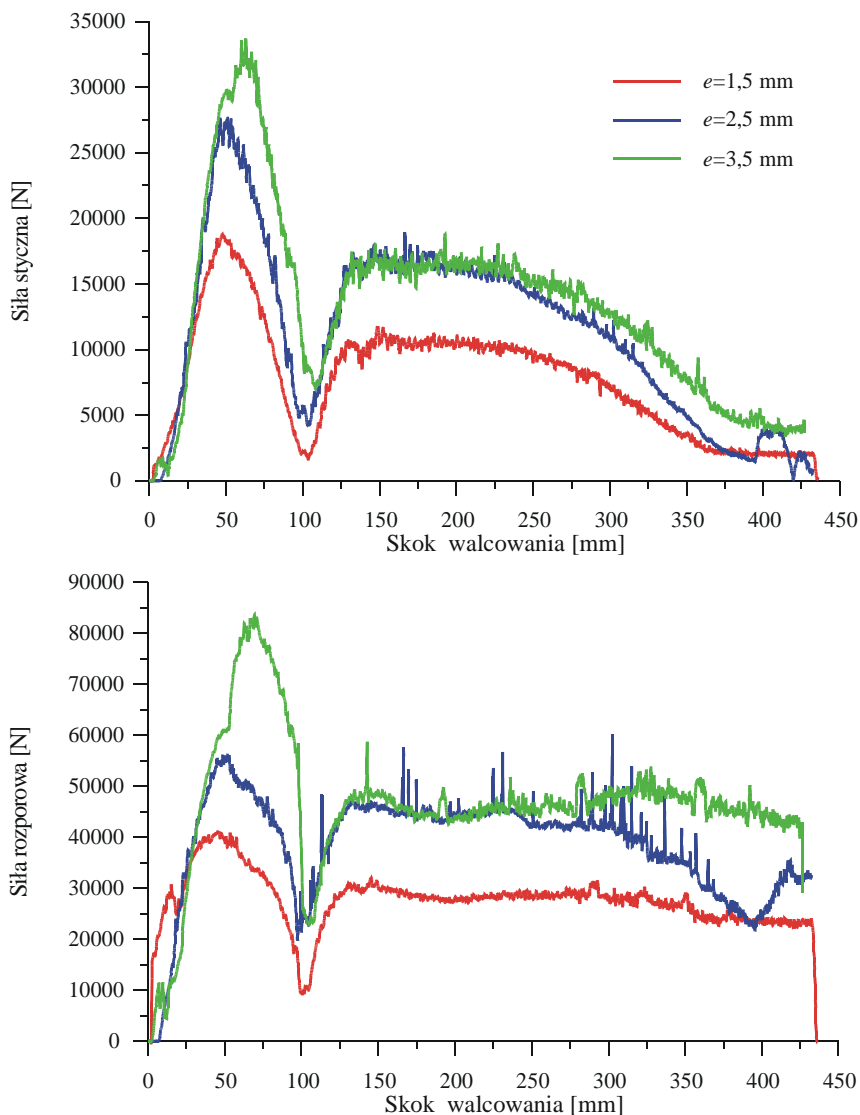


**Rys. 5.20.** Prognozowany numerycznie kształt wałków otrzymanych (w efekcie zastosowania procesu WPK) charakteryzowanych rozmiarem mimośrody  $e=1,5$  mm (rys. górny) oraz  $e=3,5$  mm (rys. dolny)

Na rys. 5.21 pokazano obliczone numerycznie rozkłady sił kształtowania dla analizowanych przypadków WPK. Stwierdzono, że zastosowanie wkładek prowadzących znajduje swe odzwierciedlenie w odnotowanych rozkładach sił. Mianowicie siły maksymalne (styczna – wciskająca klin oraz rozporowa – prostopadła do płaszczyzny ruchu narzędzia) występują podczas mimośrodowego wcinania narzędzi we wsad. Można zatem przypuszczać, iż ta faza procesu jest najbardziej podatna na wystąpienie zakłóceń (np. niekontrolowanego poślizgu). Natomiast w dalszej fazie procesu (podczas kształtowania stopni skrajnych) siły utrzymują względnie stałą wartość, która nie odbiega w sposób zasadniczy od wartości odnotowywanych w typowych procesach WPK. Ponadto, zgodnie z rys. 5.21 można stwierdzić, że zwiększenie ramienia mimośrody  $e$  powoduje wzrost sił kształtowania, co pociąga za sobą wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia zakłóceń stabilności procesu WPK wałka mimośrodowego.

## 5.2.2. Laboratoryjne próby walcowania

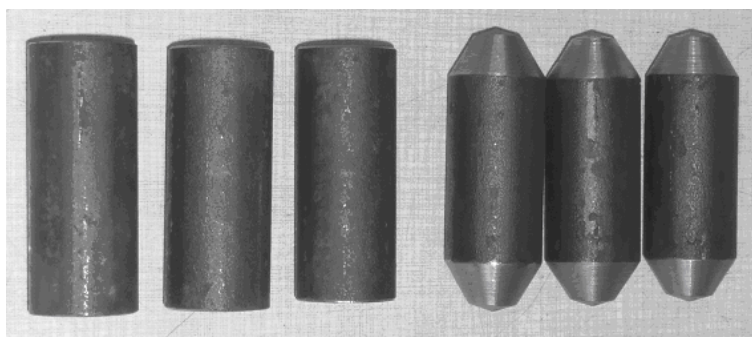
Pomyślne wyniki analizy numerycznej zadecydowały o przeprowadzeniu prób laboratoryjnych, mających na celu ostateczne potwierdzenie możliwości kształtowania wałków mimośrodowych wg zaproponowanej koncepcji. Badania te wykonano w oparciu o walcarkę płaskoklinową LUW-2, znajdującą się w Politechnice Lubelskiej.



**Rys. 5.21.** Obliczone numerycznie rozkłady sił w procesach walcowania wałków mimośrodowych, kształtowanych z wsadu ze ścięciami stożkowymi

Parametry geometryczne wsadu (rys. 5.22) i narzędzi (rys. 5.23) przyjęto identycznie jak w wykonanej analizie numerycznej. Zastosowanie wymiennych wkładek prowadzących wsad w fazach wcinania i prowadzenia umożliwia wykorzystanie wykonanych narzędzi (klinów) do kształtowania wałków mimośrodowych, charakteryzowanych różną wartością ramienia  $e$ .

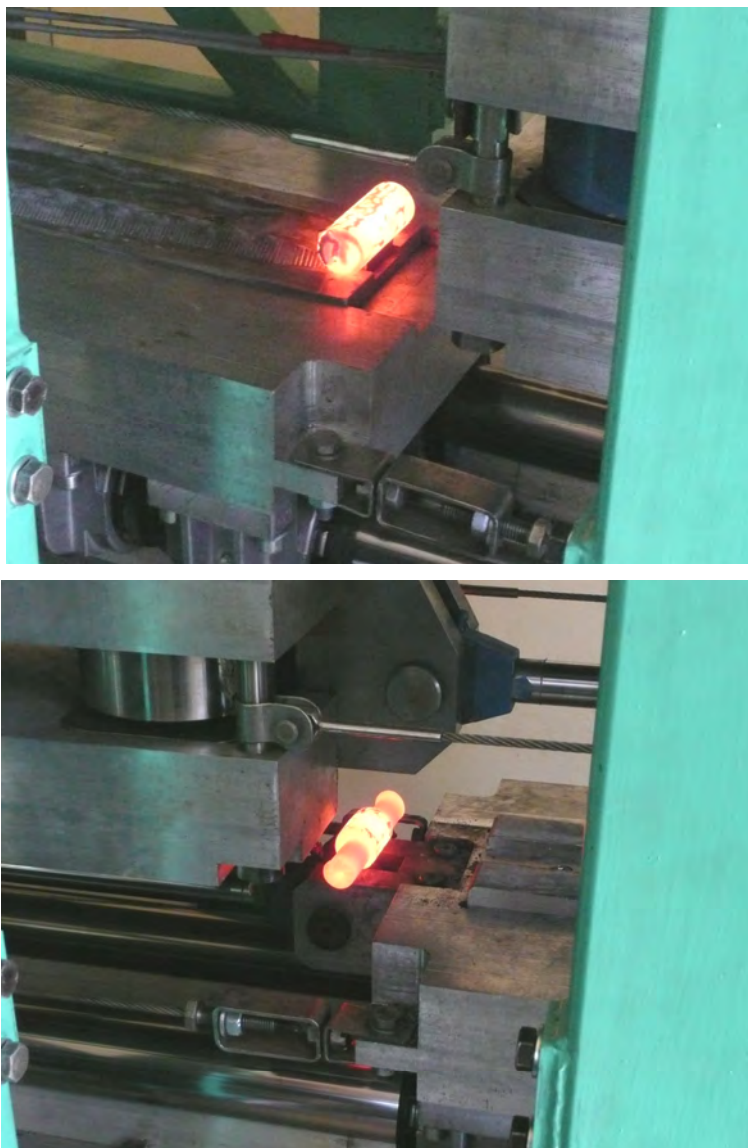
Korzystając z opracowanych narzędzi przeprowadzono próby walcowania wałka mimośrodowego (rys. 5.24). Na ich podstawie jednoznacznie stwierdzono, że możliwe jest kształtowanie wałków mimośrodowych proponowaną metodą WPK. Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych (w zakresie kształtu odwalcowanych odkuwek) pozostawały w bardzo dobrej zgodności z rezultatami otrzymanymi z obliczeń numerycznych.



**Rys. 5.22.** Widok próbek cylindrycznych oraz z końcami sfazowanymi (zgodnie z rys. 5.12) wykorzystanych w próbach laboratoryjnych walcowania



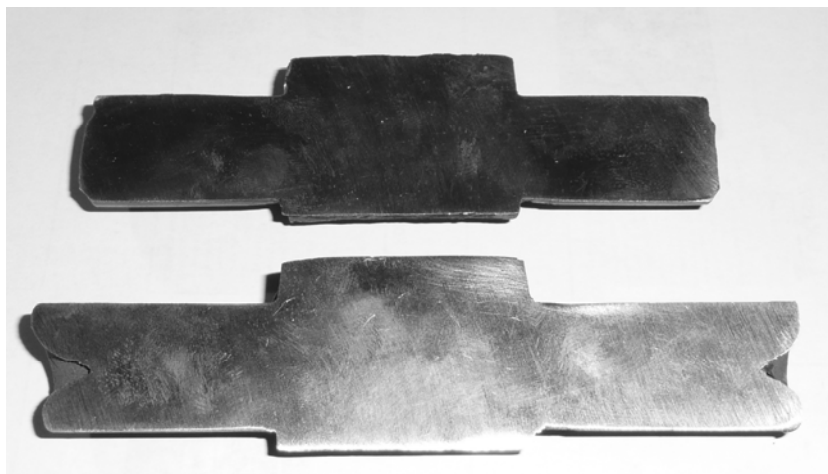
**Rys. 5.23.** Widok narzędzi wykonanych w celu sprawdzenia możliwości kształtowania metodą WPK wałka ze stopniem mimośrodowym, charakteryzowanym wartością ramienia mimośrodu  $e=2,5$  mm



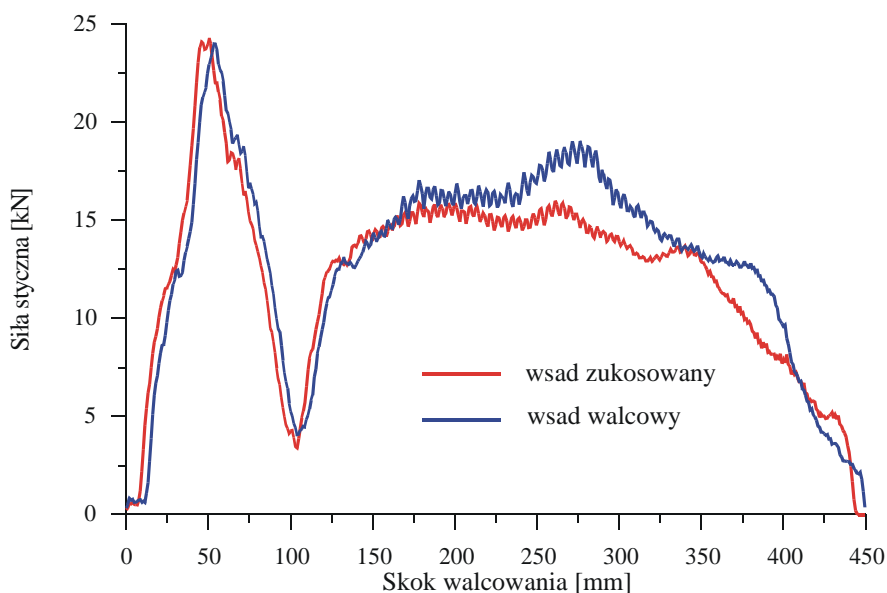
**Rys. 5.24.** Przebieg procesu walcowania wałka mimośrodowego (z wsadu walcowego), przeprowadzonego w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych stwierdzono, że stosowanie podczas walcowania wsadów z zakończeniem stożkowym prowadzi do otrzymywania wałków z równą powierzchnią czołową. Natomiast wówczas, gdy kształtowanie prowadzi się z wsadu walcowego dochodzi do utworzenia w powierzchni czołowej wałka niepożądanego leja (te części odkuwki należy usunąć

w dodatkowej operacji cięcia). Jest to dobrze widoczne na rys. 5.25, na którym zestawiono przekroje wzdłużne odkuwek ukształtowanych z wsadów cylindrycznego oraz mającego końce fazowane zgodnie z rys. 5.12.



**Rys. 5.25.** Przekroje wzdłużne wałków mimośrodowych kształtowanych metodą WPK z wsadu cylindrycznego (rys. dolny) oraz z wsadu zukosowanego (rys. górny)



**Rys. 5.26.** Zmierzone w próbach laboratoryjnych rozkłady siły stycznej podczas walcowania wałków mimośrodowych, charakteryzowanych przez  $e=2,5$  mm

W trakcie badań doświadczalnych rejestrowano również siły kształtowania. Na rys. 5.26 pokazano rozkłady siły stycznej (wciskającej klin) zmierzone podczas walcowania wałków mimośrodowych z wsadu walcowego i stożkowego. Stwierdzono, że wartość maksymalna sił kształtowania nie zależy od rodzaju zastosowanego wsadu (nieznaczne różnice między siłami wystąpiły w końcowej fazie procesu, tj. podczas wyjścia strefy odkształcenia na czoło wyrobu). Z porównania rozkładów sił obliczonych (rys. 5.21 dla  $e=2,5$  mm) i zmierzonych (rys. 5.26) wynika dobra zgodność jakościowa, świadcząca o prawidłowo przeprowadzonej symulacji komputerowej.

## 6. Walcowanie wałków zębatach

Wieńce zębata mogą być skutecznie wytwarzane metodami obróbki plastycznej. W tym celu wykorzystywane są następujące metody kształtowania plastycznego metali [44, 52]:

- ❑ kucie na gorąco,
- ❑ kucie na zimno i wyciskanie,
- ❑ przepychanie, wgniatanie i przeciąganie,
- ❑ zgniatanie na kowarkach rotacyjnych,
- ❑ wykrawanie dokładne,
- ❑ walcowanie na zimno uzębień w przyrządach,
- ❑ walcowanie styczne,
- ❑ walcowanie na zimno w walcarkach dwuroolkowych,
- ❑ walcowanie trzema rolkami napędzanymi,
- ❑ walcowanie na zimno z równoczesnym poosiowym ściskaniem,
- ❑ walcowanie uzębień ślimakami (metoda Maag),
- ❑ walcowanie zębatkami (metoda Roto-Flo),
- ❑ walcowanie kół zębatach na gorąco w walcarkach dwuwalcowych.

Spośród wyżej wymienionych metod największe znaczenie ma kucie i walcowanie. Obie te metody zaczęto stosować do kształtowania wieńców kół zębatach już w wieku XIX. Jednakże poważny rozwój kształtowania plastycznego kół zębatach rozpoczął się dopiero w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Należy przy tym zauważyć, iż kształtowanie uzębienia jest na ogół oddzielną operacją kuźniczą i wymaga zastosowania specjalnych maszyn i urządzeń.

Zwiększeniu efektywności wytwarzania służy ograniczenie ilości stosowanych operacji (zabiegów) co pociąga za sobą skrócenie czasu produkcji, zmniejszenie ilości maszyn i urządzeń oraz obniżenie kosztów wytwarzania.

Jednymi z częściej wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym wyrobów są wałki stopniowane z wieńcami zębatach. Części tego typu wytwarza się metodami obróbki skrawaniem z odkuwek matrycowych. Unowocześnienia wytwarzania wyrobów tego typu można upatrywać w połączeniu zabiegów kształtowania plastycznego wałka i uzębienia. W tym celu można wykorzystać metodę walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) z sukcesem stosowaną w produkcji wyrobów typu stopniowanych osi i wałków. Należy wówczas wyposażyć narzędzia klinowe w specjalne wkładki umożliwiające kształtowanie uzębienia.



W niniejszym rozdziale przedstawia się wyniki analizy numerycznej i doświadczalnej w zakresie walcowania na gorąco uzębień prostych, śrubowych, łukowych i daszkowych. Zaproponowano przy tym by zęby kształtowane były zębatkami płaskimi. Takie rozwiązanie jest bowiem optymalne pod względem ewentualnych kosztów wdrożenia (wytworzenia narzędzi) oraz wynika z dość szerokiego zastosowania w przemyśle walcarek klinowych płaskich.

## 6.1. Obliczenia numeryczne

Dla sprawdzenia możliwości kształtowania uzębienia metodą walcowania poprzecznego wykonano szereg symulacji numerycznych, bazujących na MES. Założono tutaj, że kształtowanie przebiega przy braku wydłużania odkuwki w kierunku wzdłużnym (osiowym). Przyjęte założenie oznacza, że przy projektowaniu narzędzi należy wychodzić z równości pola przekroju poprzecznego stopnia uzębionego oraz wsadu.

Uwzględniając powyższe uwagi rozważono zasadę kształtowania uzębienia podobną do wykorzystywanej w znanym sposobie walcowania na zimno zębatkami płaskimi (metoda Roto-Flo). Przy czym w odróżnieniu od tej metody analizowany proces przebiega na gorąco, stosuje się w nim narzędzia krótsze oraz nie podpira się wyrobu (odkuwki) obustronnie w kłach.

### 6.1.1. Analiza w warunkach płaskiego stanu odkształcenia

W celu sprawdzenia możliwości kształtowania uzębienia proponowanym sposobem rozważano proces kształtowania na wałku (na długości 30 mm) wieńca zębatego charakteryzowanego przez moduł 1,5 oraz liczbę zębów  $z = 18$ . Przyjęto, że walcowanie wykonywane będzie za pomocą przemieszczających się przeciwnie zębatek płaskich o parametrach wyszczególnionych na rys. 6.1. Powierzchnia robocza narzędzi podzielona została na dwie części: kształtującą (pochyloną do kierunku walcowania pod kątem  $\gamma$ ) oraz kalibrującą, w której wysokość zębów jest stała. Przeanalizowano trzy przypadki kształtowania różniące się wartością kąta  $\gamma$ , który odpowiednio wynosił:  $0,5^\circ$ ,  $0,75^\circ$  i  $1,0^\circ$ . Pierwsze symulacje numeryczne badanego procesu walcowania wykonano w oparciu o MES w warunkach płaskiego stanu odkształcenia (zgodnie z założeniem, iż podczas kształtowania nie występuje płynięcie metalu w kierunku osi odkuwki). W obliczeniach przyjęto, że wsad (stal w gatunku C45) nagrzany jest do temperatury  $1150^\circ\text{C}$ , zaś temperatura narzędzi w trakcie procesu jest stała i wynosi  $50^\circ\text{C}$ .

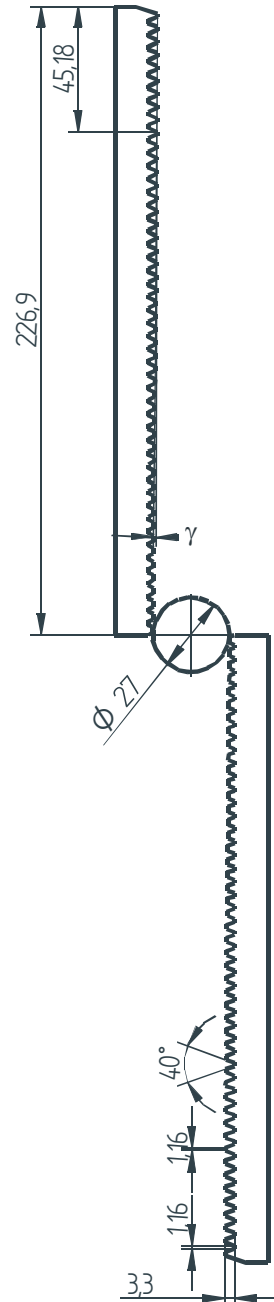


Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach to prędkość narzędzi  $v = 0,1$  m/s, czynnik tarcia na powierzchni styku metal-narzędzie  $m = 0,8$ , współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem –  $10$  kW/m<sup>2</sup>K oraz między materiałem a otoczeniem –  $0,2$  kW/m<sup>2</sup>K. Model materiałowy kształtowanego materiału przyjęto z biblioteki zastosowanego w obliczeniach oprogramowania MSC. SuperForm 2005.

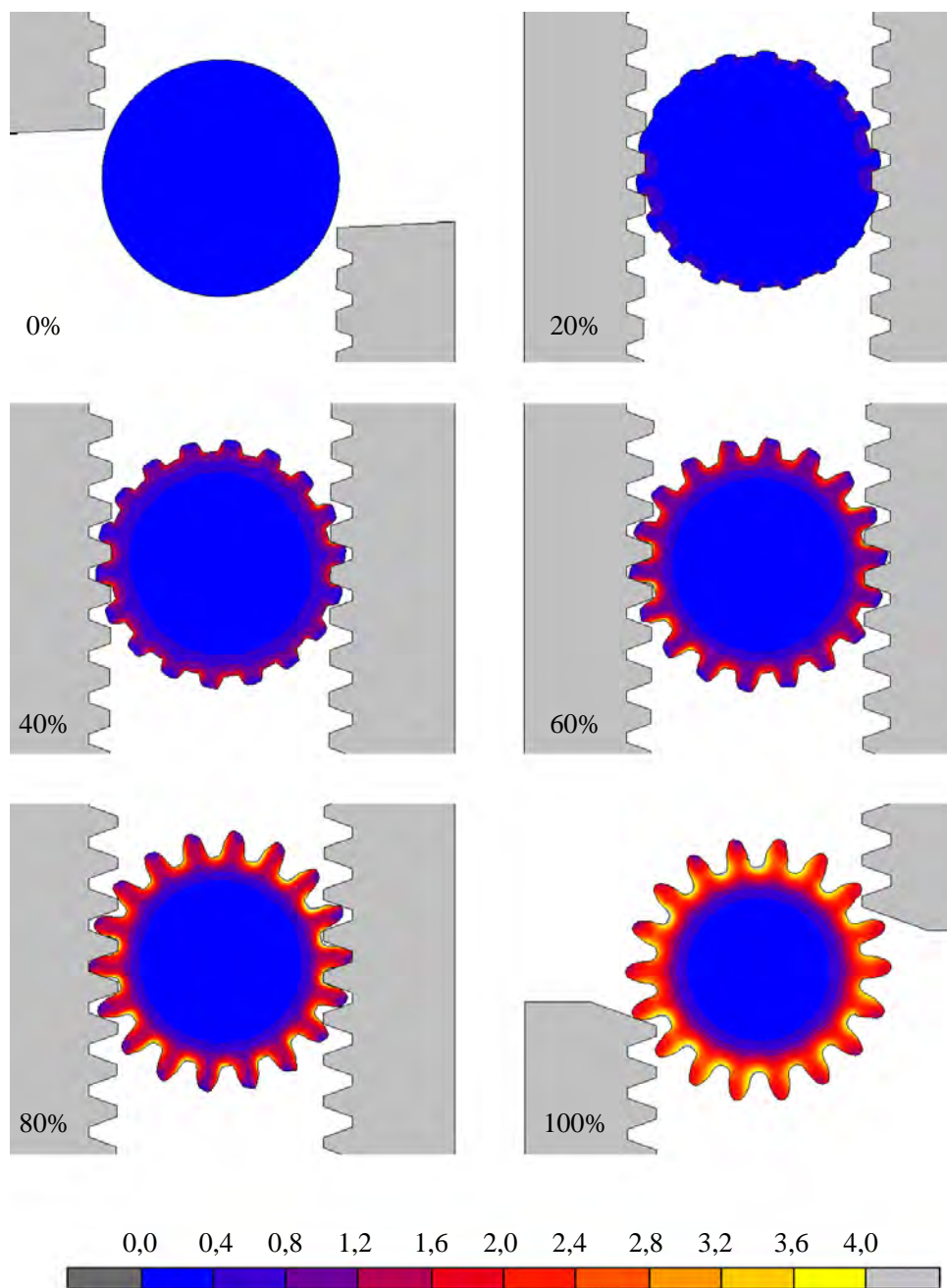
W efekcie przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano możliwość prześledzenia jak zmienia się kształt wyrobu w trakcie walcowania, co pokazano na rys. 6.2. Stwierdzono, że zęby przemieszczających się przeciwnie zębatek wciskają się stopniowo w pręt i wyciskają metal z wrębów do głów uzębienia. W rezultacie takiego przebiegu kształtowania metal podlega intensywnej przeróbce plastycznej w warstwach przypowierzchniowych, przy jednoczesnym braku odkształcenia w strefie centralnej. Przemawia za tym rozkład intensywności odkształcenia zamieszczony na rys. 6.2.

W efekcie ciągłego kontaktu metalu z narzędziami w obszarze walcowanego uzębienia ma miejsce zmniejszenie temperatury materiału kształtowanego (rys. 6.3), będące głównie efektem intensywnej wymiany ciepła między przedmiotem obrabianym a narzędziami. Równocześnie stwierdzono, że zakres temperatur odnotowany po walcowaniu w całym przekroju poprzecznym odkuwki mieści się w przedziale temperatur kształtowania plastycznego na gorąco stali w gatunku C45.

