

Walcowanie śrubowe kul
do młynów kulowych

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Zbigniew Pater
Janusz Tomczak

Walcowanie śrubowe kul do młynów kulowych



Politechnika Lubelska
Lublin 2012

Opiniodawca:

dr hab. inż. Anna Kawałek, prof. Politechniki Częstochowskiej

Redakcja i skład: Janusz Tomczak

Monografia finansowana z projektu badawczego rozwojowego
nr 0457/R/T02/2009/06, pt. *„Opracowanie nowej technologii
walcowania kul stalowych ze złomowanych szyn kolejowych”*

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2012

ISBN: 978-83-62596-97-3

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

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

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

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

Nakład: 100 egz.

Spis treści

1. Wprowadzenie	7
2. Analiza stanu zagadnienia	13
2.1. Charakterystyka walcowania śrubowego kul	14
2.1.1. Przebieg procesu	14
2.1.2. Poślizg metalu w wykroju	15
2.1.3. Struktura i właściwości mechaniczne kul po walcowaniu	17
2.2. Kalibrowanie walców z wykrojem śrubowym	17
2.2.1. Konstrukcja wykroju śrubowego	17
2.2.2. Obliczenia wykroju śrubowego do walcowania kul	19
2.2.3. Dobór średnicy walca	24
2.3. Konstrukcja prowadnic	25
2.4. Walcarki do kształtowania kul	26
2.5. Przykład walcowania śrubowego kul $S\varnothing 33$ mm	29
2.5.1. Analiza numeryczna MES	29
2.5.2. Próby laboratoryjne walcowania	34
3. Walcowanie śrubowo-klinowe	41
3.1. Projektowanie walców	42
3.2. Analiza numeryczna	47
3.2.1. Wpływ kątów kształtującego α i rozwarcia klina β na przebieg WŚK kul	50
3.2.2. Wpływ redukcji przekroju poprzecznego R_p na przebieg WŚK kul	54
3.3. Próby walcowania	60
3.4. Uzyskane wyniki	68
4. Walcowanie śrubowo-klinowe w wykrojach wielozwojnych	67
4.1. Konstrukcje walców	68
4.2. Analiza numeryczna	73
4.2.1. Symulacje numeryczne walcowania kul w trójzwojnym wykroju śrubowym	73
4.2.2. Wpływ liczby zwojów narzędzi śrubowych na przebieg procesu walcowania	82
4.3. Próby walcowania	87
5. Nowe innowacyjne procesy walcowania śrubowego kul	97
5.1. Walcowanie kul w wykrojach śrubowo-spiralnych	97
5.1.1. Analiza numeryczna procesu walcowania kul w wykrojach śrubowo-spiralnych	99

5.2. Walcowanie kul dwoma tarczami płaskimi w wykrojach spiralnych	105
5.2.1. Analiza numeryczna procesu walcowania kul w wykrojach spiralnych	107
5.3. Walcowanie kul dwoma tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych	113
5.3.1. Analiza numeryczna procesu walcowania kul tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych	118
5.3.2. Symulacje numeryczne procesu walcowania kul w mimośrodowych wykrojach spiralnych	120
5.4. Walcowanie kul w śrubowym wykroju wewnętrznym	122
5.5. Walcowanie skośne kul trzema wałcami śrubowymi	125
6. Problematyka kształtowania kul ze złomowanych szyn kolejowych	129
6.1. Kształtowanie pręta okrągłego z główki szyny	130
6.1.1. Prasowanie	130
6.1.2. Walcowanie wzdłużne	136
6.1.3. Walcowanie skośne	147
6.2. Walcowanie śrubowe kul SØ40 mm i SØ50 mm	151
6.3. Kucie kul SØ60 mm, SØ70 mm i SØ80 mm	157
7. Podsumowanie	167
8. Summary	169
Literatura	171