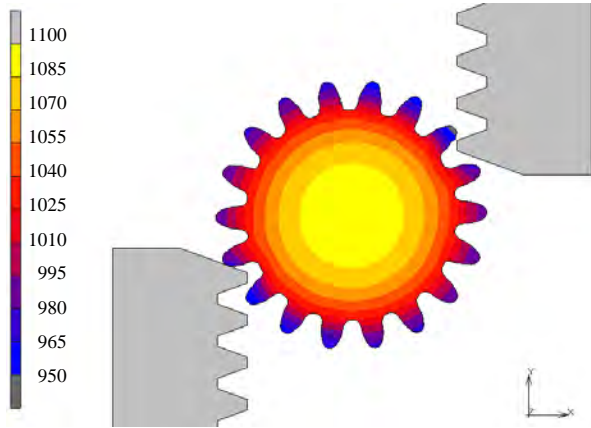
Na kolejnym rysunku 6.4 pokazano rozkład kryterium zniszczenia (obliczonego wg kryterium Cockrofta-Lathama) w przekroju poprzecznym odkuwki. Z danych przedstawionych na tym rysunku wynika, iż w rozważanym procesie walcowania nie powinno dochodzić do pęknięcia materiału w trakcie walcowania. Wartości kryterium zniszczenia (przyjmujące wartości ekstremalne w strefie centralnej) są co najmniej kilka razy mniejsze od wartości krytycznych (znacznie większych od 1), przy których dochodzi do pęknięcia metalu.



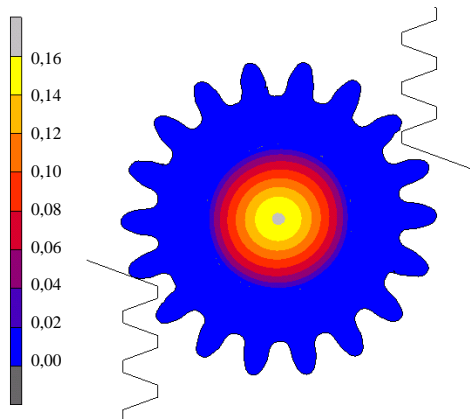
**Rys. 6.1.** Przyjęty w obliczeniach numerycznych schemat procesu walcowania zębienia normalnego



**Rys. 6.2.** Progresja kształtu odkuwki walcowanej narzędziem z  $\gamma=0,5^\circ$ , z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, odpowiadająca procentowemu zaawansowaniu procesu

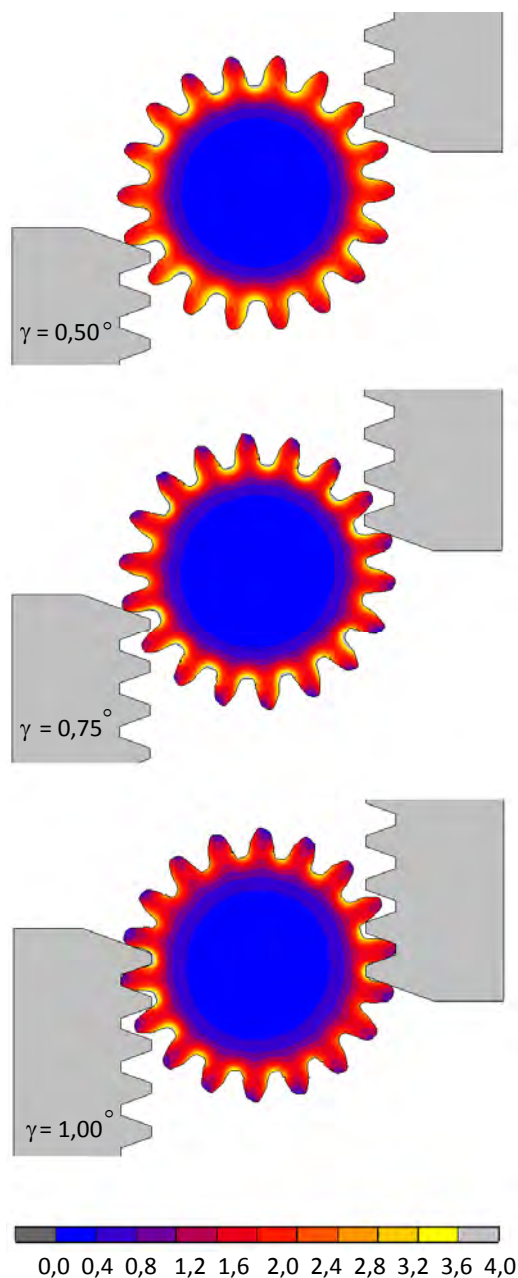


**Rys. 6.3.** Rozkład temperatury (w °C) w wieńcu zębatym kształtowanym narzędziem o kącie  $\gamma=0,5^\circ$ , zgodnie ze schematem podanym na rys. 6.1



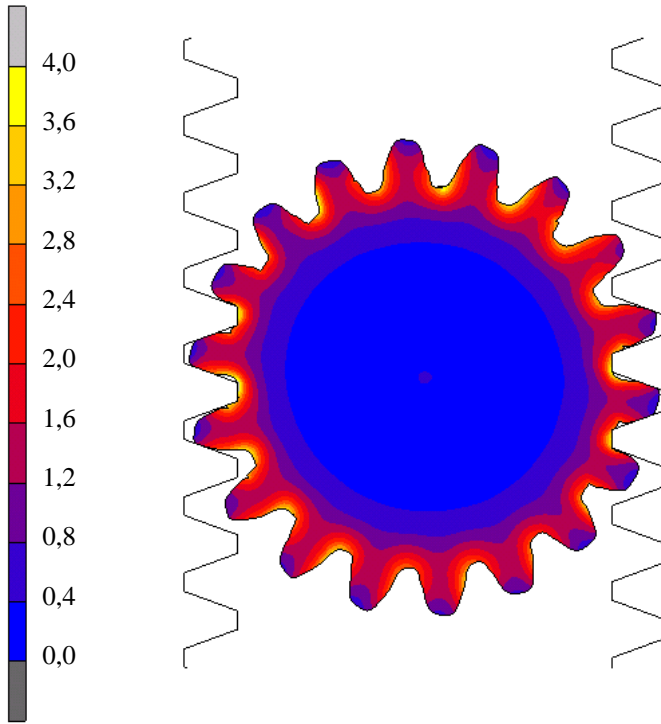
**Rys. 6.4.** Rozkład kryterium zniszczenia wg kryterium Cockrofta-Lathama w wieńcu zębatym walcowanym narzędziem o kącie  $\gamma=0,5^\circ$

Zwiększenie kąta wzniosu  $\gamma$  powoduje skrócenie długości narzędzi, zwiększenie wydajności walcowania oraz zmniejszenie ilości zużytej stali narzędziowej. Jednocześnie pogarsza się jakość kształtowanego uzębienia oraz wzrastają siły kształtowania, których rozkłady w analizowanych przypadkach walcowania pokazano na rys. 6.7. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, iż zmniejszenie kąta  $\gamma$  sprzyja stabilizowaniu wartości sił, które przyjmują wówczas w trakcie całego procesu kształtowania względnie stałe wartości. Ponadto, w efekcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że siła rozporowa jest średnio około czterech razy większa od siły stycznej (wciskającej narzędzie).

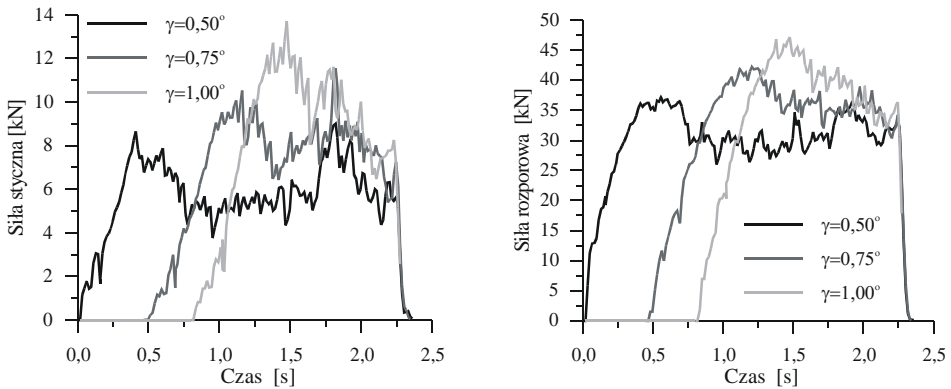


**Rys. 6.5.** Rozkład odkształceń i kształt uzębienia w zależności od kąta wzniosu  $\gamma$  części kształtującej narzędzia

Spostrzeżenie to jest zgodne z obserwacjami odnotowanymi dla typowych procesów WPK [33].



**Rys. 6.6.** Mechanizm tworzenia się zawalceń w zębach kształtowanych narzędziem z  $\gamma=0,75^\circ$ , z zaznaczonym rozkładem odkształcenia



**Rys. 6.7.** Rozkłady sił w analizowanych procesach walcowania uzębienia

Podsumowując rezultaty symulacji numerycznych procesu walcowania uzębienia prostego (w warunkach płaskiego stanu odkształcenia) stwierdzono, iż najlepsze możliwości stwarza stosowanie w kształtowaniu narzędzi charakteryzowanych kątem wzniosu  $\gamma = 0,5^\circ$ . Zatem narzędzia (zębátky) o takim kącie postanowiono uwzględnić w bardziej zaawansowanej analizie wykonanej w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia.

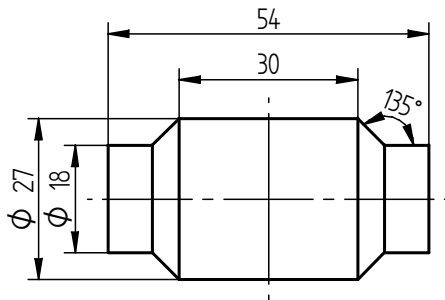
### 6.1.2. Analiza w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia

W ramach analizy 3D postanowiono przeanalizować kształtowanie uzębienia prostego, łukowego, śrubowego i daszkowego. Wszystkie uzębienia charakteryzowane były takim samym modułem  $m = 1,5$  i liczbą zębów  $z = 18$  (stosowanymi także w warunkach analizy 2D). Również wsady zastosowane we wszystkich przypadkach analizowanych miały taki sam kształt i wymiary – zgodnie z rys. 6.8. Należy tutaj zauważyć, iż średnica stopnia wsadu, na którym kształtowano uzębienie równa jest średnicy podziałowej koła zębatego.

Założono, że do kształtowania uzębienia wykorzystane będą wkładki (zębátky), które w przekroju wzdłużnym będą miały kształt zgodny z rys. 6.1. Również szerokość wkładek we wszystkich analizowanych przypadkach była jednakowa i wynosiła 60 mm. Natomiast sposób wykonania uzębienia we wkładkach zmieniał się w zależności od rodzaju wykonywanego uzębienia.

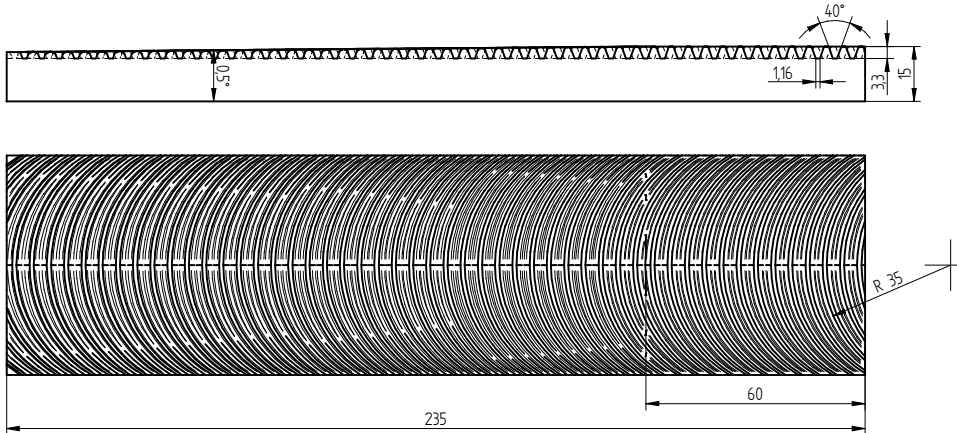
I tak sposób nacinania zębów we wkładkach był następujący:

- ❑ uzębienie normalne – prostopadle do kierunku walcowania (przemieszczania narzędzi),
- ❑ uzębienie łukowe – na promieniu R35, zgodnie z rys. 6.9,
- ❑ uzębienie śrubowe – pod kątem  $60^\circ$  do kierunku walcowania zgodnie z rys. 6.10,
- ❑ uzębienie daszkowe – obustronnie pod kątem  $60^\circ$  do kierunku walcowania w sposób zgodny z rys. 6.11.

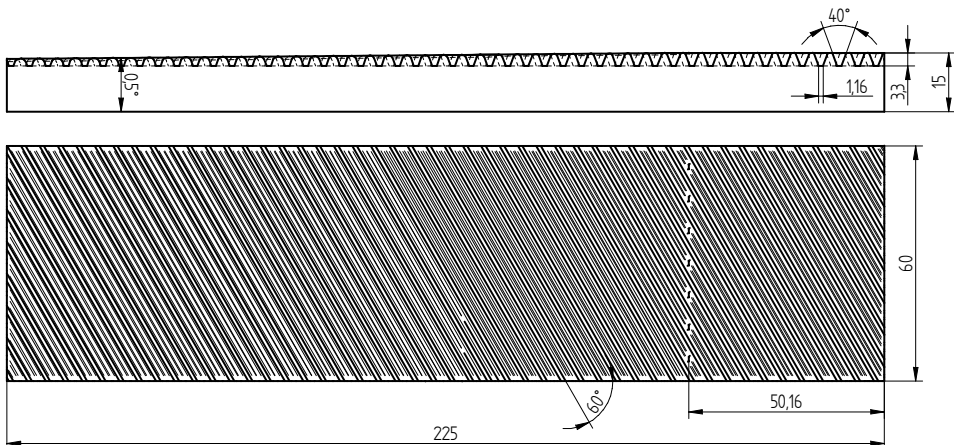


**Rys. 6.8.** Wsad do walcowania wieńców zębatych, uwzględniany w analizie numerycznej w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia 3D

Narzędzia dla wszystkich czterech rozważanych przypadków walcowania zostały zaprojektowane w systemie CAD Solid Edge. Krawędzie zębów zostały zaokrąglone promieniami wynoszącymi od 1,2 mm (na początku strefy kształtowania) do 0,3 mm (w strefie kalibrowania). Następnie importowane były one do programu DEFORM-3D, w którym wykonywano symulacje numeryczne procesu walcowania. Jeden z modeli wykorzystanych w obliczeniach numerycznych procesu walcowania uzębienia śrubowego pokazano na rys. 6.12.

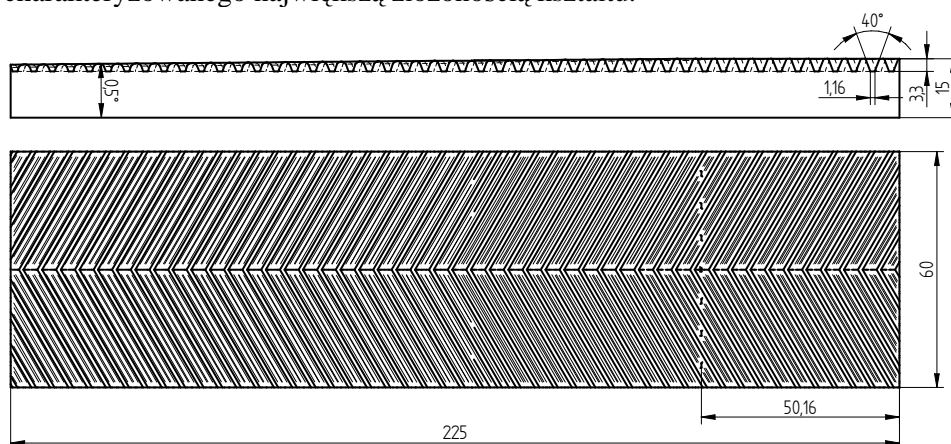


**Rys. 6.9.** Narzędzie (zębatka) do walcowania zębów łukowych, z zaznaczonymi ważniejszymi wymiarami



**Rys. 6.10.** Narzędzie (zębatka) do walcowania zębów śrubowych, z zaznaczonymi ważniejszymi wymiarami

W trakcie obliczeń wsad modelowano za pomocą czterowęzłowych elementów tetragonalnych. Za względu na duże zmiany kształtu odkuwki w czasie walcowania w obliczeniach stosowano częste przebudowy siatki elementów. Zagadnienie to dobrze ilustruje rys. 6.13, na którym pokazano jak zmieniała się w procesie walcowania uzębienia śrubowego liczba węzłów i elementów opisujących kształt odkuwki. Z danych pokazanych na tym rysunku wynika, iż pod koniec procesu liczba węzłów i elementów zwiększała się ponad dwukrotnie, co oczywiście odbijało się na wydłużeniu czasu obliczeń. Sposób podziału odkuwek na elementy w końcowym etapie procesu walcowania zilustrowano na kolejnym rysunku 6.14. Wynika z niego, iż największe zagęszczenie elementów występuje w strefie kształtowanego uzębienia, charakteryzowanego największą złożonością kształtu.



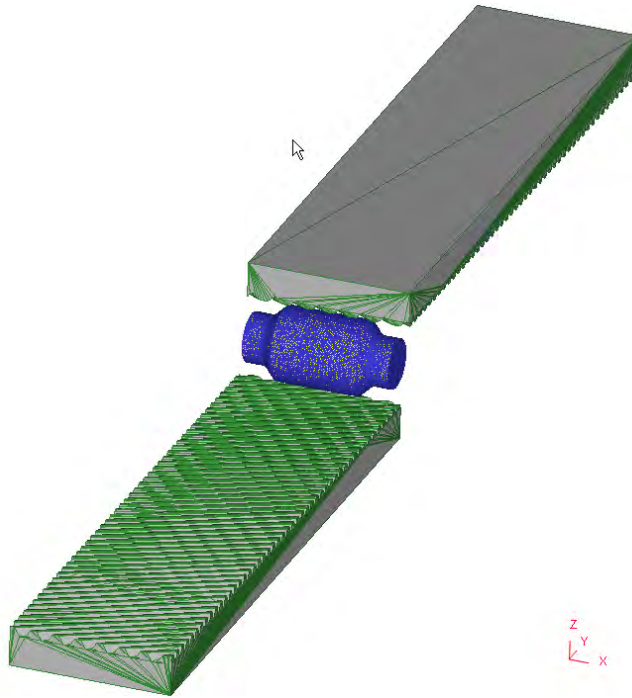
**Rys. 6.11.** Narzędzie do walcowania zębów daszkowych z zaznaczonymi ważniejszymi wymiarami

Podczas analizy numerycznej procesów kształtowania uzębienia (z wykorzystaniem programu DEFORM-3D) przyjmowano parametry identyczne jak podczas (opisanego w rozdziale poprzednim 6.1.1) walcowania w warunkach płaskiego stanu odkształcenia. Również model materiałowy kształtowanej stali przyjęto z biblioteki zastosowanego oprogramowania.

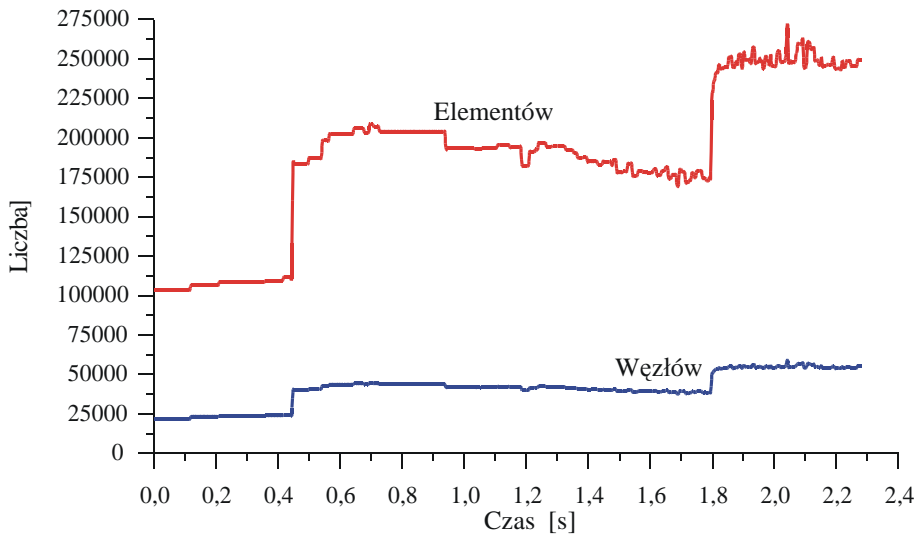
W efekcie wykonanych obliczeń numerycznych w pierwszej kolejności przeanalizowano jak zmienia się kształt odkuwki w trakcie walcowania. Wyznaczone w programie DEFORM-3D progresje kształtu odkuwek w analizowanych procesach walcowania zestawiono na kolejnym rys. 6.15. Stwierdzono, że we wszystkich przypadkach:

- ❑ narzędzia stopniowo wgniatają się we wsad wyciskając metal z wrębów do zębów;
- ❑ długość strefy kalibrowania została dobrana prawidłowo;
- ❑ odkuwki uzyskują właściwy, zakładany kształt.

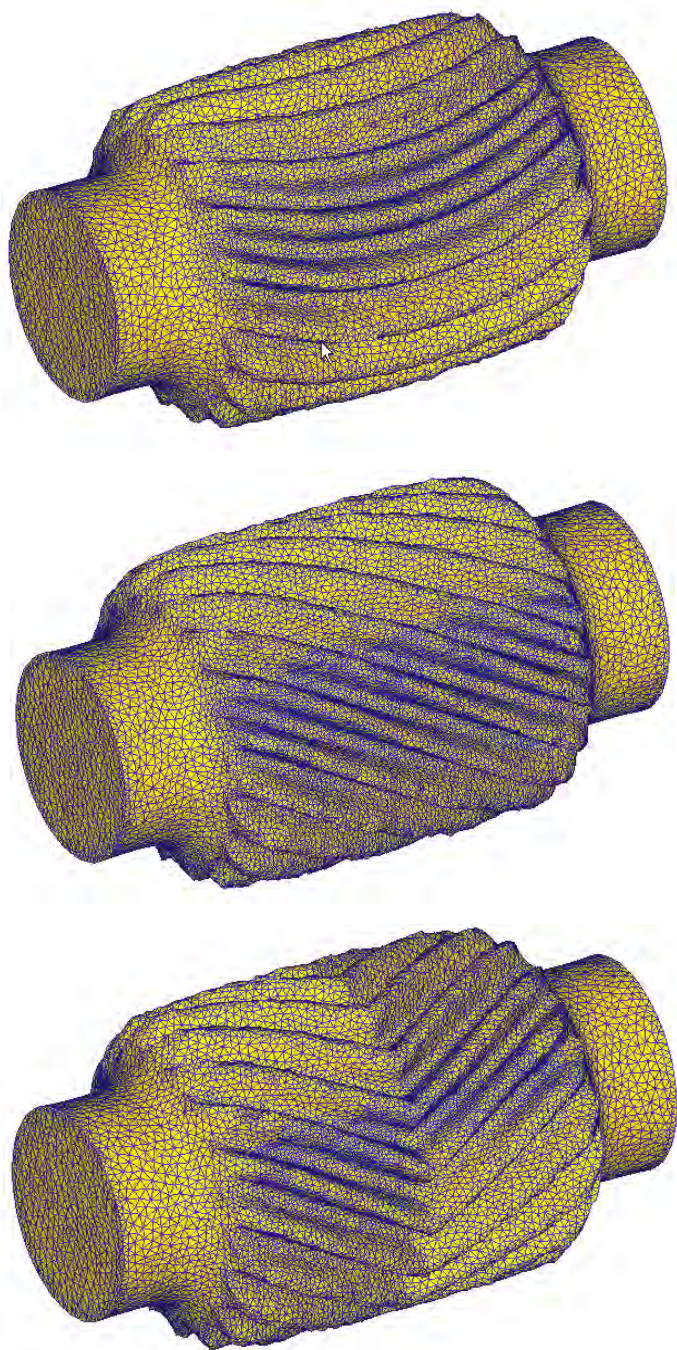




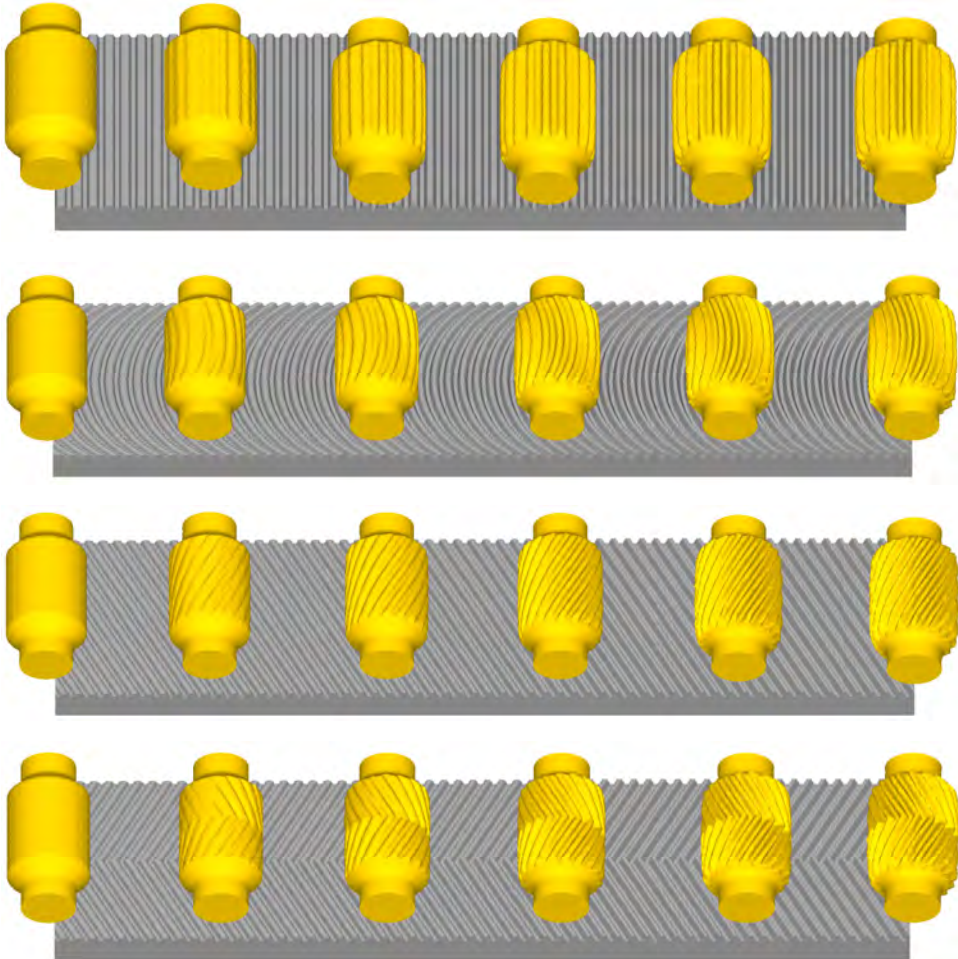
**Rys. 6.12.** Model geometryczny procesu walcowania uzębienia śrubowego, opracowany w programie DEFORM-3D



**Rys. 6.13.** Zmiana liczby węzłów i elementów opisujących odkuwkę w analizowanym numerycznie procesie walcowania uzębienia śrubowego



**Rys. 6.14.** Podział odkuwki na elementy w końcowym etapie walcowania, w którym kalibrowane jest użębie (od góry): łukowe, śrubowe i daszkowe



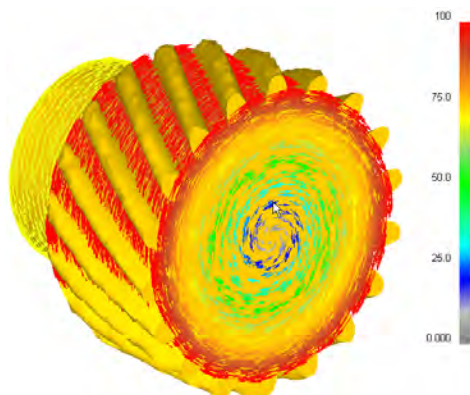
**Rys. 6.15.** Progresa kształtu odkuwki w procesie walcowania uzębienia (od góry): normalnego, łukowego, śrubowego, daszkowego

Podczas procesu walcowania odkuwka obtacza się stabilnie (bez poślizgów) tak, że prędkości liniowe metalu w strefie kształtowanego uzębienia są równe prędkości zębatek kształtujących. Fakt ten potwierdza rozkład prędkości płynięcia metalu w odkuwce z uzębieniem śrubowym, pokazany na rys. 6.16.

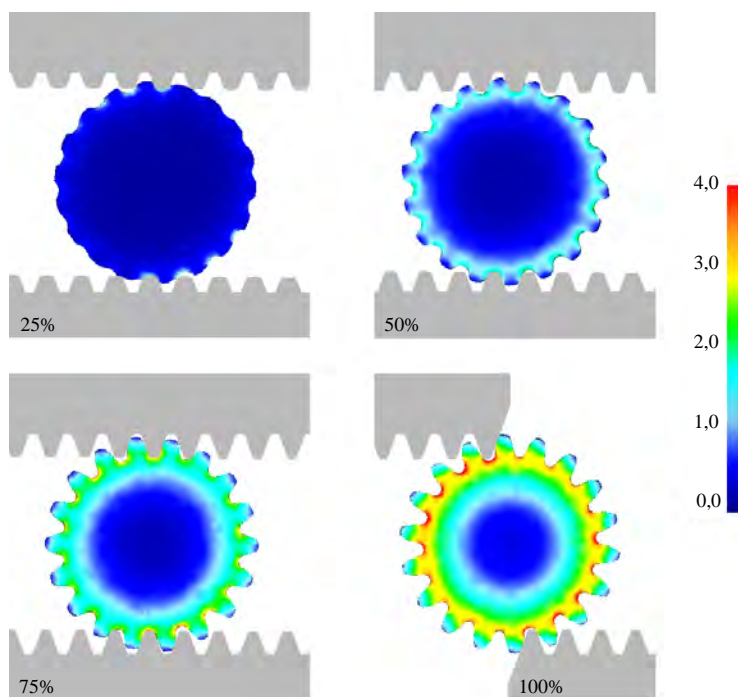
Analiza numeryczna wykonana w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia potwierdziła, że uzębienia analizowanych odkuwek powstają w wyniku powierzchniowego płynięcia metalu (co zakładano w obliczeniach wykonanych w warunkach 2D). Na rys. 6.17 przedstawiono zmiany intensywności odkształcenia w przekroju poprzecznym odkuwki z uzębieniem normalnym, w zależności od zaawansowania procesu walcowania. Porównanie danych za-



mieszczonych na rys. 6.2 i 6.17 świadczy o doskonałej zgodności wyników obliczeń mimo stosowania oprogramowania różnych producentów oraz różnych warunków obliczeń (płaski lub przestrzenny stan odkształcenia).

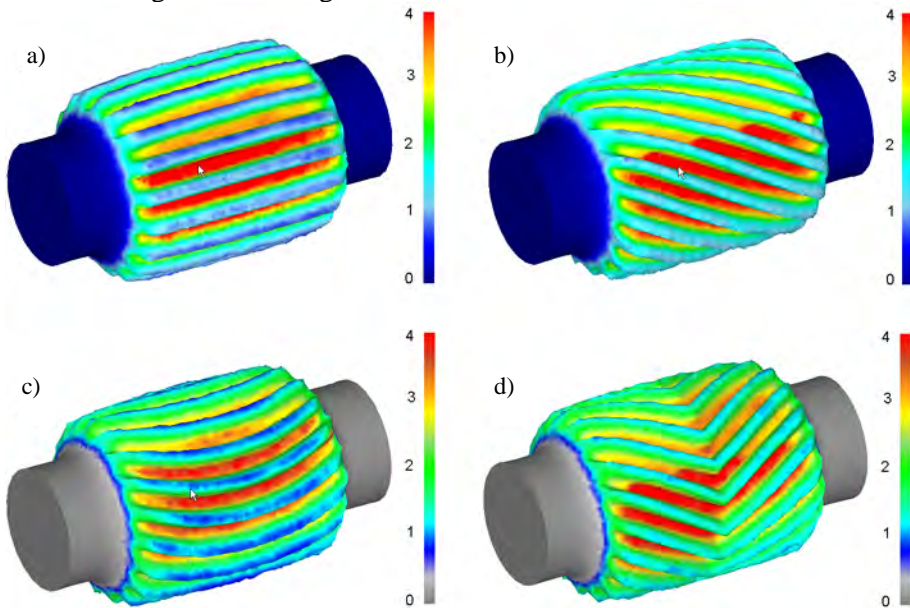


**Rys. 6.16.** Rozkład prędkości przemieszczania metalu (w mm/s) w procesie kształtowania odkuwki z uzębieniem śrubowym

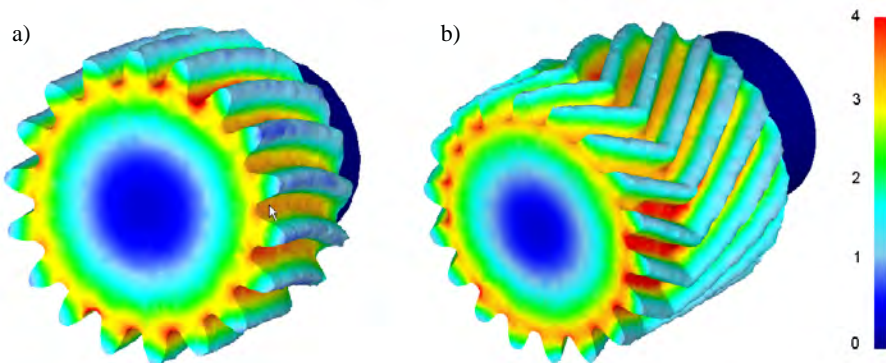


**Rys. 6.17.** Zmiana kształtu przekroju poprzecznego odkuwki w procesie walcowania uzębienia normalnego (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia) w zależności od zaawansowania procesu

Powierzchniowy charakter płynięcia metalu nie jest zależny od rodzaju kształtowanego uzębienia. We wszystkich rozważanych przypadkach walcowania największe odkształcenia występują we wrębach ukształtowanego uzębienia (rys. 6.18). Odkształcenia te są rozłożone koncentrycznie i zmniejszają się wraz ze zbliżaniem się do osi odkuwki kształtowanej, w której są równe zero. Jest to dobrze widoczne na rys. 6.19, na którym przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia w przekroju poprzecznym odkuwek po procesie walcowania uzębienia łukowego i daszkowego.

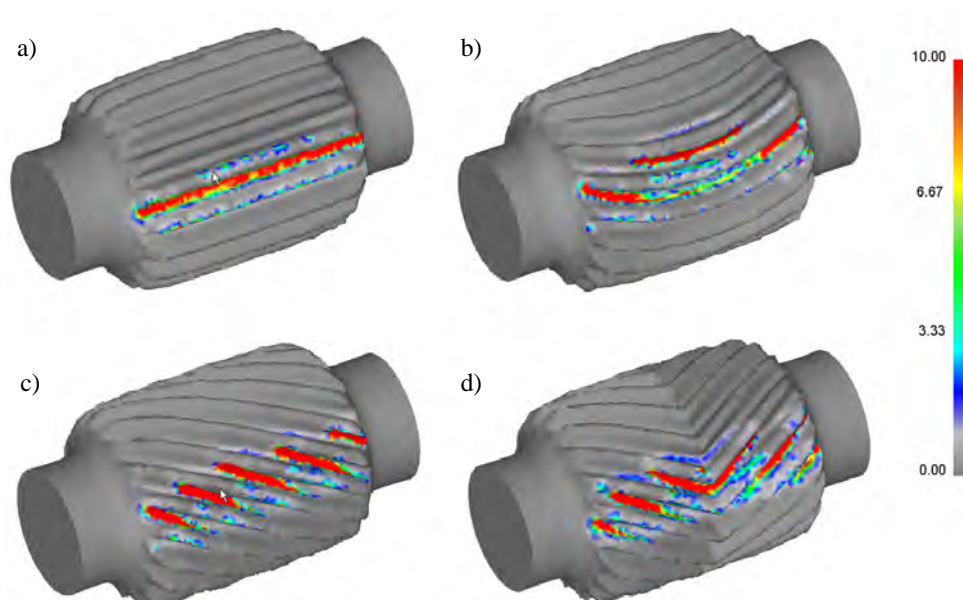


**Rys. 6.18.** Rozkłady intensywności odkształcenia na powierzchni odkuwek po procesie kształtowania uzębienia: a) normalnego, b) śrubowego, c) łukowego, d) daszkowego



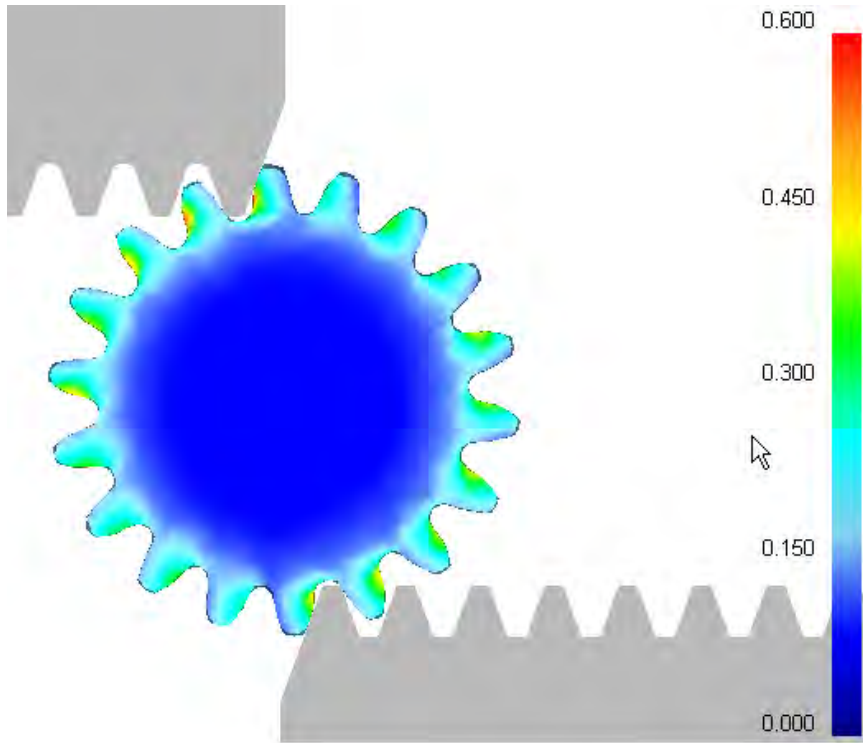
**Rys. 6.19.** Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju poprzecznym odkuwki z uzębieniem: a) łukowym, b) daszkowym

Na kolejnym rys. 6.20 pokazano rozkłady prędkości odkształcenia na powierzchni odkuwek (na początku fazy kalibrowania). Dane zamieszczone na tym rysunku potwierdzają, że metal płynie najbardziej intensywnie we wrębach, skąd jest wyciskany do głowy zębów. Przy czym w przypadku walcowania uzębienia normalnego płynięcie metalu intensyfikowane jest w obszarze pojedynczego zęba. Natomiast w pozostałych przypadkach rozłożone jest ono na kilka sąsiednich zębów, przez co proces kształtowania przebiega w sposób bardziej płynny.



**Rys. 6.20.** Rozkłady prędkości odkształcenia (w 1/s) na powierzchni odkuwek (na początku kalibrowania) podczas walcowania uzębienia: a) normalnego, b) łukowego, c) śrubowego, d) daszkowego

Na podstawie wykonanych obliczeń wyznaczono również rozkład kryterium zniszczenia w odkuwce po procesie walcowania uzębienia. W odróżnieniu od rezultatów otrzymanych w warunkach płaskiego stanu odkształcenia stwierdzono, że maksymalne wartości tego kryterium lokalizowane są nie w strefie osiowej (rys. 6.4) lecz w ukształtowanym uzębieniu (rys. 6.21). Jednakże otrzymane maksymalne wartości tego kryterium są przynajmniej dwukrotnie mniejsze od wartości krytycznych, przy których ma miejsce pękanie metalu.



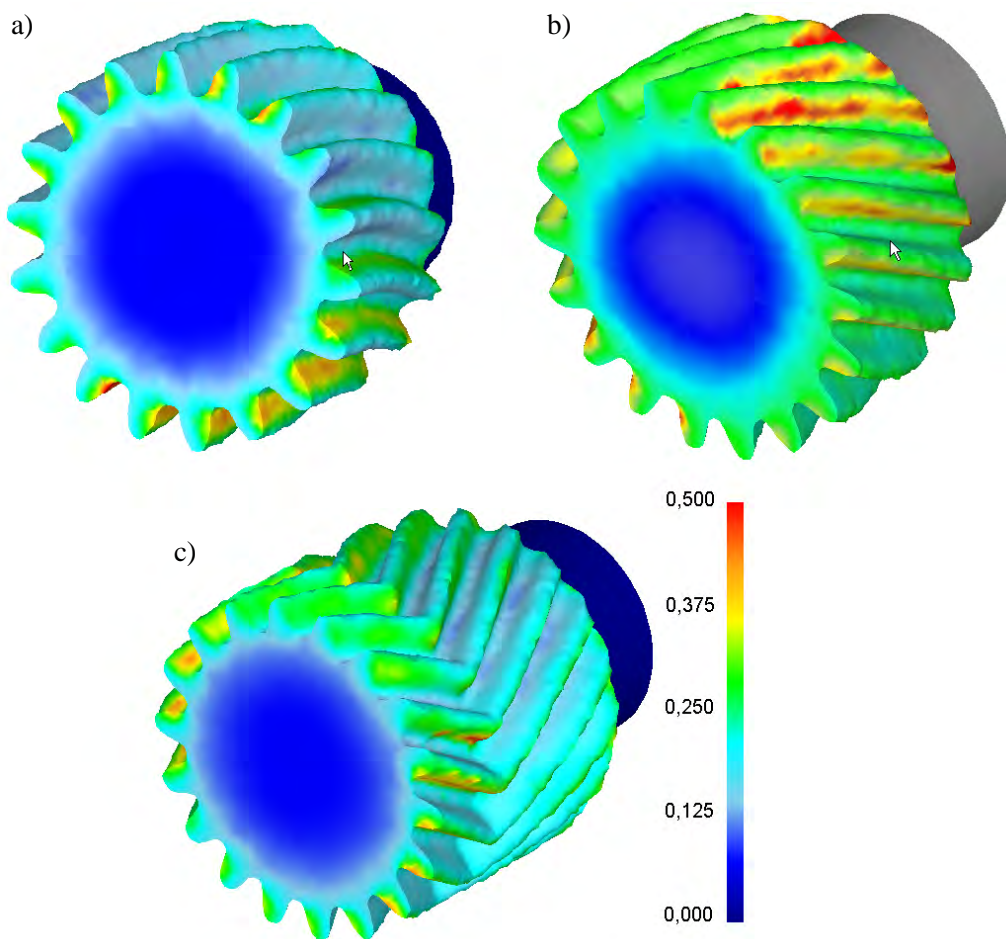
**Rys. 6.21.** Rozkład kryterium zniszczenia w przekroju poprzecznym odkuwki z uzębieniem normalnym, obliczony MES w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia

Należy tutaj zauważyć, że rozkłady kryterium zniszczenia otrzymane dla przypadków walcowania uzębienia: normalnego (rys. 6.21), łukowego, daszkowego i spiralnego (rys. 6.22) były porównywalne. Można zatem stwierdzić, iż rodzaj kształtowanego uzębienia nie wpływa na prawdopodobieństwo tworzenia pęknięć w strefie kształtowanego uzębienia.

Wyniki obliczeń MES w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D) potwierdziły spostrzeżenie poczynione na podstawie analizy wykonanej w warunkach płaskiego stanu odkształcenia, zgodnie z którym metal podczas kształtowania ochładza się wyłącznie w obszarze kształtowanego uzębienia. Zgodnie z rys. 6.23 spadek temperatury metalu w tej części odkuwki wynosi około  $50\div 70^{\circ}\text{C}$  i nie stanowi zagrożenia dla realizacji procesu walcowania. Temperatura nieodkształconego plastycznie rdzenia odkuwki utrzymuje się na poziomie początkowym, równym  $1150^{\circ}\text{C}$ .

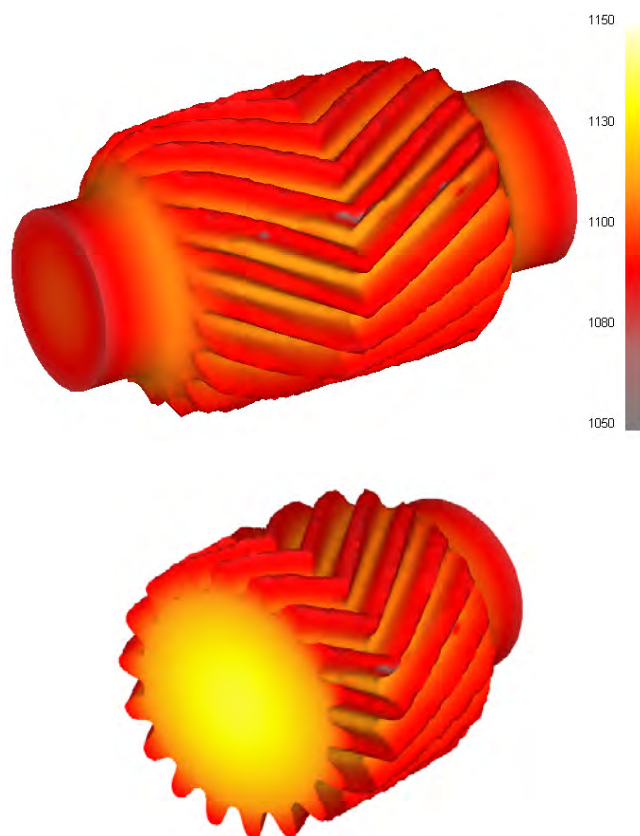
Na kolejnym rysunkach 6.24 – 6.27 pokazano rozkłady siły stycznej (wciśkającej narzędzie) i rozporowej (prostopadłej do kierunku walcowania) obliczone dla rozważanych przypadków kształtowania uzębienia. Na podstawie

obliczeń stwierdzono, że siła styczna jest około pięciu razy mniejsza od siły rozporowej. Ponadto, największe wahania sił występują podczas kształtowania uzębienia normalnego. Świadczy to o tym, że ten przypadek walcowania jest najtrudniejszy w realizacji praktycznej, gdyż narzędzia nie oddziałują na materiał w sposób płynny. Jest to efektem trudności dotyczących trafiania kolejnych zębów zębówki w tworzone wręby wieńca odkuwki. Na podstawie wykonanych obliczeń można zatem przypuszczać, iż walcowanie trudniejszego z pozoru uzębienia łukowego, śrubowego i daszkowego będzie łatwiejsze niż normalnego. Należy tutaj zauważyć, że maksymalne wartości sił występujące w rozważanych przypadkach były porównywalne.

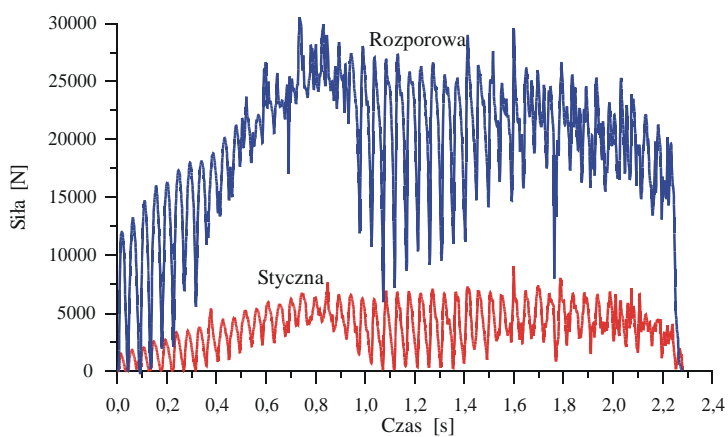


**Rys. 6.22.** Rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama w odkuwkach z uzębieniem: a) łukowym, b) śrubowym, c) daszkowym

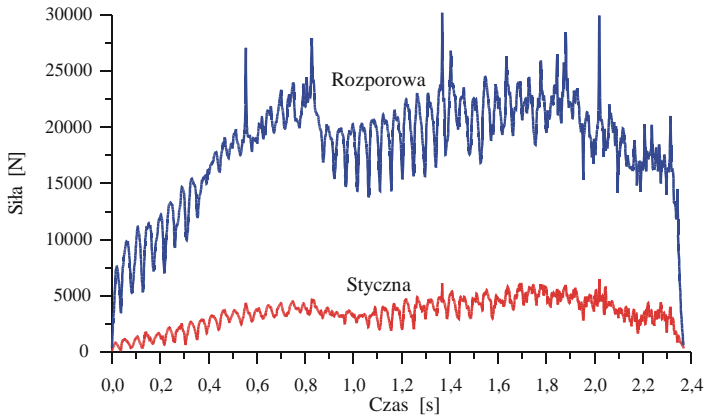




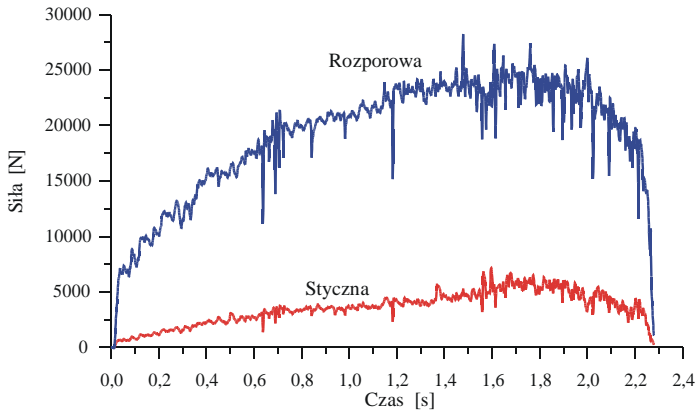
**Rys. 6.23.** Rozkłady temperatury (w °C) w odkuwce bezpośrednio po procesie walcowania uzębienia daszkowego – temperatura wsadu 1150°C



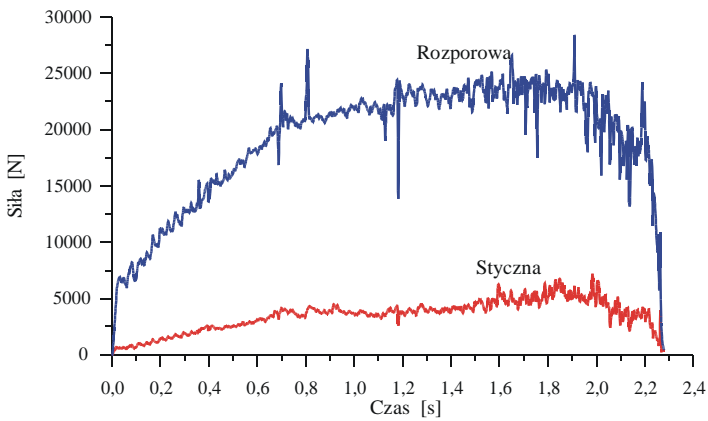
**Rys. 6.24.** Rozkłady sił w procesie walcowania uzębienia normalnego



Rys. 6.25. Rozkłady sił w procesie walcowania uzębienia łukowego



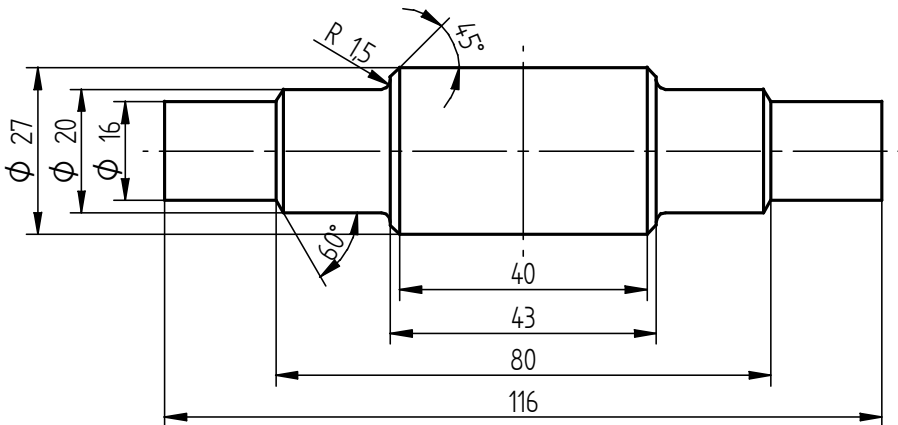
Rys. 6.26. Rozkłady sił w procesie walcowania uzębienia śrubowego



Rys. 6.27. Rozkłady sił w procesie walcowania uzębienia daszkowego

### 6.1.3. Przykład procesu WPK wałka uzębionego

W celu pokazania jak przebiegać będzie proces WPK wałka uzębionego przeprowadzono eksperyment numeryczny, w którym zasymulowano opracowany proces wytwarzania. W pierwszym etapie procesu walcowany jest wałek stopniowany, o wymiarach jak na rys. 6.28, w sposób typowy dla WPK. Następnie na stopniu o średnicy największej walcowane jest uzębienie śrubowe (charakteryzowane modułem 1,5 i liczbą zębów  $z=18$ ) za pomocą wkładek (zębatek) o parametrach takich jak na rys. 6.10. W ostatniej fazie procesu odcinane są odpady końcowe z utworzonymi (w efekcie powierzchniowego płynięcia metalu) lejami czołowymi.



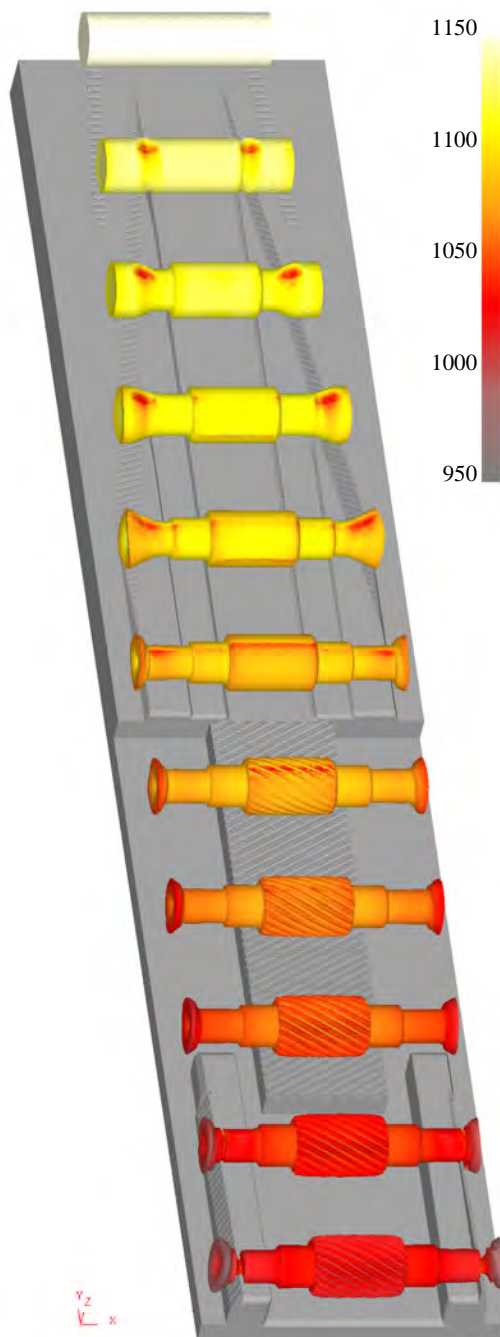
**Rys. 6.28.** Kształt i wymiary wałka stopniowanego walcowanego w pierwszej fazie procesu (średnica największego, centralnego stopnia jest równa średnicy podziałowej uzębienia, które będzie kształtowane w drugiej fazie procesu)

Narzędzie zabezpieczające proces walcowania wałka zębatego wg proponowanej koncepcji pokazano na rys. 6.29. Na rysunku tym zaznaczono również ważniejsze wymiary.

Obliczenia numeryczne procesu walcowania wałka uzębionego wykonano w programie DEFORM-3D. Przyjęto, że wsad do walcowania jest cylindryczny i ma wymiary  $\phi 26,5 \times 90$  mm. Pozostałe parametry procesu przyjęto w sposób identyczny jak w rozdziale 6.1.2.

Na rys. 6.30 pokazano jak zmienia się kształt odkuwki wałka uzębionego w trakcie procesu kształtowania oraz jak zmienia się temperatura na powierzchni odkuwki, walcowanej z wsadu nagrzanego do temperatury 1150°C.

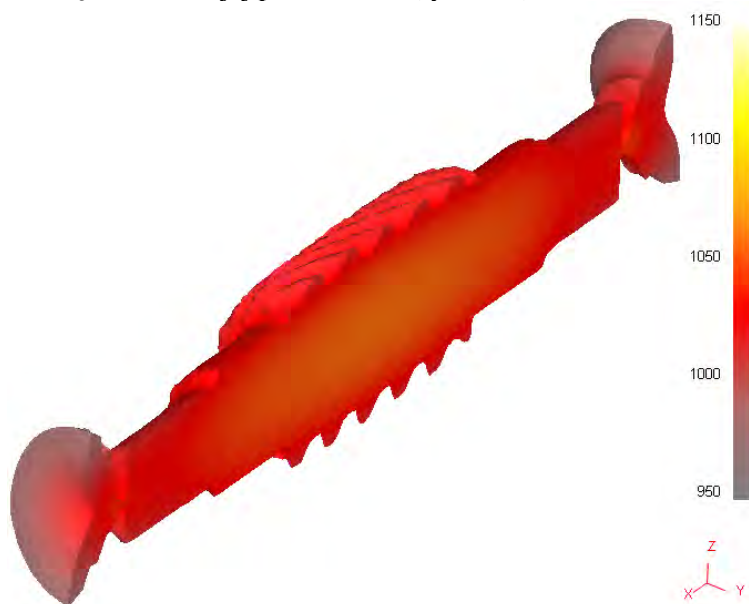




**Rys. 6.30.** Zmiana kształtu odkuwki (z zaznaczonym rozkładem temperatury w °C) walcowanej narzędziami płaskimi pokazanymi na rys. 6.29

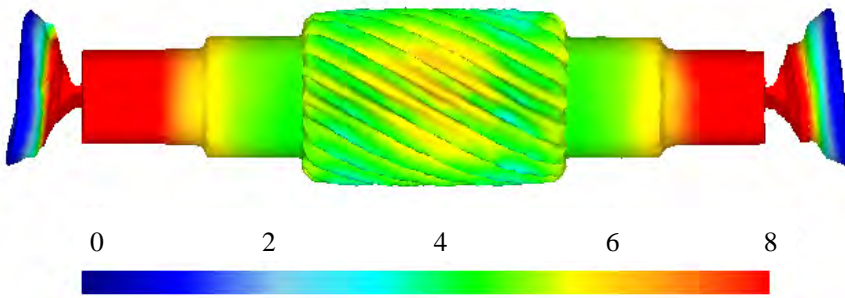
Na podstawie obliczeń można wnioskować, iż stosując proponowaną metodę kształtowania plastycznego można będzie walcować wałki stopniowane z uzębieniem walcowym. Równocześnie zauważono, że podczas kształtowania uzębienia, odkuwka została przemieszczona w kierunku wzdłużnym (osiowym). W związku z tym po odcięciu odpadów końcowych skrajne stopnie wałka miały długość różną od zakładanej. Jednakże mankament ten można w łatwy sposób wyeliminować zamieniając kolejność dwóch ostatnich faz procesu. To znaczy, najpierw należy odciąć odpady końcowe, a następnie odwalcować uzębienie.

Odnosnie temperatury odkuwki można podać, że pomimo dość długiego czasu kształtowania ( $t=7,5$  s) utrzymuje się ona w przedziale właściwym dla obróbki plastycznej na gorąco. Spadki temperatury obserwowane są głównie w miejscach styku metalu z chłodniejszymi narzędziami. Jednakże kontakt narzędzie-metal jest w analizowanym procesie cykliczny. Pozwala to na wyrównanie temperatur na powierzchni, w następstwie przewodzenia ciepła z obszarów o temperaturze wyższej do niższej. Ponadto, znaczne ilości ciepła generowane są (głównie w strefie kontaktu) w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. W następstwie tych zjawisk, pod koniec procesu kształtowania temperatura na powierzchni odkuwki jest mniej więcej jednakowa i utrzymuje się na poziomie powyżej  $1000^{\circ}\text{C}$  (rys. 6.30). Równocześnie temperatura metalu w centralnej (osiowej) części odkuwki jest o ok.  $50^{\circ}\text{C}$  większa niż na jej powierzchni (rys. 6.31).

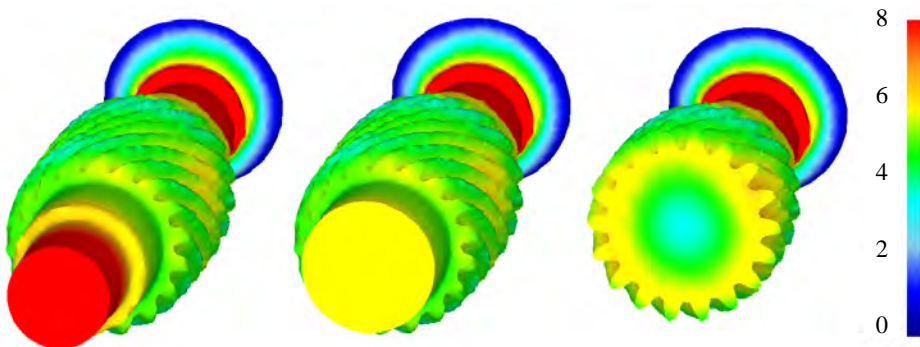


**Rys. 6.31.** Rozkład temperatury (w  $^{\circ}\text{C}$ ) w przekroju wzdłużnym (osiowym) odkuwki wałka uzębionego

Na kolejnym rys. 6.32 pokazano rozkład intensywności odkształcenia na powierzchni odwalcowanej odkuwki. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że odkształcenia zwiększają się wraz ze wzrostem stopnia gniotu i przyjmują wartości największe dla stopni wałka o średnicy najmniejszej. Równocześnie można stwierdzić, że metal w stopniach skrajnych odkuwki został przerobiony plastycznie w całej objętości (rys. 6.33). Natomiast podczas kształtowania uzębienia na stopniu centralnym wałka płynięcie metalu miało charakter powierzchniowy. Przełożyło się to na rozkład odkształceń, które w tej części odkuwki układają się koncentrycznie i są największe w warstwach przypowierzchniowych, a najmniejsze w osi odkuwki.

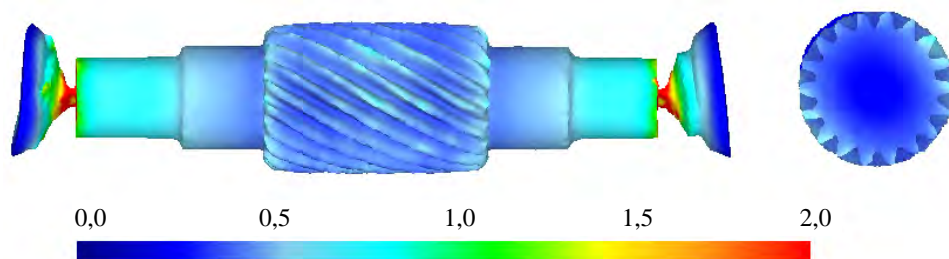


**Rys. 6.32.** Rozkład intensywności odkształcenia na powierzchni odkuwki wałka zębatego



**Rys. 6.33.** Rozkład intensywności odkształcenia w wybranych przekrojach poprzecznych odkuwki wałka zębatego

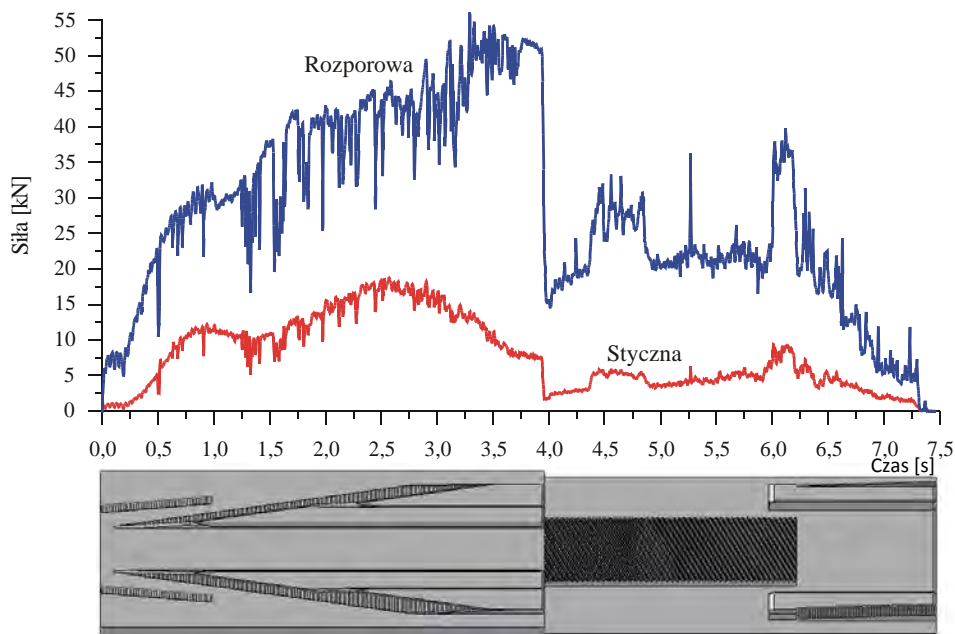
Ciekawie przedstawia się rozkład zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwce wałka pokazany na rys. 6.34. Wynika z niego, iż w strefie ukształtowanego uzębienia wartość zniszczenia nie przekracza bezpiecznego poziomu 0,5. Oznacza to, iż podczas walcowania zębów nie powinno dochodzić do pęknięcia metalu.



**Rys. 6.34.** Rozkład zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwce wałka uzębionego

Równocześnie odnotowano, że wartości krytyczne zniszczenia (powyżej 2) występują w warstwach łączących odpady końcowe z odkuwką. Tam zatem metal powinien pękać doprowadzając, w sposób zgodny z założeniem, do oddzielenia odpadów końcowych od odkuwki.

Odnośnie obliczonych rozkładów sił walcowania, pokazanych na rys. 6.35, można stwierdzić, iż największe wartości mają one pod koniec fazy kształtowania wałka stopniowanego przebiegającego w sposób właściwy dla procesów WPK. Następnie podczas walcowania uzębienia siły te zmniejszają się kilkakrotnie, by w fazie odcinania odpadów końcowych spaść praktycznie do zera.



**Rys. 6.35.** Rozkłady składowych siły walcowania w procesie WPK odkuwki wałka uzębionego narzędziami pokazanymi na rys. 6.29

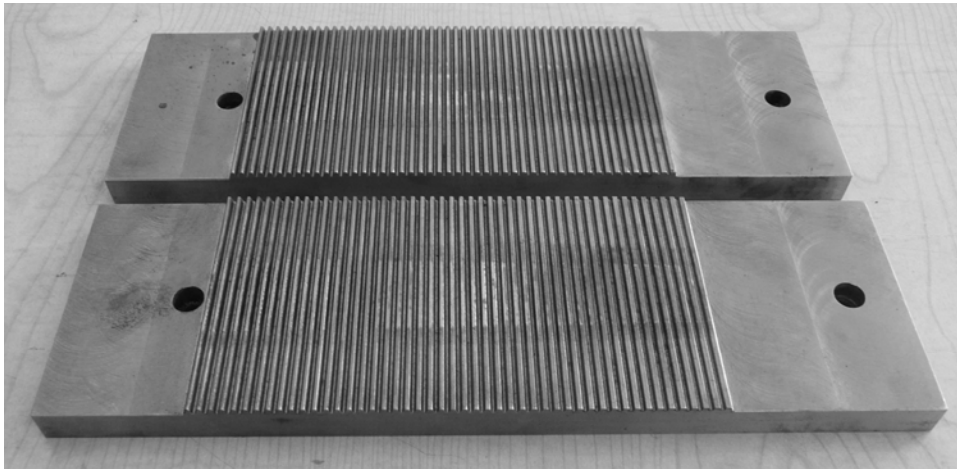


## 6.2. Badania doświadczalne

### 6.2.1. Walcowanie uzębienia prostego

Badania doświadczalne, realizowane w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej, dotyczyły kształtowania uzębienia normalnego o module  $m=1,5$  i liczbie zębów  $z=18$ . Wykorzystano w nich narzędzia, których zarys jest zgodny z przedstawionym na rys. 6.1. Również wsady (ze stali w gatunku C45) były wykonane identycznie z rys. 6.8. Takie rozwiązanie, po przyjęciu pozostałych parametrów walcowania zgodnie z zastosowanymi w symulacjach numerycznych pozwoliło na porównanie sił kształtowania obliczonych ze zmierzonymi. Próby walcowania wykonano przy użyciu walcarki LUW-2.

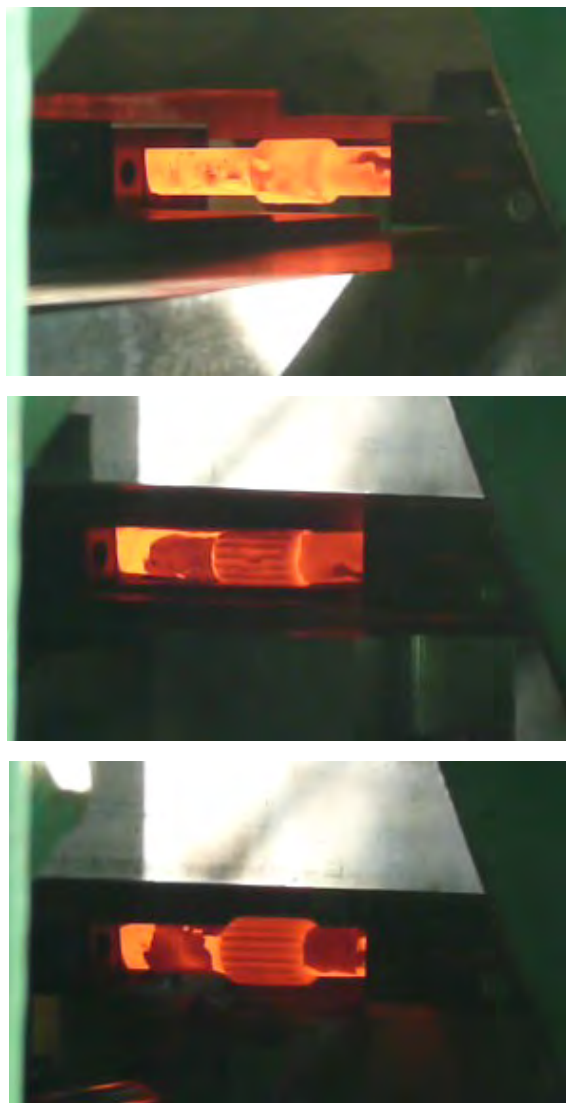
Korzystając z narzędzi w kształcie zębatek (rys. 6.36) przeprowadzono próby walcowania wałka o uzębieniu normalnym (rys. 6.37). Na ich podstawie jednoznacznie stwierdzono, że możliwe jest kształtowanie wałków uzębionych proponowaną metodą WPK (rys. 6.38).



**Rys. 6.36.** Narzędzia (zębatki płaskie) wykorzystane w procesie walcowania uzębienia normalnego, charakteryzowanego przez moduł  $m=1,5$  mm oraz liczbę zębów  $z=18$

W trakcie badań doświadczalnych rejestrowano również siły kształtowania. Na rys. 6.39 pokazano rozkład siły stycznej (wciskającej klin) zmierzonej podczas walcowania wałka zębatego wg proponowanej koncepcji. Dodatkowo na rysunku tym zamieszczono również rozkład tej siły obliczony na podstawie wykonanej symulacji numerycznej. Porównanie rozkładów otrzymanych sił wykazuje podobny ich przebieg, któremu towarzyszą jednak znaczne wahania sił uniemożliwiające ocenę ilościową. Zatem za właściwe w tych warunkach uznano porównanie pracy wykonywanej przez narzędzie (zębatkę) podczas wal-

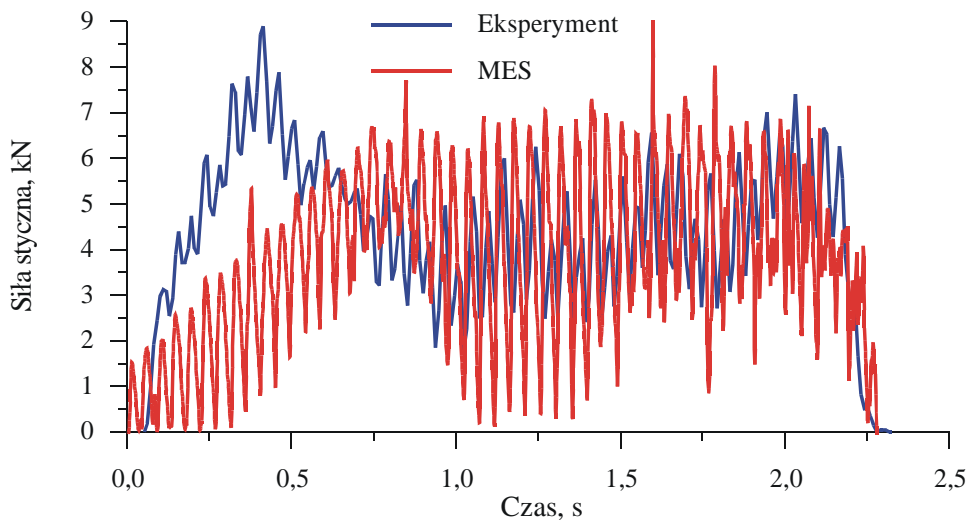
cowania: obliczonej i zmierzonej. Praca ta wyniosła odpowiednio 865 J i 1010 J. Oznacza to, że odnotowany w obliczeniach błąd wynosił około 14,3%, co dla tak skomplikowanego procesu kształtowania jak walcowanie uzębienia można uznać za wartość zadowalającą, potwierdzająca trafność wykonanych analiz numerycznych.



**Rys. 6.37.** Przebieg procesu walcowania na gorąco - w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej - uzębienia normalnego, charakteryzowanego przez moduł  $m=1,5$  mm oraz liczbę zębów  $z=18$



**Rys. 6.38.** Wieniec zębaty (o długości 30 mm) odwalcowany na wałku, w efekcie wykonanych prób laboratoryjnych



**Rys. 6.39.** Rozkłady siły stycznej zmierzone i obliczone numerycznie w porównywanym procesie walcowania wałka z uzębieniem normalnym

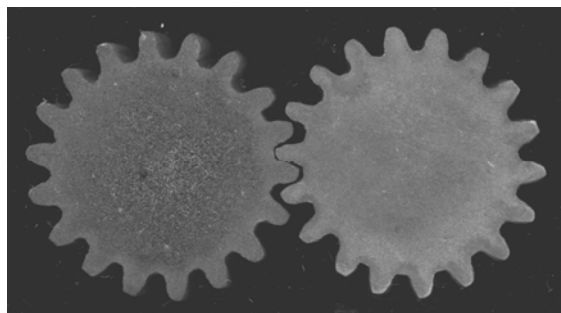
Za pomocą narzędzi przedstawionych na rys. 6.36 można kształtować wieńce zębate o długości większej niż pokazano na rys. 6.38. Ich wielkość praktycznie ograniczona jest szerokością zębátky, która wynosi 120 mm. Przykład odwalcowanego wałka z wieńcem zębatym o większej długości pokazano na rys. 6.40. Należy jednak pamiętać o tym, że zwiększenie długości stopnia uzębionego pociąga za sobą proporcjonalny wzrost sił kształtowania.

Niektóre z wieńców zębatych przecięto prostopadle do osi wzdłużnej odkuwki, odsłaniając ich przekrój poprzeczny (rys. 6.41). Analiza geometrii przekroju otrzymanego w procesie walcowania wykazała dość znaczne różnice kształtu pomiędzy zębami. Należy uznać, że proponowana metoda walcowania na gorąco uzębienia normalnego jest małodokładna i nadaje się wyłącznie do obróbki zgrubej. Przypuszcza się jednak, że ze względu na lepsze zazębienie

narzędzia i odkuwki procesy walcowania uzębienia łukowego, śrubowego i daszkowego charakteryzować będzie większa dokładność wykonania wieńca zębatego.



**Rys. 6.40.** Wieniec zębaty (o długości 60 mm) odwalcowany w walcierce laboratoryjnej LUW-2



**Rys. 6.41.** Otrzymany w procesie walcowania poprzeczny wieniec z zębami normalnymi (widok przekroju poprzecznego)

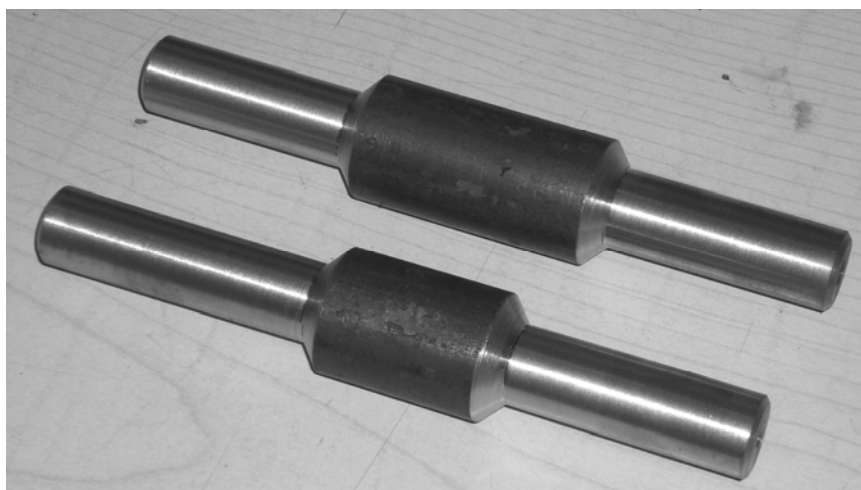
### 6.2.2. Walcowanie uzębienia skośnego

W ramach badań doświadczalnych wykonano również próby walcowania uzębienia skośnego charakteryzowanego przez moduł  $m=2$ , liczbę zębów  $z=16$  i kąt pochylenia linii zęba równy  $30^\circ$ . Na rys. 6.42 pokazano narzędzia zastosowane podczas walcowania. Charakteryzowały je następujące parametry: długość strefy kształtowania  $L_{kzt}=230$  mm, długość strefy kalibrowania  $L_{kal}=70$  mm, kąt wzniosu powierzchni kształtującej  $\gamma=0,6^\circ$ .

Uzębienie walcowano na specjalnie przygotowanych za pomocą toczenia wstępniakach, pokazanych na rys. 6.43. Miały one stopnie centralne o średnicy  $\varnothing 32$  mm (równiej średnicy podziałowej uzębienia) i długości wynoszącej 40 mm lub 60 mm, które podlegały kształtowaniu oraz stopnie skrajne (o średnicy  $\varnothing 18$  mm) służące do pozycjonowania wstępniaka w podajniku walcarki. Próbkę do walcowania wykonano ze stali w gatunku C45.



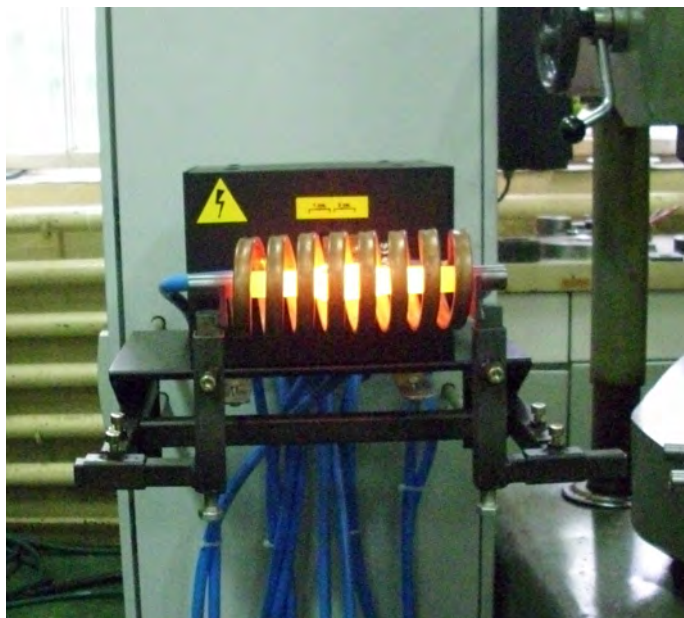
**Rys. 6.42.** Narzędzia zastosowane w próbach walcowania uzębienia skośnego o module  $m=2$  i pochyleniu linii zęba  $30^\circ$



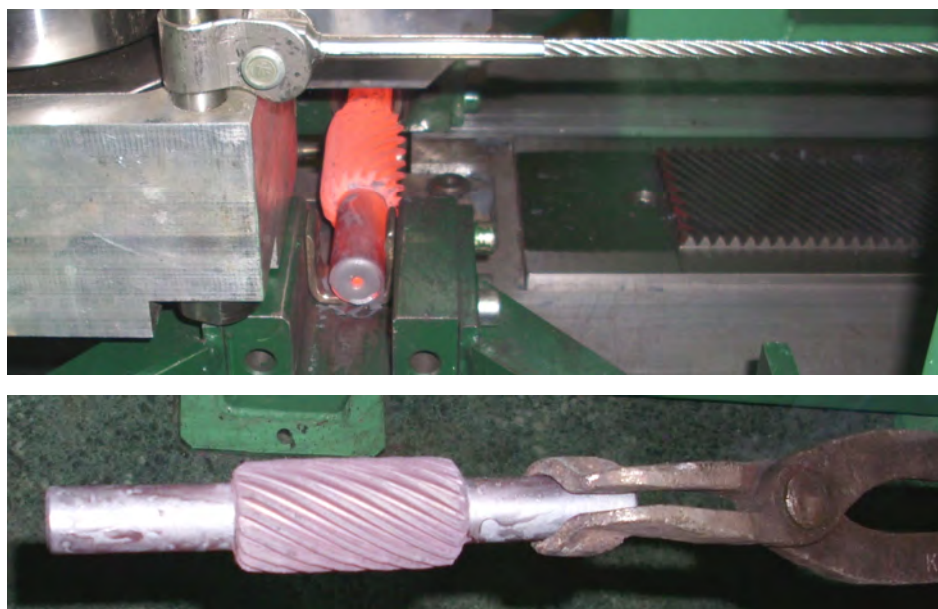
**Rys. 6.43.** Wstępniaki wykorzystane w badaniach doświadczalnych walcowania uzębienia skośnego (kąt przejścia między stopniem centralnym a bocznym równy był  $45^\circ$ )

Próbki do walcowania nagrzewano w nagrzewnicy indukcyjnej NG-430, o mocy znamionowej 30 kW – rys. 6.44. Temperaturę nagrzewania  $1100\div 1150^\circ\text{C}$  określano na podstawie barwy nagrzewanego metalu.

Po nagraniu próbki umieszczano ją w podajniku walcarki LUW-2 i prowadzono proces kształtowania przy prędkości przemieszczania narzędzi  $v=0,125$  m/s. Po zakończeniu walcowania próbkę wyciągano z podajnika i poddawano oględzinom, dokonywanym okiem nieuzbrojonym – rys. 6.45.



**Rys. 6.44.** Próbka do walcowania nagrzewana w nagrzewnicy indukcyjnej NG-430 do temperatury kształtowania



**Rys. 6.45.** Badania doświadczalne walcowania uzębienia skośnego w walcarce LUW-2 (rys. górny) oraz otrzymany wałek uzębiony poddawany oględzinom po procesie walcowania (rys. dolny)

Zgodnie z przewidywaniami dokładność wykonania uzębienia skośnego była lepsza niż normalnego. Jedynymi zauważonymi mankamentami były rysy na powierzchni zębów – rys. 6.46, wynikające z braku zaokrągleń krawędzi zębów wykonanych na szczękach kształtujących. Głębokość tych rys nie przekraczała 0,5 mm i mieściła się w naddatku na obróbkę skrawaniem. Dzięki zastosowaniu nagrzewu indukcyjnego poprawiono również jakość powierzchni odkuwek, w stosunku do uzyskiwanej w procesach walcowania z wsadów nagrzewanych w piecu elektrycznym komorowym.



**Rys. 6.46.** Wałek z odwalcowanym uzębieniem skośnym, po wystygnięciu i oczyszczeniu ze zgorzeliny



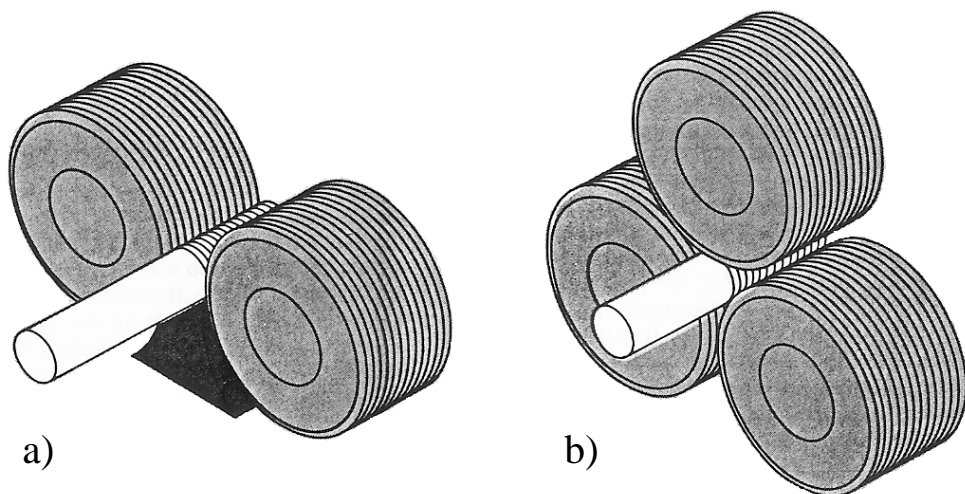


## 7. Walcowanie uzębienia ślimaka

Uzwojenia ślimaków wykonuje się obecnie przede wszystkim metodami obróbki skrawaniem. Znane są jednakże procesy walcowania [8, 52], które pozwalają walcować uzwojenia ślimaka na zimno. W procesach tych wykorzystuje się dwie lub trzy rolki napędzane (rys. 7.1), które obracając się w tym samym kierunku wygniatają uzwojenia ślimaka w kształcie śruby trapezowej. Podczas tego walcowania wsad pozycjonowany jest w kłach, a jedna z rolek podczas obrotu jest przemieszczana w kierunku promieniowym (walcowanie wgłębne).

Proces walcowania ślimaka można również zrealizować w walcierce Roto-Flo, w której najczęściej walcuje się wielokarby oraz wielowypusty ewolwentowe. Proces ten jest realizowany na zimno, a wsad pozycjonowany w kłach kształtowany jest szczękami płaskimi.

Przewiduje się, że wałki ze ślimakami (podobnie jak wałki z wieńcami zębatymi) można wytwarzać stosując metodę WPK. W bieżącym rozdziale przedstawia się wyniki prac badawczych wykonanych w celu sprawdzenia nowej koncepcji kształtowania wałków stopniowanych ze ślimakiem w kształcie śruby trapezowej.

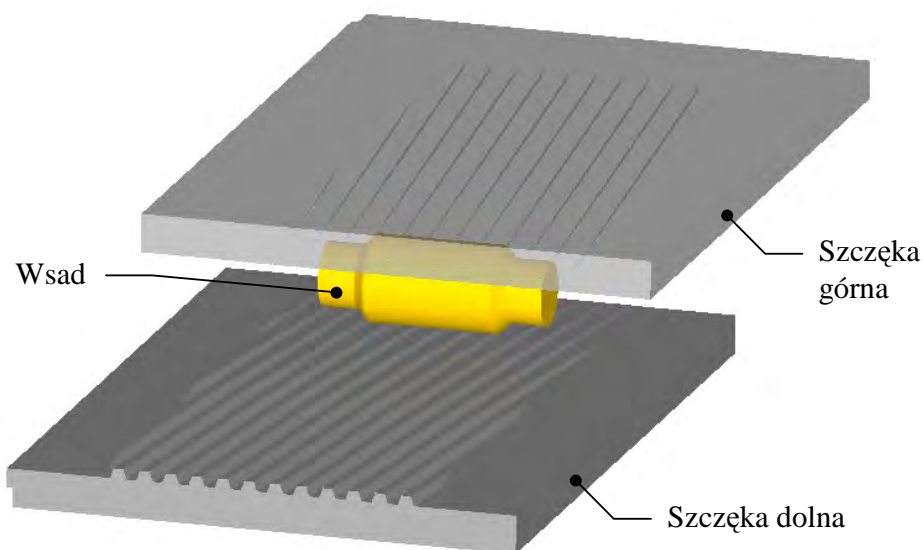


Rys. 7.1. Schemat walcowania na zimno ślimaka za pomocą: a) dwóch rolek, b) trzech rolek [8]

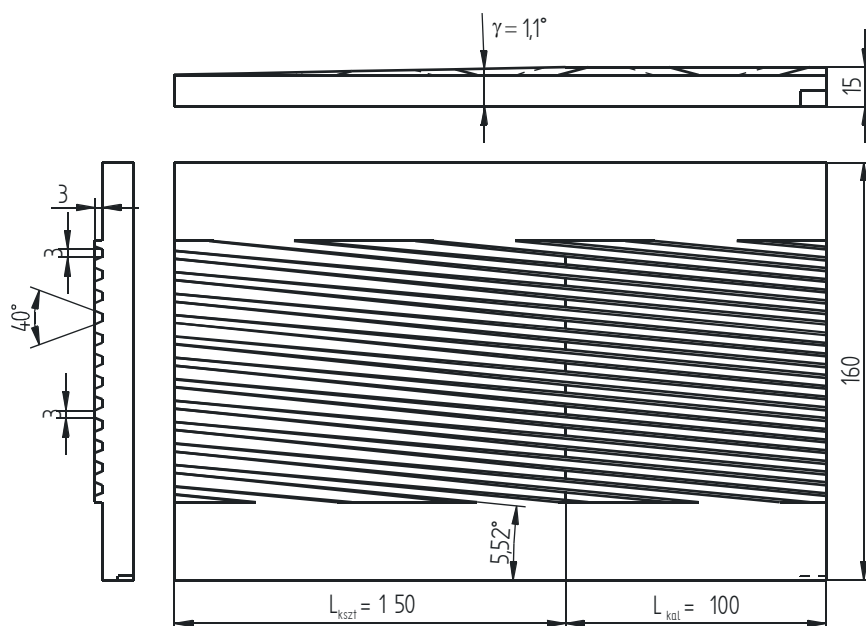
## 7.1. Analiza numeryczna

Rozważany schemat kształtowania wałka z uzwojeniem ślimaka pokazano na rys. 7.2. Walcowanie realizowane jest za pomocą dwóch przemieszczających się przeciwnie (z jednakową prędkością) szczęk płaskich. Narzędzia te wyposażone są w występy (o zwiększającej się wysokości), które wciskają się w materiał i kształtują na jego obwodzie rowki ślimaka. Metal wyciśnięty z rowków płynie do zwojów ślimaka, zwiększając ich wysokość. Zakłada się przy tym, że walcowanie przebiega bez wydłużania odkuwki w kierunku osiowym.

W ramach wykonanej analizy rozważono proces kształtowania ślimaka jednokrotnego, charakteryzowanego przez: skok zwoju  $p_z=8,18$  mm, kąt linii śrubowej  $5,52^\circ$ , wysokość zwoju  $h=3$  mm, średnicę podziałową  $d_1=27,2$  mm. Na rys. 7.3 pokazano jedną ze szczęk zabezpieczających proces walcowania analizowanego ślimaka. W narzędziu tym można wyróżnić dwie strefy: kształtującą o długości  $L_{ksz}$  i kalibrującą o długości  $L_{kal}$ . W pierwszej z nich występy kształtujące uzwojenie zwiększają swoją wysokość (pod kątem wzniosu  $\gamma$ ), która jest już ustalona w strefie kalibrowania (tam mają być usuwane nieregularności ukształtowanego uzwojenia). W obliczeniach przyjmowano, że długość części kształtującej narzędzi wynosi: 100, 150 i 200 mm. Należy pamiętać przy tym, iż w przypadku walcowania ślimaka jednokrotnego pochylenie występow na obu szczękach jest jednakowe – przy czym są one względem siebie przesunięte o wartość połowy skoku zwoju. Natomiast ślimaki dwukrotnie kształtowane są dwiema identycznymi szczękami płaskimi.

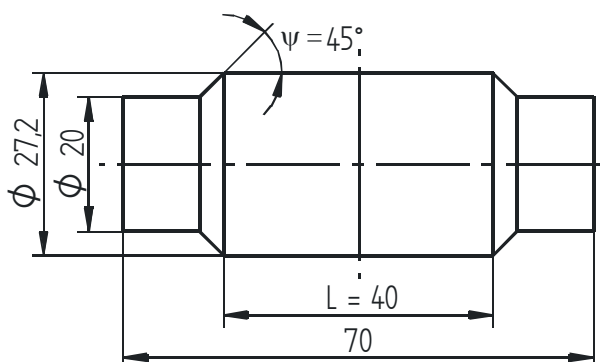


Rys. 7.2. Przyjęty do analizy schemat walcowania ślimaka dwiema szczękami płaskimi



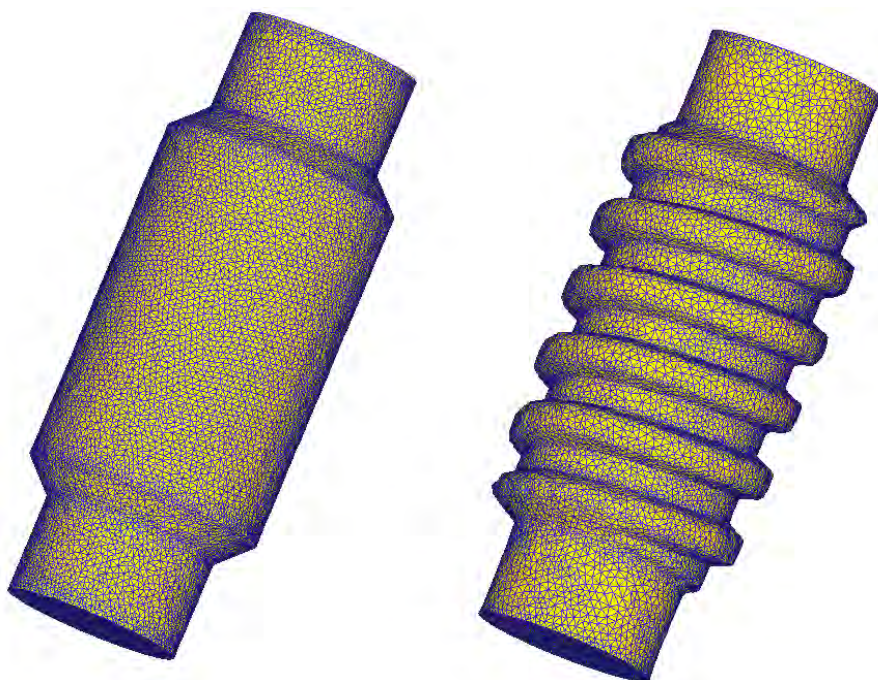
**Rys. 7.3.** Jedna ze szcęk płaskich zabezpieczających proces walcowania ślimaka

W analizie przyjęto, że średnica wsadu w obszarze kształtowanego ślimaka równa jest jego średnicy podziałowej (wynoszącej w przypadku rozważanym 27,2 mm), a szerokość wieńca uzwojonego wynosi 40 mm – rys. 7.4. Za ważny parametr analizy przyjęto także kąt ukosowania  $\psi$ , charakteryzujący przejście od średnicy podziałowej ( $\varnothing 27,2$  mm) do średnicy czopów ( $\varnothing 20$  mm), który w czasie obliczeń zmieniano w zakresie od  $20^\circ$  do  $45^\circ$ .



**Rys. 7.4.** Wymiary wsadu przyjęte w procesie walcowania ślimaka, o wysokości uzwojenia 3 mm i średnicy głównej równej  $\varnothing 30$  mm

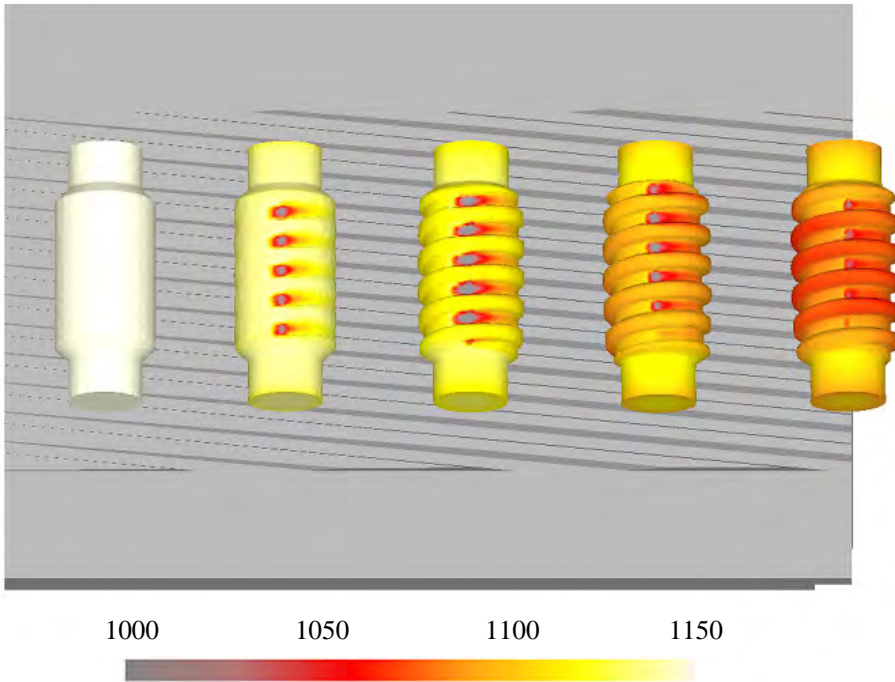
Przeprowadzenie obliczeń wymagało podzielenia wsadu (ośrodka ciągłego) na elementy (w tym przypadku czworoboczne – tetragonalne), połączone ze sobą w węzłach – rys. 7.5. Ze względu na zwiększenie dokładności obliczeń w analizie przyjmowano dużą liczbę elementów (>200000 sztuk). Ponadto, założono, że walcowanie realizowane jest w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Identycznych jak przyjętych w rozdziałach dotyczących walcowania uzębień (materiał wsadu – stal C45, temperatura wsadu - 1150°C, współczynnik wymiany ciepła metal – narzędzia – 10 kW/m<sup>2</sup>K, współczynnik wymiany ciepła metal otoczenie 0,2 kW/m<sup>2</sup>K, prędkość narzędzi 0,1 m/s, czynnik tarcia na powierzchni kontaktu metal – narzędzie równy 1,0).



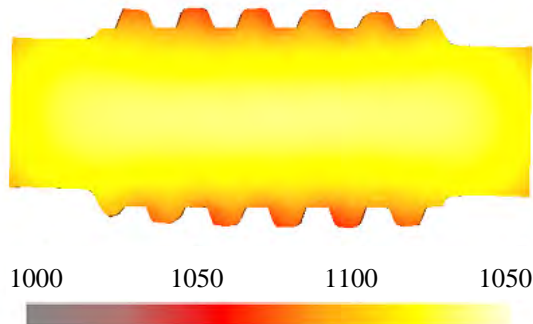
**Rys. 7.5.** Przyjęty w obliczeniach podział na elementy wsadu oraz wyrobu otrzymanego w symulacji walcowania szczękami płaskimi, charakteryzowanymi przez  $h=3$  mm oraz  $L_{k_{szl}}=150$  mm

Na rys. 7.6 przedstawiono progresję kształtu odkuwki w procesie walcowania na gorąco analizowanego ślimaka jednokrotnego. Można stwierdzić, że występy segmentów narzędziowych płynnie wciskają się w odkuwkę wywołując jej ruch obrotowy i kształtując uzwojenia ślimaka. Odnośnie otrzymanych rozkładów temperatury należy stwierdzić, iż temperatura w obszarze uzwojenia jest mniejsza od temperatury metalu w częściach odkuwki nie przerabianych plastycznie o około 100 °C. Jednakże jest to temperatura nadal mieszcząca się w zakresie kształtowania na gorąco stali w gatunku C45. Fakt ten oznacza, iż

proces walcowania ślimaka pod względem termicznym został zaprojektowany w sposób prawidłowy. Świadczy o tym również rozkład temperatury w przekroju osiowym (wzdłużnym) wałka (rys. 7.7). Wynika z niego, że zmniejszenie temperatury metalu (o około  $100^{\circ}\text{C}$ ) odnosi się wyłącznie do warstw przypowierzchniowych (obszar uzwojenia) i może być szybko zre-kompensowane przez ciepło przepływające z warstw wewnętrznych odkuwki.



**Rys. 7.6.** Zmiana kształtu odkuwki w procesie walcowania ślimaka - charakteryzowanego przez  $h=3$  mm,  $p_z=8,18$  mm,  $d=30$  mm – z zaznaczonym rozkładem temperatury (w  $^{\circ}\text{C}$ )

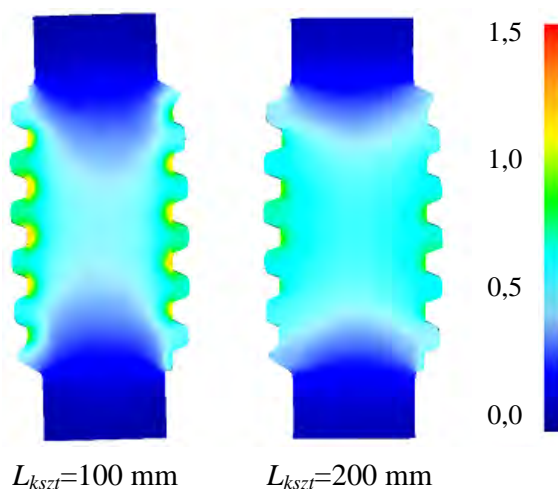


**Rys. 7.7.** Rozkład temperatury (w  $^{\circ}\text{C}$ ) w przekroju osiowym wałka ślimaka otrzymanego w procesie walcowania szczękami płaskimi

Interesująco przedstawia się rozkład intensywności odkształcenia w przekroju wzdłużnym (osiowym) ukształtowanego ślimaka, pokazanym na rys. 7.8. Wynika z niego, że zwiększenie długości strefy kształtowania powoduje bardziej intensywny przerób plastyczny metalu w objętości stopnia, na którym walcowane są uzwojenia. Zmniejszają się wówczas różnice między wartościami intensywności odkształcenia w obszarze przypowierzchniowym i osiowym materiału. Z tego też powodu należy uznać, że wydłużenie strefy kształtowania w szczękach do walcowania uzwojenia ślimaka jest słuszne, gdyż zmniejsza dysproporcje w własnościach wytrzymałościowych uzyskiwanej odkuwki.

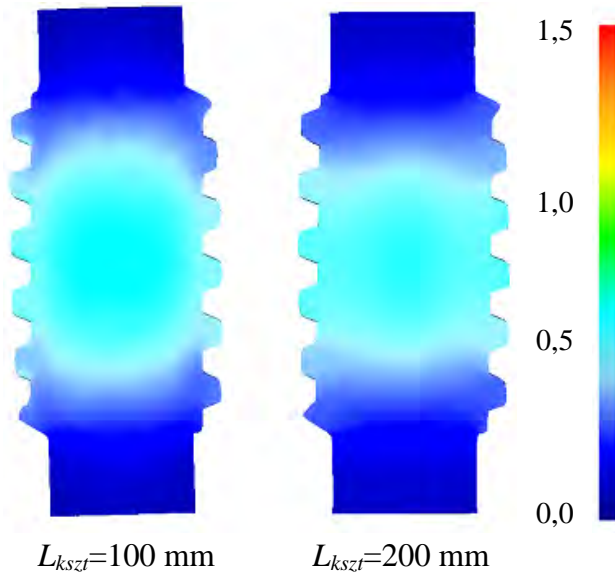
Pokazany na kolejnym rysunku 7.9 rozkład kryterium zniszczenia (obliczony wg hipotezy Cockrofta-Lathama) daje podstawy do stwierdzenia, że w omawianym procesie walcowania ślimaka nie powstaną pęknięcia wewnętrzne. Wartość całki Cockrofta-Lathama, odnotowana w przekroju osiowym odkuwek, jest mniejsza od 0,7. Ponadto zauważono, iż dwukrotne wydłużenie części kształtującej narzędzia sprzyja bardziej równomiernemu rozłożeniu kryterium zniszczenia, powodując przy tym nieznaczne zmniejszenie jego wartości maksymalnej.

W ramach wykonanych obliczeń numerycznych analizowano również przypadki kształtowania ślimaków o zwiększonej wysokości zwojów  $h=4,4$  mm, skoku  $p_z=8,20$  mm oraz średnicy głów równej  $\varnothing 30$  mm. W tym przypadku wsad do walcowania o kształcie zgodnym z pokazanym na rys. 7.4 miał nieco mniejszą średnicę maksymalną, która wynosiła  $\varnothing 25,9$  mm. Ponadto, rozważono trzy przypadki walcowania ślimaka (o podanych powyżej parametrach), przyjmując kąt stożka  $\psi$  (zgodnie z rys. 7.4) równy:  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $20^\circ$ .



**Rys. 7.8.** Rozkład intensywności odkształcenia w przekrojach osiowych odkuwek (kształtowanych szczękami o różnej długości  $L_{kszt}$ ) po odwalcowaniu ślimaka jednokrotnego, dla którego:  $h=3$  mm,  $d=30$  mm,  $p_z=8,18$  mm





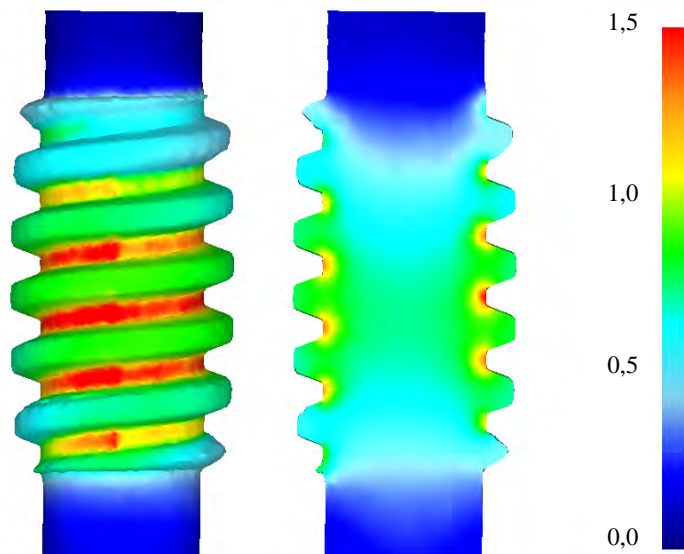
**Rys. 7.9.** Rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama w przekroju osiowym ślimaka jednokrotnego, charakteryzowanego przez:  $h=3$  mm,  $d=30$  mm,  $p_z=8,18$  mm

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że również w tym przypadku proces kształtowania ślimaka powinien zakończyć się sukcesem. Przykład ślimaka (o prawidłowo odwalcowanym kształcie) uzyskanego w symulacji analizowanego procesu kształtowania pokazano na rys. 7.10, na którym zaznaczono również rozkłady intensywności odkształcenia.

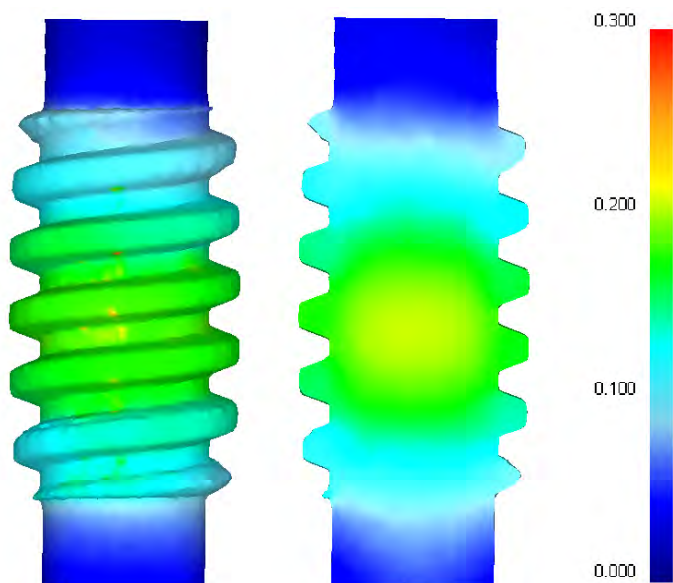
Z porównania danych przedstawionych na rysunkach 7.8 oraz 7.10 wynika, że zwiększenie wysokości uzwojenia wywołuje wzrost intensywności odkształcenia, które w obu analizowanych przypadkach jest największe w dnach rowków. Równocześnie stwierdzono, że w przypadku walcowania zwojów o wysokości  $h=4,4$  mm rozkład odkształceń – rys. 7.10 – (w strefie osiowej odwalcowanego wieńca) nie jest już tak symetryczny jak podczas kształtowania ślimaka mającego uzwojenie o wysokości  $h=3$  mm (rys. 7.8). Przypuszcza się, że jest to wynikiem występowania zwiększonej siły działającej w kierunku osiowym odkuwki wywołanej pochyleniem zwojów ślimaka względem kierunku walcowania (pod kątem linii śrubowej walcowanego uzwojenia).

Na kolejnym rysunku 7.11 pokazano rozkład kryterium zniszczenia (całki Cockrofta-Lathama) na powierzchni oraz w przekroju osiowym ślimaka o wysokości uzwojenia 4,4 mm. Na podstawie tego rysunku można wnioskować, że zwiększenie przerobu plastycznego metalu (następujące w efekcie wciskania występów szczepek na większą głębokość) skutkuje zmniejszeniem odnotowanych wartości kryterium zniszczenia. Można zatem podać, że zwiększaniu uzwojenia

ślimaka (kształtowanego walcowaniem poprzecznym) towarzyszy zmniejszenie prawdopodobieństwa pęknięcia metalu, przede wszystkim w strefie centralnej.



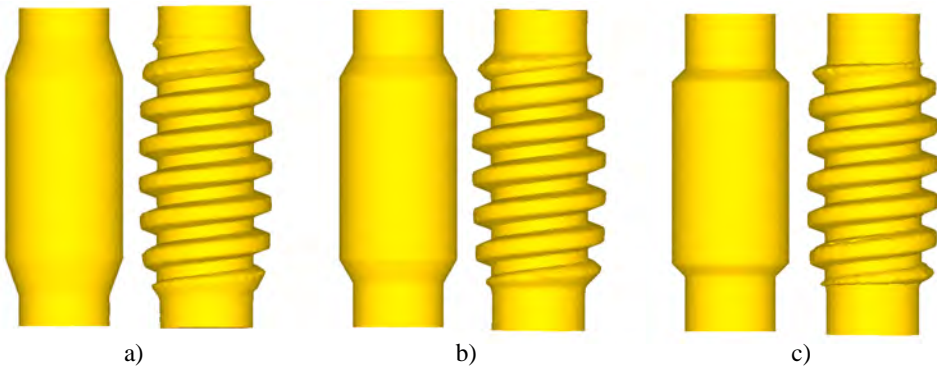
**Rys. 7.10.** Rozkład intensywności odkształcenia w ślimaku jednokrotnym o wysokości uzwojenia równej 4,4 mm, kształtowanym ze wstępnika o kącie  $\psi=45^\circ$



**Rys. 7.11.** Rozkład kryterium zniszczenia w ślimaku jednokrotnym o wysokości uzwojenia równej 4,4 mm, kształtowanym ze wstępnika o kącie  $\psi=45^\circ$

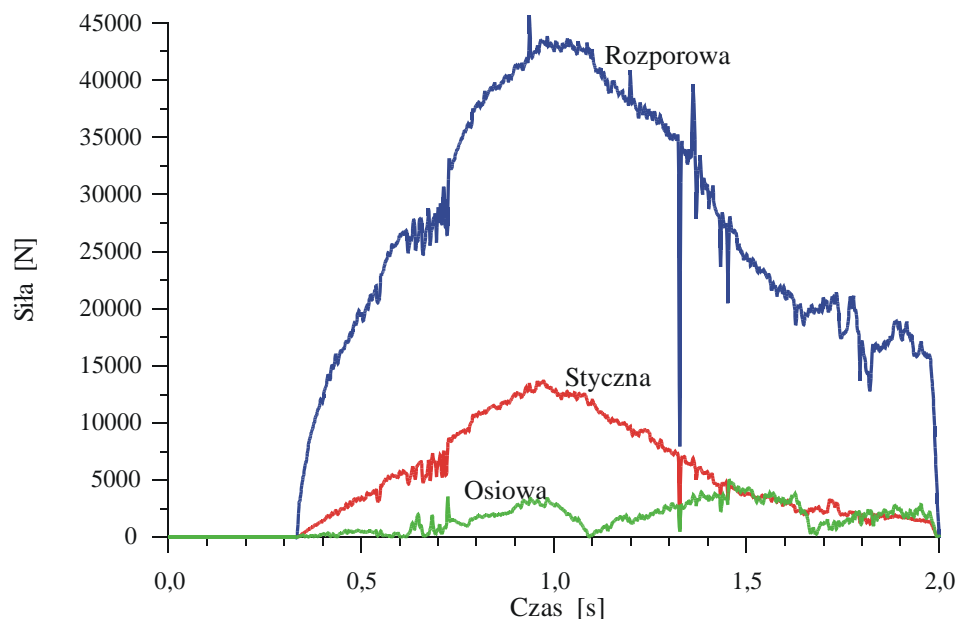


Ciekawe spostrzeżenia wynikają z analizy wpływu kąta stożka  $\psi$  na wstępniaku (rys. 7.4) na dokładność otrzymywanego uzwojenia ślimaka. Na rys. 7.12 pokazano przyjęte do obliczeń wstępniaki oraz odwalcowane z nich odkuwki (prognozowane numerycznie). Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że w przypadku walcowania z wstępniaków charakteryzowanych dużym kątem  $\psi$  skrajne uzwojenia ślimaka są zniekształcone przez podcięcia, widoczne na powierzchniach bocznych zwojów. Podsumowując wyniki obliczeń stwierdzono, że dla zapewnienia właściwego kształtu walcowanego uzwojenia ślimaka należy go kształtować ze wstępniaka, dla którego kąt stożka  $\psi$  jest mniejszy lub równy  $30^\circ$ .

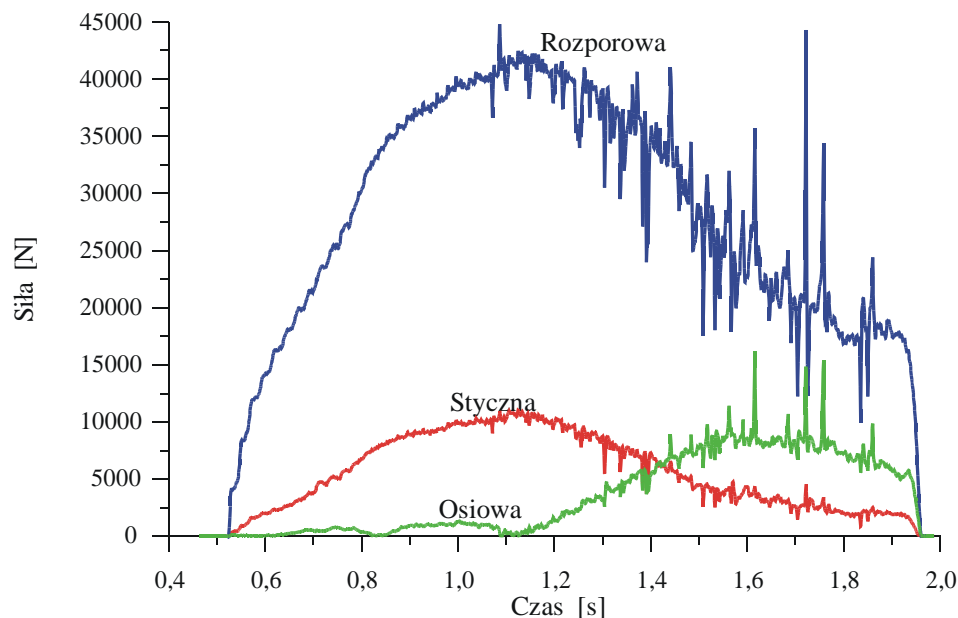


**Rys. 7.12.** Wpływ kształtu wstępniaka (kąta  $\psi$ ) na uzwojenie ślimaka o wysokości uzwojenia 4,4 mm: a)  $\psi=20^\circ$ , b)  $\psi=30^\circ$ , c)  $\psi=45^\circ$  (widoczne są podcięcia na powierzchni bocznej uzwojenia kształtowanego ze wstępniaka z  $\psi=45^\circ$ )

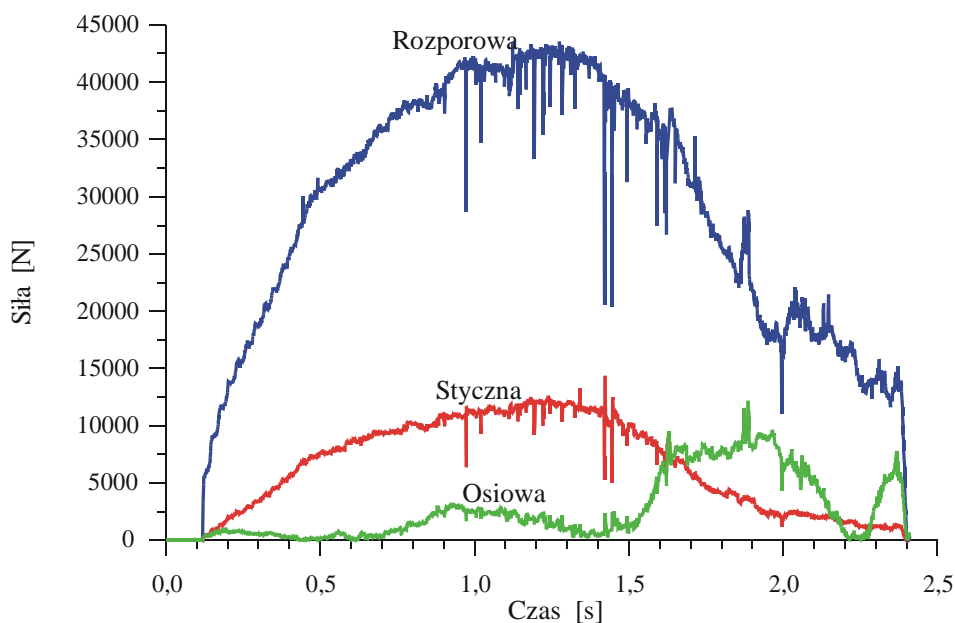
Na podstawie wykonanych obliczeń zauważono także, że zarówno zmiana długości strefy kształtowania podczas walcowania uzwojenia o wysokości 3,0 mm (rys. 7.13 i 7.14) jak i zwiększenie wysokości uzwojenia do 4,4 mm (rys. 7.15) nie wpływa w sposób znaczący na wartość składowych siły walcowania. Stwierdzono przy tym, że składowa styczna (wciskająca narzędzie) i rozporowa (decydująca o dokładności walcowania) zwiększają się stopniowo w strefie kształtowania, przyjmują wartości największe na granicy stref kształtowania i kalibrowania, a następnie stopniowo zmniejszają się. Ponadto zauważono, że w odróżnieniu od poprzednio analizowanych procesów walcowania poprzeczno-klinowego (poprzecznego) podczas kształtowania ślimaka występuje dodatkowa siła skierowana wzdłuż osi odkuwki, która przyjmuje wartości relatywnie najmniejsze z trzech składowych tej siły i jest największa w czasie kalibrowania uzwojenia. Ta składowa siły walcowania może wywołać niepożądane przesunięcie odkuwki w kierunku osiowym.



**Rys. 7.13.** Rozkład składowych siły walcowania w procesie kształtowania ślimaka jednokrotnego o uzwojeniu o wysokości  $h=3,0$  mm, narzędziem o długości strefy kształtowania  $L_{ksz}=100$  mm



**Rys. 7.14.** Rozkład składowych siły walcowania w procesie kształtowania ślimaka jednokrotnego o uzwojeniu o wysokości  $h=3,0$  mm, narzędziem o długości strefy kształtowania  $L_{ksz}=150$  mm



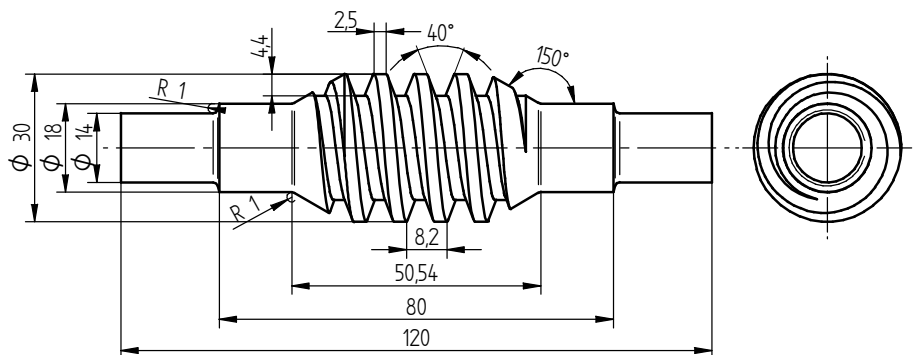
**Rys. 7.15.** Rozkład składowych sił walcowania w procesie kształtowania ślimaka jednokrotnego z uzwojeniem o wysokości  $h=4,4$  mm

### 7.1.1. Przykład kształtowania

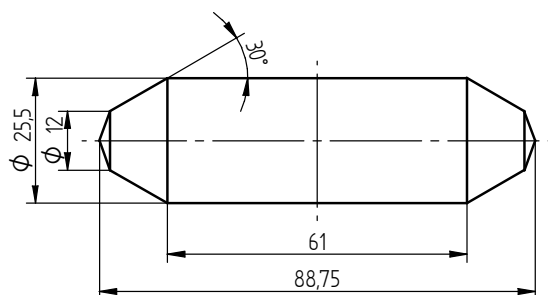
Wkładki do kształtowania uzwojenia ślimaka powinny być umieszczane na końcu narzędzia kształtującego, tj. za strefą odcinania lub kalibrowania, gdy nie stosuje się noży odcinających. W drugim z wymienionych przypadków, gdy walcowane są stopnie skrajne odkuwki należy stosować wsad ze specjalnie przygotowanymi końcami.

Dla potwierdzenia słuszności opracowanej koncepcji walcowania wałków ze ślimakami dokonano analizy numerycznej procesu kształtowania odkuwki wałka, pokazanej na rys. 7.16. Założono, że średnica wsadu do walcowania równa jest średnicy podziałowej uzwojenia ślimaka, które wykonywane jest na największym (centralnym) stopniu odkuwki. Wymiary wsadu podano na kolejnym rysunku 7.17.

Klin zapewniający realizację procesu kształtowania odkuwki wałka (rys. 7.16) z wsadu (rys. 7.17) pokazano na rys. 7.18. Składa się on z dwóch części. Pierwsza z nich to typowe narzędzie klinowe (charakteryzowane przez kąty  $\alpha=25^\circ$  i  $\beta=7,5^\circ$ ), które działając na wsad redukuje jego średnicę, w efekcie czego powstają cylindryczne, skrajne stopnie wałka. Druga część narzędzia, to umieszczona centralnie, szczęka kształtująca uzwojenia ślimaka. Kąt pochylenia rowków wykonanych w szczęce jest zgodny z kątem pochylenia linii śrubowej zwojów ślimaka.



**Rys. 7.16.** Wałek ze ślimakiem przyjęty w analizie numerycznej, weryfikującej opracowaną metodę walcowania

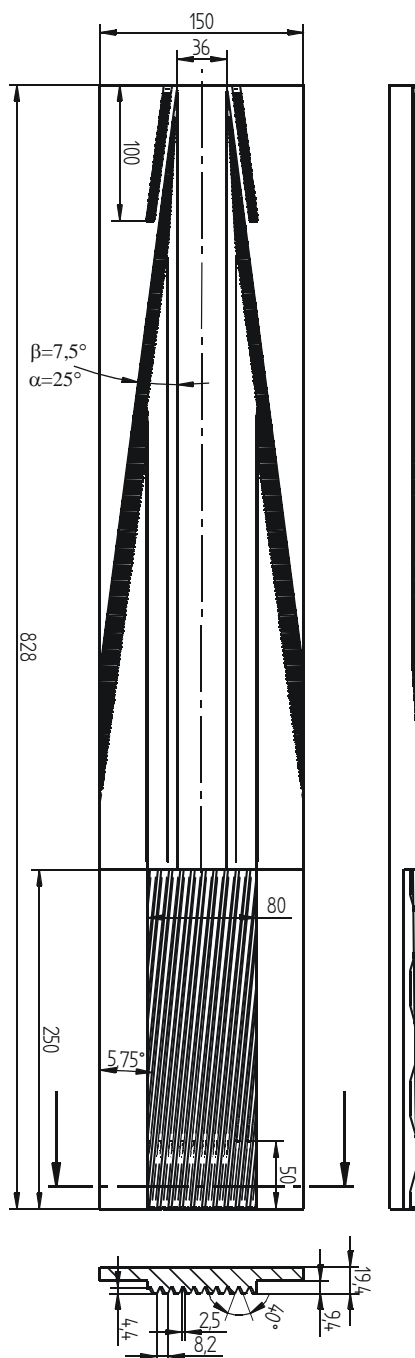


**Rys. 7.17.** Wsad zabezpieczający proces kształtowania wałka pokazanego na rys. 7.16

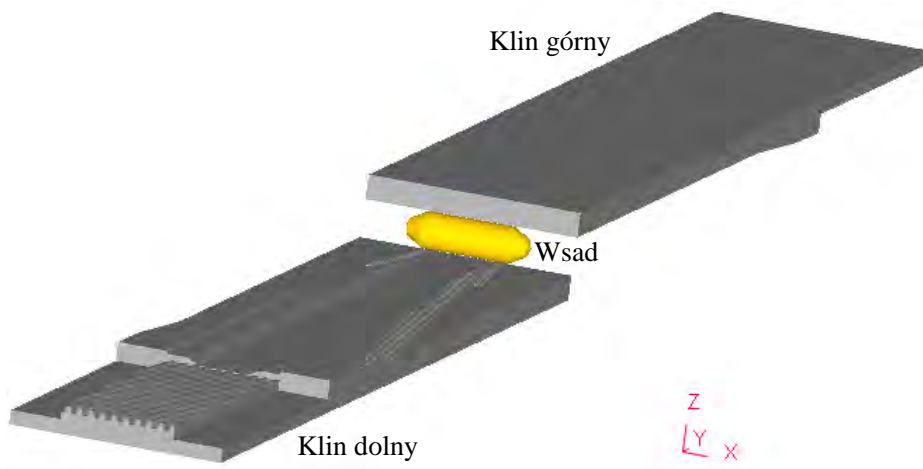
Model przestrzenny narzędzi klinowych (wykonany w systemie CAD) został wykorzystany do zbudowania modelu geometrycznego analizowanego procesu kształtowania wałka. Oprócz narzędzi klinowych w skład modelu wchodzi również materiał wsadowy – rys. 7.19.

Symulację numeryczną wykonano w programie DEFORM-3D przyjmując, że:

- ❑ wsad, wykonany jest ze stali C45, nagrzewany jest do temperatury 1150°C;
- ❑ narzędzia przemieszczają się przeciwnie z prędkością 0,15 m/s każde;
- ❑ narzędzia zachowują się jak ciała doskonale sztywne i mają stałą temperaturę 150°;
- ❑ współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami wynosi 10 kW/m<sup>2</sup>K, a między materiałem a otoczeniem 0,2 kW/m<sup>2</sup>K;
- ❑ tarcie na powierzchni kontaktu materiał – narzędzie przyjmuje wartości graniczne (czynnik tarcia  $m=1,0$ ).

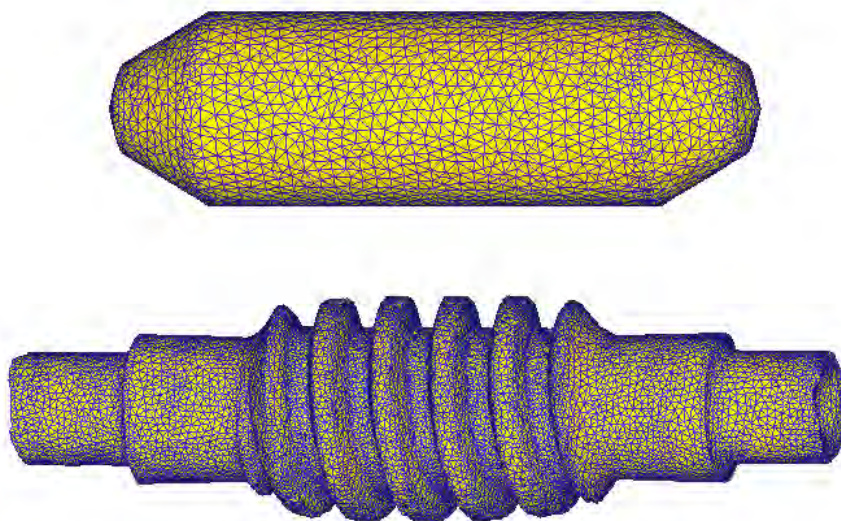


**Rys. 7.18.** Narzędzie klinowe proponowane do kształtowania odkuwki wałka pokazanego na rys. 7.16



**Rys. 7.19.** Model geometryczny procesu WPK wałka ze ślimakiem, wykorzystany w obliczeniach numerycznych

Do modelowania odkuwki wykorzystano 4-węzłowe elementy czworosienne (tetraedralne). W trakcie obliczeń dokonywano wielokrotnej przebudowy siatki, czyli tzw. remeshingu. Zwiększająca się złożoność kształtu odkuwki wymuszała przy tym stosowanie co raz to większej liczby elementów, która zwiększyła się od ok. 28.000 (dla wsadu) do ponad 150.000 (dla odkuwki gotowej) – rys. 7.20.



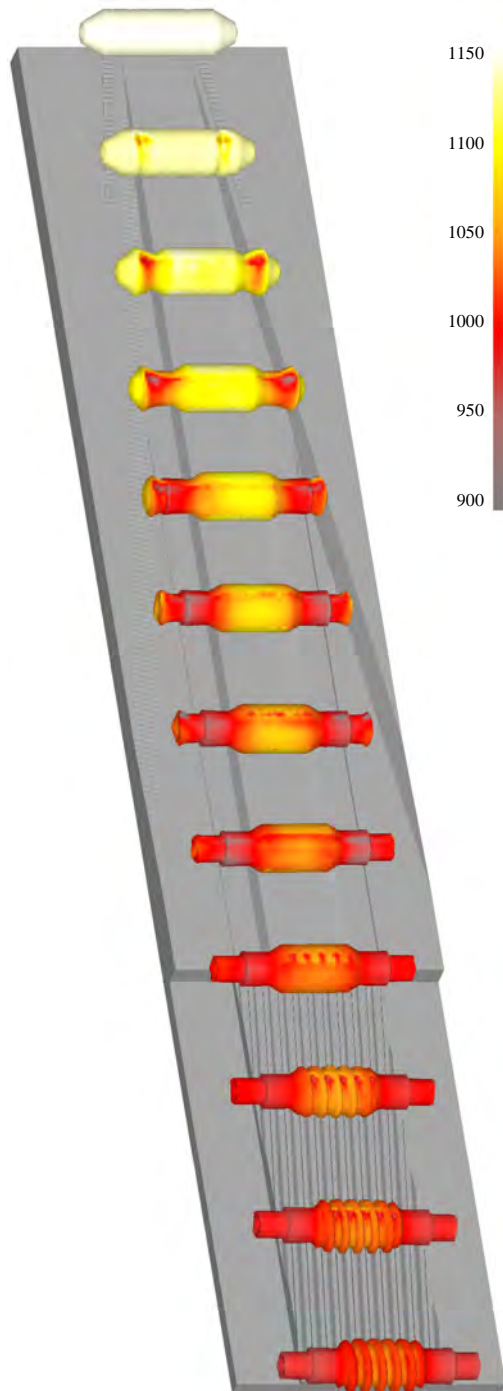
**Rys. 7.20.** Podział wsadu oraz otrzymanej walcowaniem odkuwki wałka na elementy czworosienne

Rezultaty otrzymane z obliczeń numerycznych w pełni potwierdziły zasadność stosowania metody WPK do kształtowania wałków ze ślimakiem w kształcie śruby trapezowej. Na rys. 7.21 pokazano jak zmienia się kształt odkuwki w procesie jej walcowania: od wsadu cylindrycznego (z końcami stożkowymi) do wałka ze ślimakiem.

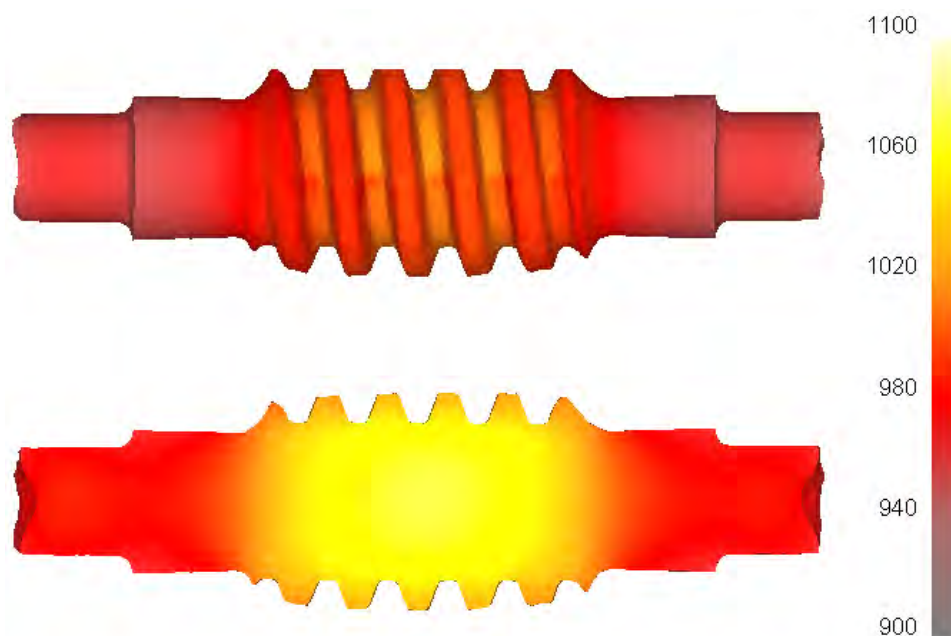
Z danych zamieszczonych na rys. 7.21 wynika, iż proces walcowania jest stabilny (nie występują niekontrolowane poślizgi) zarówno podczas kształtowania stopni cylindrycznych wałka jak i uzwojenia ślimaka. Ponadto, można stwierdzić, że mimo dość długotrwałego kontaktu narzędzi z odkuwką, jej temperatura mieści się w zakresie właściwym dla procesów obróbki plastycznej na gorąco.

Na rys. 7.22 pokazano rozkład temperatury na powierzchni odkuwki oraz w jej przekroju osiowym (wzdłużnym). Można stwierdzić, że w części odkuwki, w której walcowane jest uzębienie temperatura spada zaledwie o ok.  $50^{\circ}\text{C}$ . Natomiast w stopniach skrajnych wałka (walcowanych w typowym procesie WPK) odnotowano czterokrotnie większy spadek temperatury (o ok.  $200^{\circ}\text{C}$ ), wskutek długotrwałego kontaktu między narzędziami a materiałem odkuwki.

**Rys. 7.21.** Zmiana kształtu odkuwki wałka w analizowanym procesie kształtowania z zaznaczonym rozkładem temperatury na jej powierzchni (w  $^{\circ}\text{C}$ )







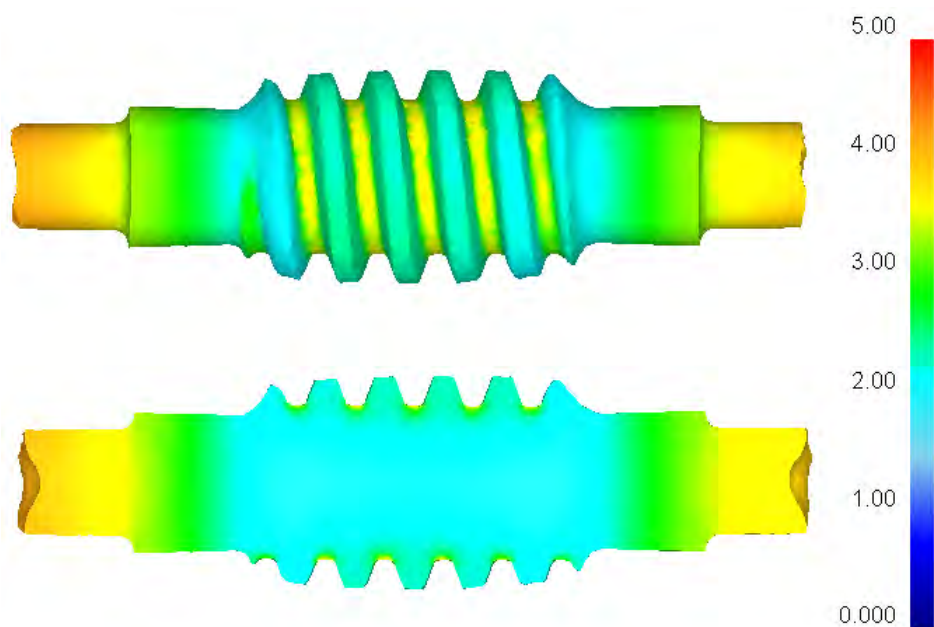
**Rys. 7.22.** Rozkład temperatury (w °C) w odkuwce wałka otrzymanego w analizowanym procesie WPK

Analizując kształt odkuwki otrzymanej w procesie walcowania zauważa się niewielkie wklęsnięcia w powierzchniach czołowych. Mogą być one z łatwością usunięte w procesie obróbki skrawaniem. Ponadto, można ich uniknąć poprzez korekcję kształtu wsadu, polegającą na zmniejszeniu kąta rozwarcia stożka jego końców.

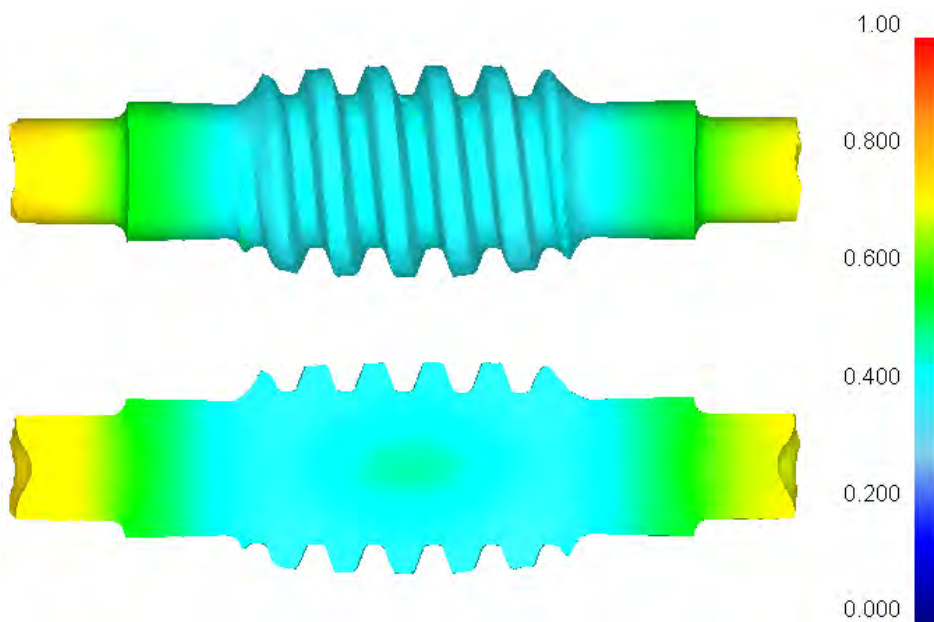
Na kolejnym rys. 7.23 przedstawiono rozkład intensywności odkształcenia w odkuwce wałka. Największe odkształcenia występują w stopniach skrajnych wałka, gdzie materiał jest przerabiany plastycznie na wskroś. Natomiast, w stopniu centralnym, na którym walcowane jest uzwojenie ślimaka odkształcenie ma charakter powierzchniowy. Największe wartości przyjmuje ono w okolicy ukształtowanych rowków, a najmniejsze w strefie osiowej wałka.

W efekcie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono również rozkłady kryterium zniszczenia (wg Cockrofta-Lathama), które pokazano na rys. 7.24. Odnotowano, że wartości maksymalne tego kryterium są mniejsze od 0,7. Zatem z dużym prawdopodobieństwem stwierdzono, iż w analizowanym procesie nie powinno dochodzić do pęknięcia metalu (wewnątrz i na powierzchni) odkuwki kształtowanej.



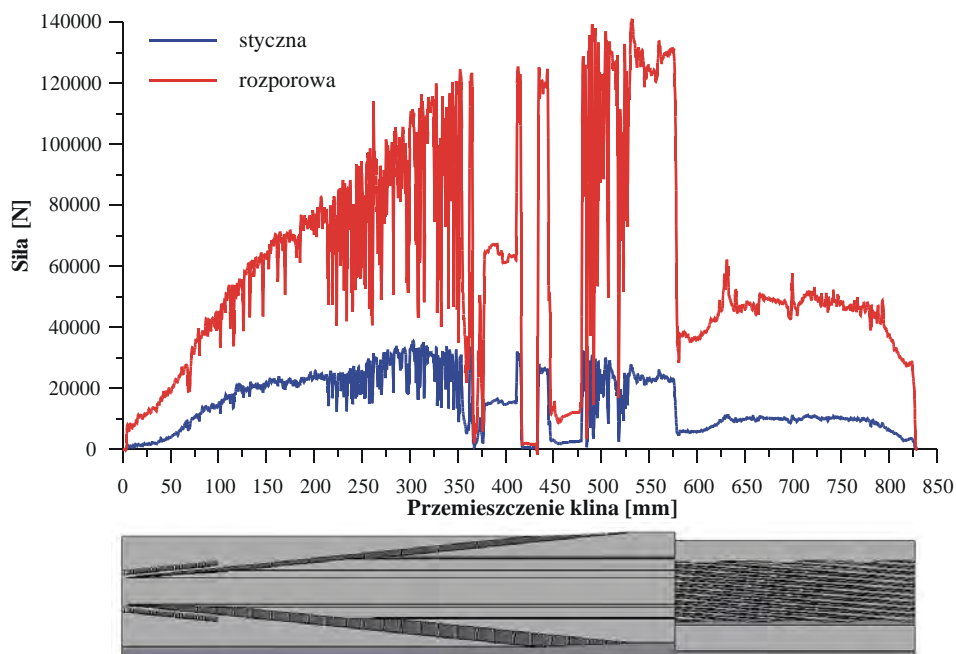


**Rys. 7.23.** Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwce wałka otrzymanego w analizowanym procesie WPK



**Rys. 7.24.** Rozkład kryterium zniszczenia wg. Cockrofta-Lathama w odkuwce wałka otrzymanej w analizowanym procesie WPK

Na kolejnym rys. 7.25 przedstawiono rozkłady sił: stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (prostopadłej do powierzchni kalibrujących narzędzia). Wyniki obliczeń wykazują, że siły w procesie kształtowania uzwojenia ślimaka są około trzech razy mniejsze od sił występujących podczas walcowania stopni skrajnych – w sposób właściwy dla WPK. Świadczy to o tym, że walcarki do WPK charakteryzuje nadmiar mocy koniecznej do ukształtowania uzwojenia ślimaka. Prawdopodobnie fakt ten wynika z mniejszego przerobu plastycznego metalu, w strefie kształtowanego uzwojenia, ograniczonego do warstw przy powierzchniowych odkuwki.



**Rys. 7.25.** Rozkład sił kształtowania (obliczony MES) w procesie walcowania odkuwki wałka, pokazanej na rys. 7.16

## 7.2. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne walcowania ślimaka (w kształcie śruby trapezowej) przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, przy użyciu walcarki LUW-2. W wykonanych próbach ograniczono się do kształtowania uzwojeń ślimaka jednokrotnego o wysokości  $h=3,0$  mm, za pomocą narzędzi (rys. 7.26) o parametrach zgodnych z przedstawionymi na rys. 7.3 i  $L_{ksz}=200$

mm. Założono przy tym, że parametry walcowania będą zgodne (w stopniu maksymalnym) z tymi, które przyjmowano w trakcie analizy numerycznej. Takie podejście pozwoliło porównać wybrane wyniki obliczeń z rezultatami z badań doświadczalnych, co w konsekwencji umożliwiło weryfikację przyjętego w symulacji modelu numerycznego procesu walcowania poprzecznego ślimaka.

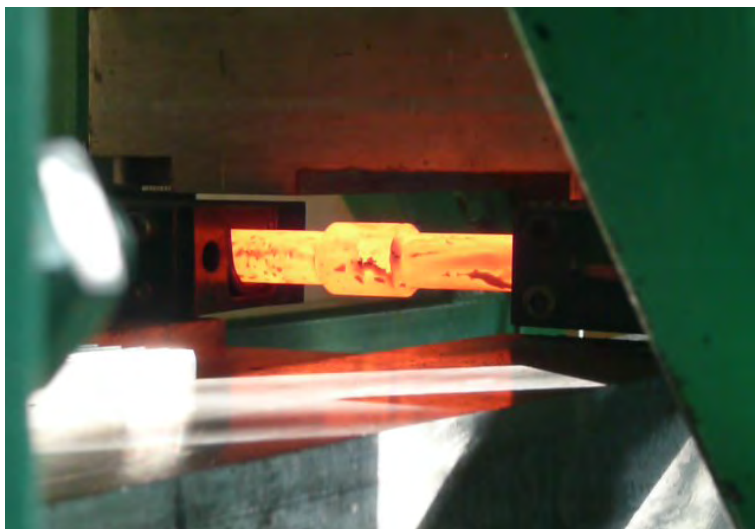


**Rys. 7.26.** Szczęki narzędziowe wykorzystane w badaniach doświadczalnych, realizowanych w zakresie kształtowania uzwojenia ślimaka jednokrotnego o wysokości  $h=3,0$  mm

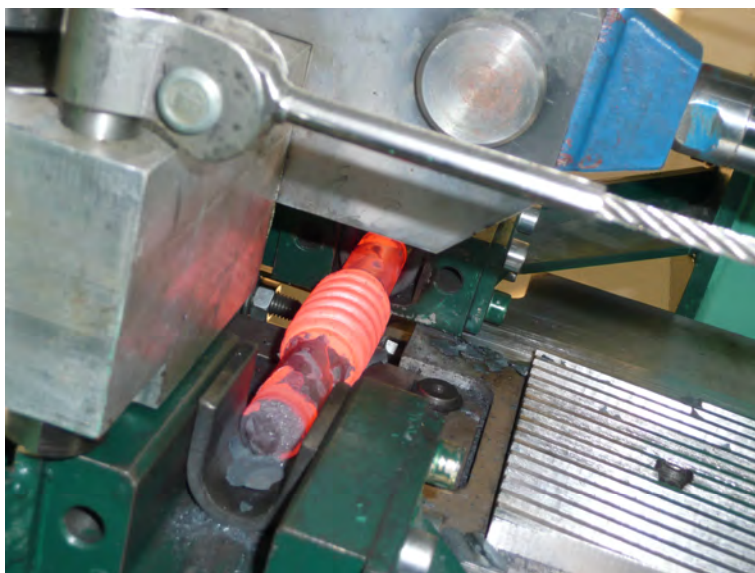
W badaniach zastosowano wsady o kształcie zgodnym z podanym na rys. 7.4, wykonane ze stali w gatunku C45. Średnice poszczególnych stopni były zgodne z podanymi na rys. 7.4, natomiast długość  $L$  stopnia i kąt  $\psi$  zmieniano w trakcie badań.

Wsady do walcowania nagrzewano w piecu elektrycznym, oporowym do temperatury  $1150$  °C, a następnie umieszczano w podajniku walcarki (rys. 7.27). Po włączeniu napędu przemieszczające się przeciwnie narzędzia kształtowały uzwojenia ślimaka na wałku (rys. 7.28).

Po procesie walcowania wałki z ukształtowanymi ślimakami chłodzono w powietrzu swobodnym, a następnie po oczyszczeniu ze zgorzeli poddawano oględzinom. Stwierdzono, że odkuwki mają prawidłowy kształt co potwierdza, iż przyjęta koncepcja kształtowania ślimaków może być z powodzeniem wykorzystywana w warunkach przemysłowych. Przykładowe wałki ze ślimakami otrzymane podczas prób laboratoryjnych pokazano na rys. 7.29.



**Rys. 7.27.** Wsad nagrany do temperatury kształtowania, po umieszczeniu w podajniku walcarki w procesie walcowania uzwojenia ślimaka jednokrotnego



**Rys. 7.28.** Odkuwka ślimaka bezpośrednio po przeprowadzonym procesie walcowania uzwojenia w kształcie śruby trapezowej

Analiza kształtu zwojów wykazuje, że są one wykonane prawidłowo. Jedyne w zwojach zewnętrznych można zauważyć niewielkie podcięcia. Są one prawdopodobnie wynikiem zwiększonego płynięcia metalu w kierunku osio-

wym. Zatem można spodziewać się, iż zastosowanie narzędzi wyposażonych w specjalne listwy (przylegające do powierzchni stożkowych wieńca) skutecznie wyeliminuje przyczynę powstawania podcięć. Ponadto należy zauważyć, że głębokość podcięć jest niewielka i mieści się w nadwyżce na obróbkę skrawaniem (zależnego od gabarytów odkuwki i wynoszącego w analizowanych przypadkach  $1 \div 1,5$  mm).



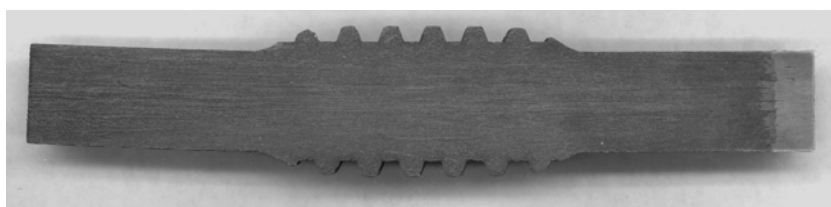
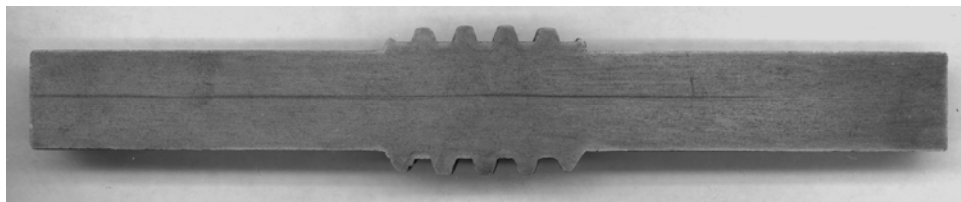
**Rys. 7.29.** Przykłady odkuwek, ze ślimakami otrzymanymi proponowaną metodą walcowania poprzecznego szczękami płaskimi

Niektóre z odwalcowanych wałków poddano obróbce skrawaniem (frezowaniu i szlifowaniu) w celu odsłonięcia przekrojów osiowych, które następnie poddano głębokiemu trawieniu. Prowadzono je w odczynniku Jacewicza (38 ml kwasu solnego, 12 ml kwasu siarkowego, 50 ml wody destylowanej) w temperaturze ok.  $95^{\circ}\text{C}$  i w czasie ok. 20 minut. W wyniku trawienia uwidocznione zostały linie płynięcia metalu (układ włókien), które przedstawiono na rysunku 7.30.

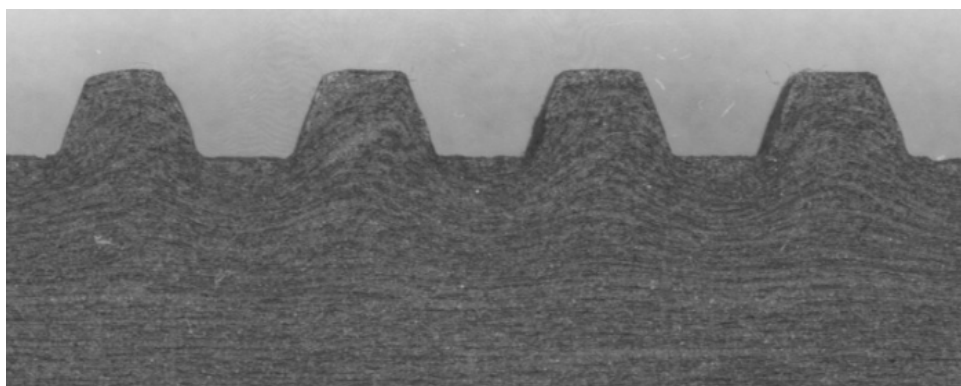
Na rys. 7.30 widoczny jest wzdłużny charakter linii płynięcia. W osiowej części linie te są wyraźne, natomiast w warstwach zewnętrznych są praktycznie niewidoczne. Jednak powiększenie tego obszaru (rys. 7.31) pokazuje, że włókna metalu w obszarze uzwojenia układają się faliście. Jest to efektem powierzchniowego płynięcia metalu, który wyciskany jest z wrębów do głów zwojów.

W przekroju wzdłużnym jednej z odkuwek (rys. 7.30) widoczna jest ciemniejsza linia, która sugeruje występowanie nieciągłości lub koncentrację jakiegoś składnika strukturalnego. Miejsce to poddane zostało badaniom na występowanie pęknięć metodą prądów wirowych. Nie stwierdzono jednak występowania pęknięć. Nie zaobserwowano także innych wad, w postaci: obcych wtrąceń, rzadzizn itp.

Reasumując można stwierdzić, że odkuwka walcowana charakteryzuje się dość jednorodną makrostrukturą z układem włókien w kierunku wzdłużnym. Jedyne w osi występuje pewna niejednorodność (ciemniejsza linia), która jednak nie powstała podczas walcowania poprzecznego uzwojeń ślimaka.



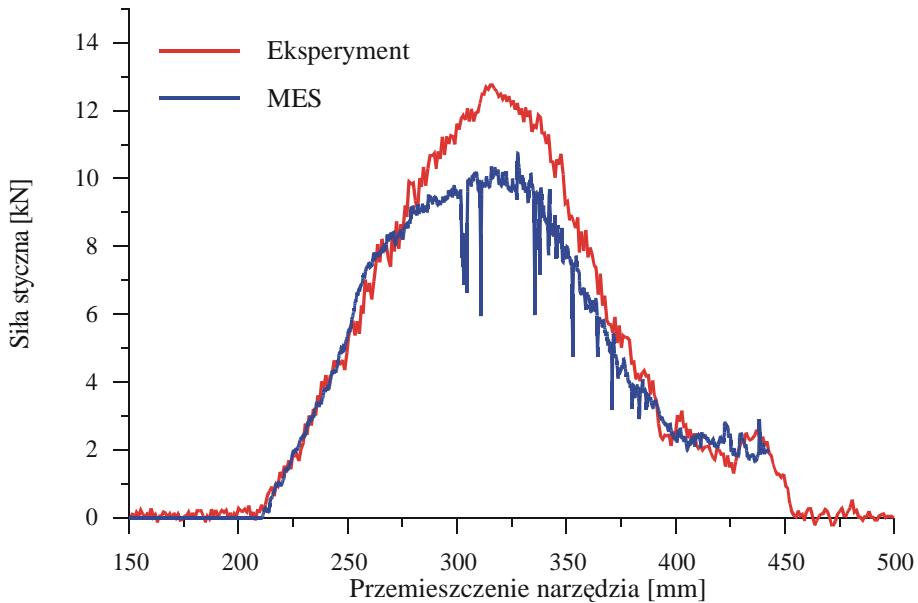
**Rys. 7.30.** Układ włókien w przekroju wzdłużnym odkuwek walcowanych



**Rys. 7.31.** Układ włókien w zwojach ślimaka, w przekroju wzdłużnym jednej z odkuwek

W trakcie kształtowania ślimaka mierzono również składową styczną siłę walcowania (siła wciskania szczęki). Obserwacja rozkładu tej siły (rys. 7.32) wykazuje, że zwiększa się ona stopniowo, aż do końca strefy kształtowania narzędzia. Następnie siła stopniowo maleje w strefie kalibrowania.

Na rys. 7.32 zamieszczono dodatkowo rozkład siły stycznej wyznaczony w symulacji numerycznej wykonanej metodą elementów skończonych. Porównanie rozkładów sił (zmierzonego i obliczonego) wykazuje bardzo dobrą zgodność jakościową. Natomiast dość znaczne różnice ilościowe mogą wynikać np. z ochłodzenia wsadu w trakcie przenoszenia z pieca i umieszczenia w podajniku walcarki, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia naprężenia uplastyczniającego i siły kształtowania.



**Rys. 7.32.** Porównanie składowej stycznej (siły wciskającej narzędzie) w procesie walcowania uzwojenia ślimaka jednokrotnego o wysokości  $h=3,0$  mm, narzędziem o długości 300 mm

Wykonano również dodatkowe próby kształtowania, w których wsady do walcowania nagrzewano w nagrzewnicy indukcyjnej NG-430. Odkuwki uzyskiwane w tym procesie (rys. 7.33) charakteryzowała dobra dokładność powierzchni, będąca następstwem zmniejszenia ilości zgorzeliiny powstającej podczas nagrzewania.



**Rys. 7.33.** Widok odkuwek ze ślimakami otrzymanych w procesie walcowania z wsadów nagrzewanych w nagrzewnicy indukcyjnej NG-430





## 8. Zakończenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki prac badawczych dotyczących nowatorskiej metody kształtowania stopni odkuwek (wałków) o przekrojach poprzecznych różnych od kołowego, bazującej na technologii walcowania poprzeczno-klinowego (WPK). Omówiono obszar zastosowań tego typu wyrobów oraz przedstawiono pokrótce sposoby dotychczasowego ich wytwarzania. Dotychczas wałki kształtowe wytwarzano w procesie WPK lub kucia (produkcja półfabrykatów), przy czym uzyskiwano stopnie walcowe, którym następnie w operacjach obróbki ubytkowej nadawano ostateczny kształt (przekroje różne od kołowego, uzębienia itp.). Uzyskanie elementów o przekrojach kształtowych ma również duże znaczenie w procesie wytwarzania przedkuwek. Można bowiem w jednym przejściu uzyskać taki kształt przedkuwki, który będzie gwarantował dobre wypełnienie wykroju (bez konieczności stosowania dodatkowych wykroi pomocniczych) podczas kucia matrycowego. Innymi ważnymi elementami, które można wytwarzać stosując proces WPK są odkuwki ze stopniami mimośrodowymi, ślimakami lub wieńcami zębatymi.

W analizie teoretycznej procesu WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Zastosowanie oprogramowania MES (MSC.SuperForm 2005 oraz DEFORM-3D) w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia pozwoliło na wyznaczenie rozkładów naprężeń, odkształceń, prędkości odkształcenia, temperatury, kryterium zniszczenia (liczonego wg hipotezy Cockrofta-Lathama) oraz przede wszystkim na określenie możliwości wytwarzania danego elementu w oparciu o metodę WPK.

Weryfikację doświadczalną opracowanych metod walcowania wykonano w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, wykorzystując walcarkę płaskoklinową LUW-2. Wsady przed kształtowaniem nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym lub w nagrzewnicy indukcyjnej. Do badań użyto kilku zestawów narzędzi klinowych, umożliwiających realizację procesu WPK odkuwek ze stopniami: o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu lub owalu, mimośrodowymi, uzębionymi (o zębach normalnych i skośnych)

i ślimakowymi (uzwojenia miały kształt śruby trapezowej). Przeprowadzono również próby kształtowania odkuwek z wsadów kształtowych (o przekroju poprzecznym kwadratowym i sześciokątnym).

W rezultacie obliczeń numerycznych, zweryfikowanych wynikami badań doświadczalnych, potwierdzono zasadność stosowania metody WPK w wytwarzaniu wyrobów ze stopniami o przekrojach kształtowych. W efekcie badań określono również przyczyny zakłócające stabilność przebiegu procesu WPK. Należą do nich niekontrolowany poślizg, który może doprowadzić do zgniecenia i wygięcia odkuwki oraz przewężenie (zerwanie) kształtowanego stopnia odkuwki. Ponadto zauważono, że w procesach przebiegających przy dużych redukcjach przekroju poprzecznego ( $R_p > 60\%$ ) występują niepożądane deformacje stopnia kształtowanego, związane z dużymi różnicami wartości promienia tocznego. Należy wówczas stosować walcowanie dwuetapowe, gdzie w pierwszym etapie walcowany jest stopień odkuwki o przekroju walcowym, a następnie w drugim etapie kształtowany jest żądany zarys przekroju poprzecznego stopnia odkuwki.

Przeprowadzona analiza rozkładów sił zmierzonych i obliczanych, występujących w procesach WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi wykazała występowanie znacznych wahań ich wartości podczas przemieszczania klina, wynikających z ciągłych zmian stopnia gniotu – w efekcie obrotu odkuwki. Ponadto zauważono, że wzrost redukcji przekroju poprzecznego powoduje zwiększenie wartości ekstremalnych sił oraz amplitudy ich wahań.

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

- Metodą walcowania poprzeczno-klinowego można kształtować z wsadów walcowych odkuwki wydłużone ze stopniami kształtowymi (o przekroju poprzecznym różnym od kołowego, mimośrodowymi i uzębionymi), z dokładnością porównywalną do uzyskiwanej w procesach WPK odkuwek osiowo - symetrycznych.
- Metodą walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) można kształtować odkuwki z wsadów kształtowych, których przekrój poprzeczny jest różny od kołowego.
- Stabilność procesu WPK wałków ze stopniami kształtowymi może być zakłócona przez niekontrolowany poślizg (zgniecenie, wygięcie), przewężenie (zerwanie) walcowanego stopnia oraz zniekształcenie przekroju poprzecznego walcowanego stopnia odkuwki.

- ❑ Zastosowanie walcowania wieloetapowego przy wytwarzaniu wałków ze stopniami kształtowymi umożliwia prowadzenie procesu przy dużych rozpiętościach wartości redukcji przekroju poprzecznego.
- ❑ Przy projektowaniu narzędzi do WPK wyrobów ze stopniami kształtowymi zaleca się stosować metodykę doboru podstawowych parametrów procesu opracowaną dla walcowania odkuwek ze stopniami walcowymi.
- ❑ Powierzchnie robocze narzędzi należy profilować stosując metodykę postępowania opisaną w poszczególnych rozdziałach niniejszego opracowania.
- ❑ Podczas walcowania poprzeczno – klinowego stopnia odkuwki o przekroju poprzecznym kształtowym występują charakterystyczne wahania siły kształtowania, będące następstwem zmieniającego się w sposób ciągły stopnia gniotu.
- ❑ W trakcie kształtowania wieńców zębatach i ślimaków metal płynie powierzchniowo, w efekcie czego największe odkształcenia występują w warstwach zewnętrznych a najmniejsze w strefie centralnej (osiowej) wałka.
- ❑ Podczas walcowania ślimaka lub uzwojenia skośnego występuje dodatkowa (w porównaniu do typowych procesów WPK) skierowana osiowo siła, która może spowodować zmianę położenia odkuwki w trakcie jej kształtowania.
- ❑ Modelowanie procesu WPK, oparte o MES w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia, przy pełnym uwzględnieniu zjawisk termicznych, umożliwia weryfikację parametrów technologicznych i konstrukcyjnych przyjmowanych wariantów walcowania.



## Literatura

- [1] Andreev G. V., Klušín V. A., Makušok E. M., Segal V. M., Ščukin V. Ja. *Poperečno – klinovaja prokatka*. Minsk: Nauka i Technika 1974
- [2] Astrop A. W. High – volume production of stub shafts by transverse roll forging. *Machinery and Production Engineering* 14 July 1971 s. 46-47
- [3] Bachman K., Brenn P. Fertigungsleine für die herstellung von schakelbugeln. *Umformtechnik* 1981 nr 6 s. 30-33
- [4] Balin A. F. Prokatka klin'jami. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1962 nr 6 s. 12-16
- [5] Bartnicki J., Pater Z. The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts. *Journal of Materials Processing Technology* 2004 vol. 155-156 s. 1867-1873
- [6] 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
- [7] Borislavskij L. B., Romanenko P. V., Bol'šak N. I., Kotrečko A. A. Novaja tehnologija izgotovljenija coeditel'nych osey tjagovoj cepi skrebkogo transportera. *Technologija i organizacija proizvodstva* 1976 nr 9 s. 34-35
- [8] Brezler Jr R. A. Making sense of worm rolling. *American Machinist*, December 1980, s. 129-140
- [9] Celikov A. I. Elementy teorii poperečnoj prokatki i choldnaja prokatka na trechvalkovykh stanach. *Vestnik Mašinstroenija* 1961 nr 7 s. 49-54
- [10] Chao-Fu Z. Method of determining the rolling radius of workpiece for cross wedge rolling process. 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. 27-32
- [11] Developments in rotary metalworking. *Machinery and Production Engineering* 2 February 1983 s. 34-35
- [12] 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
- [13] Dorožej V. I., Margolin B. M., Seljukov V. N. Izgotovlenije zagotovok šarovykh pal'cev rulevykh tjag metodom poperečno – klinovoj prokatki. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1975 nr 1 s. 36-38

- [14] 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
- [15] 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
- [16] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W. S.: *Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów kolejowych*, Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2003
- [17] Gontarz A. *Efektywne metody kształtowania w trójsuwakowej praisie kuźniczej*, Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2005
- [18] Guangsheng R. i in. The fortification of eccentric stepped-shaft forgings using the process of cross wedge rolling. *Journal of Materials Processing Technology* 1992 vol. 35 s. 227-236
- [19] Hencel U. Zarizeni pro pricne valcovani. *Poris vynalezu k avtorskemu osvedcevi* N 154895. - Zverejneno 17.09.1973
- [20] Holub J. *Pricne klinove valcovani*. Praha: SNTL 1972
- [21] Klušín V. A., Makušok E. M., Ščukin V. Ja. *Soveršenstvovanie poperečno – klinovoj prokatki*. Minsk: Nauka i Technika 1980
- [22] Koizumi M., Kobayashi Y. i in. Cross rolling method. *Science of Machine* 1976 nr 8 s. 50-52
- [23] Lisowski J. *Walcowanie kuźnicze*. Warszawa: WNT 1979
- [24] Magda J. Poprzeczne walcowanie klinowe. *Obróbka Plastyczna* 1981 z. 4 s. 179-189
- [25] Masami I. i in. The development of high – precision cross – rolling method. W: *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Rotary Metalworking Processes* 8 -10 September 1984, Kyoto Japan 1984 s. 345-352
- [26] Mechan V. K. Transverse hot rolling of forging preforms for bicycle cranks. 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. 399-408
- [27] Pater Z. *Podstawy teoretyczne i badania eksperymentalne procesu walcowania klinowo – rolkowego*. Poznań: Wyd. Instytutu Obróbki Plastycznej 2007
- [28] Pater Z. Strategia doboru parametrów narzędzi do walcowania poprzeczno – klinowego. W: *Mat. Konferencji Metal Forging'99* 20-22 wrzesień 1999, Częstochowa - Kokotek s. 135-145
- [29] Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2001
- [30] Pater Z., Gontarz A. Weroński W. Analiza możliwości zastosowania walcowania poprzeczno-klinowego do wytwarzania korpusów noży ob-

- rotowych. W: *Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali*. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2004 s. 13-41
- [31] Pater Z., Gontarz A., Łukasik K., Weroński W. *Modelirovanie processov poperečno-klinovoj prokatki*. Kiev: NUPT 2003
- [32] Pater Z., Gontarz A., Weroński W. Sposób walcowania poprzecznego. *Zgłoszenie patentowe P366499 z dnia 2004.03.22*
- [33] Pater Z., Gontarz A., Weroński W. *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno-klinowego*. Lublin: LTN 2001
- [34] Pater Z., Tomczak J. Cross – wedge rolling of parts with non – circular cross section. *Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Manufacturing Conference, IMC 24*, Waterford Institute of Technology, Ireland, 2007, s. 1079-1086
- [35] Pater Z., Tomczak J. Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. *Obróbka Plastyczna Metali* 2005 nr 2 s. 31-41
- [36] Pater Z., Weroński W. Kinematyka płynięcia materiału oraz promień toczy w procesach walcowania poprzeczno – klinowego. *Obróbka Plastyczna Metali* 1995 nr 4 s. 17-26
- [37] Pater Z., Weroński W. *Podstawy procesu walcowania poprzeczno – klinowego*. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 1996
- [38] Pater Z., Weroński W., Kazanecki J. Badania doświadczalne procesu walcowania poprzeczno – klinowego. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 1999 nr 2 s. 62-68
- [39] Pater Z.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*, Politechnika Lubelska, Lublin 2001.
- [40] Sadko V. I., Pater Z. Nowa technologia produkcji noży kombajnów górniczych. *Maszyny Górnicze* 2003 nr 2 s. 52-54
- [41] Saprykin I. A. Proizvodstvo stupenčatych zagotovok valov metodami ob’emnogo plastičeskogo formoobrazovanija. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1983 nr 9 s. 11-12
- [42] Ščukin V. Ja. *Osnovy poperečno – klinovoj prokatki*. Minsk: Nauka i Technika 1986
- [43] Šibakov V. G., Semendij V. I. Poperečno – klinovaja prokatka avtomobil’nych detalej. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1986 nr 11 s. 11-13
- [44] Sinczak J. *Kucie dokładne*. Kraków: Wyd. AGH 2007
- [45] Świadectwo autorskie nr 479551, ZSRR
- [46] Świadectwo autorskie nr 584948, ZSRR
- [47] Thomas A. Transverse rolling of preforms for drop forging. W: *Proc. of 1<sup>st</sup> Int. Conf. Rotary Metalworking Processes*. 20-22 XI 1979 London UK s. 147-156

- [48] Tomczak J. *Badania teoretyczno – doświadczalne procesu walcowania poprzeczno – klinowego wałków ze stopniami kształtowymi*. Praca doktorska. Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny 2007
- [49] Tomczak J., Pater Z. Kształtowanie metodą walcowania poprzeczno – klinowego odkuwek o przekroju kwadratowym. W: *Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali. Monografia 2004*. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej s. 87-108
- [50] Transverse rolling proves its uses in components field. *The Engineer* 5 November 1970 s. 55-58
- [51] Tsukamoto H. i in. Cross roll method for the production of axi-symmetrical stepped shaft. 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. 936-941
- [52] Turno A., Romanowski M., Olszewski M. *Obróbka plastyczna kół zębatych*. Warszawa: WNT 1973
- [53] Vaughan C. Transverse rolling for the production of finished and semi – finished components. *Iron and Steel* June 1969 s. 16
- [54] Veremevič Ju. N., Gorovoj R. S., Šmelev Ju. E. Poperečno – klinovaja prokatka v proizvodstve ploskich gaečnych ključej. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1972 nr 9 s. 37-39
- [55] Veremevič Ju. N., Gorovoj R.S., Bondarev I. A., Šmelev Ju. E. Primenenie poperečno – klinovoj prokatki dlja profilirovanija zagotovok pered gorjačeje štampovkoj. *Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo* 1983 nr 10 s. 23-25
- [56] Wang M. T., Li X. T., Du F. S. Current trends in cross wedge rolling for part forming. *ISIJ International* 2005 vol. 45 s. 1521-1525
- [57] Weroński W., Gontarz A., Pater Z. *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii kucia w prasie trójsuwakowej*. Lublin: Wyd. LTN 2007
- [58] Weroński W., Pater Z., Gontarz A. Research on 19MnCr5G steel under hot metal forming conditions. *Key Engineering Materials* 2003 vols. 233-236 s. 401-406
- [59] Weroński W., Pater Z. Walcowanie poprzeczno – klinowe. *Przegląd Mechaniczny* 1993 z. 2 s. 9-10, 19-21
- [60] Weroński W., Schabowska K. *Przeróbka plastyczna metali. cz. 2*. Warszawa: WSP 1989



# Wykaz ważniejszych oznaczeń

$F$	- siła walcowania
$C_o, C_l$	- stałe materiałowe
$M$	- stała materiałowa
$N$	- moc silnika elektrycznego
$R_p$	- redukcja względna przekroju
$S$	- pole przekroju poprzecznego walcowanego stopnia
$S_o$	- pole przekroju poprzecznego wsadu
$T$	- temperatura
$a_p$	- współczynnik korekcyjny
$d$	- średnica walcowanego stopnia odkuwki osiowosymetrycznej
$d_o$	- średnica wsadu
$e$	- przesunięcie mimośrodowe
$h$	- wysokość zęba koła zębatego, wysokość zwoju ślimaka
$h_i$	- wysokość występu narzędzia
$k$	- granica plastyczności przy czystym ścinaniu
$l$	- długość odcinka walcowanego
$m$	- czynnik tarcia
$m$	- moduł koła zębatego
$p_z$	- skok zwoju ślimaka
$r$	- gniot bezwzględny
$r_o$	- promień wsadu
$r_t$	- promień toczny odkuwki
$s$	- przemieszczenie liniowe klina
$t$	- czas
$v$	- prędkość narzędzi
$v_p$	- prędkość poślizgu
$z$	- liczba zębów koła zębatego

- $\Delta$  - operator przyrostu
- $\alpha$  - kąt kształtujący narzędzia do walcowania poprzeczno-klinowego
- $\beta$  - kąt rozwarcia klina
- $\delta$  - stopień gniotu
- $\delta_{sr}$  - średni stopień gniotu
- $\varepsilon$  - odkształcenie
- $\gamma$  - kąt wzniosu klina
- $\varphi$  - kąt obrotu odkuwki
- $\lambda$  - współczynnik toczny
- $\mu$  - współczynnik tarcia
- $\rho$  - gęstość
- $\psi$  - kąt ukosowania
- $\sigma$  - naprężenia
- $\sigma_n$  - naprężenia normalne
- $\sigma_p$  - naprężenia uplastyczniające
- $\tau$  - naprężenia styczne

## Streszczenie

W książce przedstawiono wyniki prac badawczych dotyczących nowatorskiej metody kształtowania stopni odkuwek wydłużonych o przekrojach poprzecznych różnych od kołowego, bazującej na technologii walcowania poprzeczno-klinowego (WPK). Analiza teoretyczna procesu WPK odkuwek ze stopniami kształtowymi została przeprowadzona w oparciu o metodę elementów skończonych (MES). Wykorzystując komercyjne pakiety oprogramowania MES (MSC.SuperForm 2005 oraz DEFORM-3D) w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia wyznaczono podstawowe parametry siłowe, energetyczne i kinematyczne procesu oraz określono możliwości wytwarzania takich elementów technikami WPK. Weryfikację doświadczalną opracowanych sposobów kształtowania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, wykorzystując płasko-klinową walcarkę LUW-2.

Po krótkim wprowadzeniu w rozdziale pierwszym omówiono obszary zastosowań wyrobów (wałków) ze stopniami o przekrojach kształtowych oraz przedstawiono sposoby ich wytwarzania w przemyśle. Przybliżono również podstawowe wiadomości z zakresu WPK wyrobów osiowo-symetrycznych oraz dokonano klasyfikacji procesów ze względu na kształt narzędzi, ich napęd i zastosowanie. W rozdziale drugim przedstawiono wyniki badań numerycznych, przeprowadzonych przy wykorzystaniu MES, procesu WPK odkuwek ze stopniami o przekrojach poprzecznych różnych od kołowego, które następnie zweryfikowano w badaniach doświadczalnych. Omówiono także szczegółowo sposób kalibrowania narzędzi płasko-klinowych stosowanych w badaniach. W kolejnym rozdziale opisano procesy WPK wyrobów ze stopniami kształtowymi, w których redukcja przekroju poprzecznego nie ulega zmianie. Porównano wyniki uzyskane w analizie numerycznej oraz podczas badań doświadczalnych. Rozdział czwarty poświęcono procesom WPK odkuwek walcowanych z wsadu kształtowego. Omówiono sposób kalibrowania narzędzi i podano zakresy parametrów geometrycznych, gwarantujących stabilny przebieg procesu walcowania. Przedstawiono również wyniki badań

numerycznych i doświadczalnych procesów WPK prowadzonych na wsadach o przekrojach kwadratowych i sześciokątnych. Kształtowanie wałków ze stopniami mimośrodowymi opisano w rozdziale piątym. Omówiono w nim dotychczas stosowane metody wytwarzania wałów mimośrodowych, a następnie przedstawiono koncepcję kształtowania tego typu wyrobów w procesach WPK. Następnie opisano wyniki analizy numerycznej i badań doświadczalnych procesu walcowania poprzeczno-klinowego wałków mimośrodowych. W rozdziale szóstym omówiono procesy wytwarzania wałków z wieńcami zębatymi, a następnie zaproponowano zastosowanie technologii WPK do kształtowania tych elementów. Przedstawiono również wyniki analizy numerycznej, przeprowadzonej w oparciu o MES oraz badań doświadczalnych w zakresie walcowania na gorąco wałków z wieńcami zębatymi o uzębieniach prostych, śrubowych, łukowych i daszkowych wykorzystując płaskie narzędzia klinowe. Rozdział siódmy opisuje procesy WPK uzwojeń ślimaka. Omówiono w nim sposób kalibrowania płaskich narzędzi klinowych oraz podano kształty wsadu gwarantującego uzyskanie prawidłowych wyrobów. Przedstawiono również wyniki analizy numerycznej oraz badań doświadczalnych procesu WPK wałków z uzwojeniami ślimaków. W rozdziale ósmym przedstawiono końcowe wnioski z przeprowadzonych obliczeń numerycznych oraz badań doświadczalnych nowatorskich procesów WPK wyrobów mających stopnie o przekrojach poprzecznych różnych od kołowego. Podano również korzyści płynące ze stosowania opisanych procesów w przemyśle.

## Summary

This book presents results of research works concerning a modern forming method of elongated billets steps with cross sections different from circular, which is based on cross-wedge rolling (CWR). Theoretical analysis of CWR process of billets with steps different from circular was made on the basis of finite element method (FEM). Applying commercial software FEM (MSC SuperForm 2005 and DEFORM 3D) in conditions of 3D state of strain, basic force parameters, kinematics and energy parameters of the process were determined and manufacturing possibilities of such elements by means of CWR techniques were given. Experimental verification of worked out forming methods was made in laboratory conditions at the Department of Computer Modelling and Metal Forming at Lublin University of Technology, using a flat wedge rolling mill LUW-2.

After a short introduction, in the first chapter are presented areas of application of products (shafts) with steps with sections different from circular and their manufacturing in industry. Basic information within the scope of CWR of axi-symmetrical products are given and processes are classified depending on tools shape, their drive and application. The second chapter deals with results of numerical research conducted with the application of FEM, CWR process of forgings with cross sections different from circular, which were later verified in experiments. Flat –wedge sizing is discussed in details. The third chapter describes CWR processes of products with steps different from circular, in which reduction of cross sections does not change. Results obtained in numerical analysis and during experimental research are compared. The fourth chapter deals with CWR processes of forgings rolled from non-circular billet Tools sizing is discussed and scope of geometrical parameters guaranteeing stability of rolling process is given. Results of numerical research and experimental CWR processes on billets with square and hexagonal sections are also presented in this chapter. Forming of shafts with eccentric steps is described in the fifth chapter. This chapter also deals with used so far methods of manufacturing of eccentric shafts and presents conception of forming of this type of products in CWR

processes. Next, numerical analysis and experimental research results of cross-wedge rolling process of eccentric shafts are given. The sixth chapter concerns processes of manufacturing of shafts with toothed wheel rims and next CWR technology is proposed for their forging. Results of numerical analysis, conducted basing on FEM, and experimental research within the scope of rolling in hot conditions of shafts with toothed wheel rims with teeth-simple, screwed, curved, herringbone- with application of flat wedge tools are also discussed. The seventh chapter deals with CWR processes of worm winding. The way of sizing of flat wedge tools is analyzed and billet shapes guaranteeing obtaining proper products are provided. Results of numerical analysis and experimental research of CWR process of shafts with worm winding are discussed here as well. The last, eighth chapter, presents final conclusions resulting from conducted numerical calculation and experimental research of modern CWR process of products with steps with cross section different from circular. Advantages of application of the described processes in industry are also given.