1. Wprowadzenie

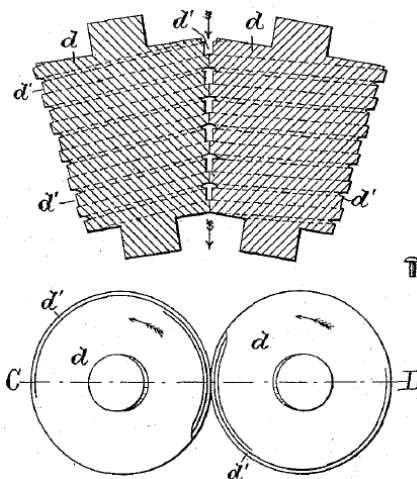
Kule stalowe są powszechnie wykorzystywane w przemyśle maszynowym (np. w produkcji łożysk tocznych) i przetwórczym, gdzie stosowane są jako mielniki do młynów kulowych służących do mielenia: rud metali, węgla, cementu, zużytych mas formierskich i innych materiałów.

Zapotrzebowanie na półwyroby kul wzrosło w sposób lawinowy pod koniec XIX wieku, gdy opatentowano pierwsze młyny kulowe - np. [9, 17]. Zaczęto wówczas poszukiwać wydajnych i opłacalnych metod wytwarzania kul, bazujących na obróbce plastycznej metali. Szczególną uwagę zwrócono na procesy walcowania, w tym śrubowego - będącego przedmiotem niniejszego opracowania.

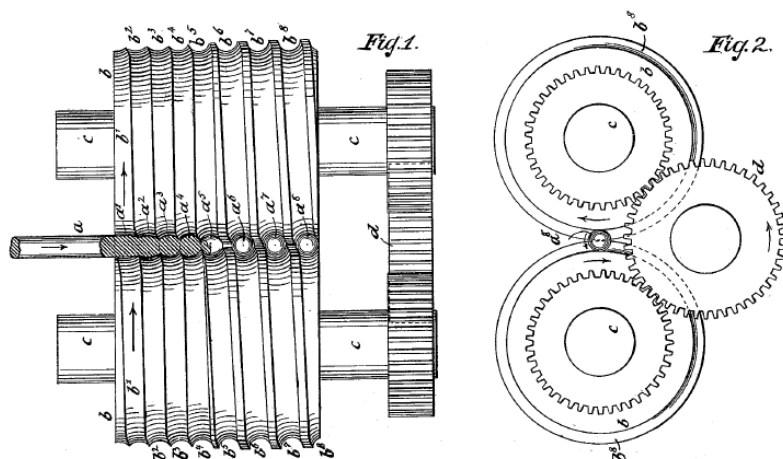
Pierwszą wzmiankę na temat walcowania śrubowego znaleźć można w patencie Kempstera z 1888 r. [16]. Wynalazca ten zaproponował stosowanie dwóch stożkowych walców (rys. 1.1), ustawionych w jednej płaszczyźnie i obracających się w tym samym kierunku, które na powierzchni roboczej mają wykonane śrubowe bruzdy, tworzące po złożeniu narzędzi wykrój. Kempster przewidywał, że nowa metoda walcowania może być przydatna w produkcji masowej nitów, szeroko stosowanych w XIX wieku w budowie maszyn.

Pomysłodawcą zastosowania walcowania śrubowego do kształtowania kul był Bornemann [3]. Zaproponował on w 1901 r. użycie dwóch cylindrycznych walców o osiach równoległych (rys. 1.2), mających wykonane na obwodzie śrubowe bruzdy o zmiennym kształcie, których zadaniem jest rozdzielenie materiału wsadowego (pręta) na poszczególne kule. Bruzdy mają stopniowo zwiększającą się krzywiznę oraz stały skok (na długości czterech pierwszych zwojów), który następnie zwiększa się przy zachowaniu krzywizny odpowiadającej kształtowanym kulom. Nie przewidziano zastosowania listew prowadzących utrzymujących półwyrobów w przestrzeni międzywalcowej.

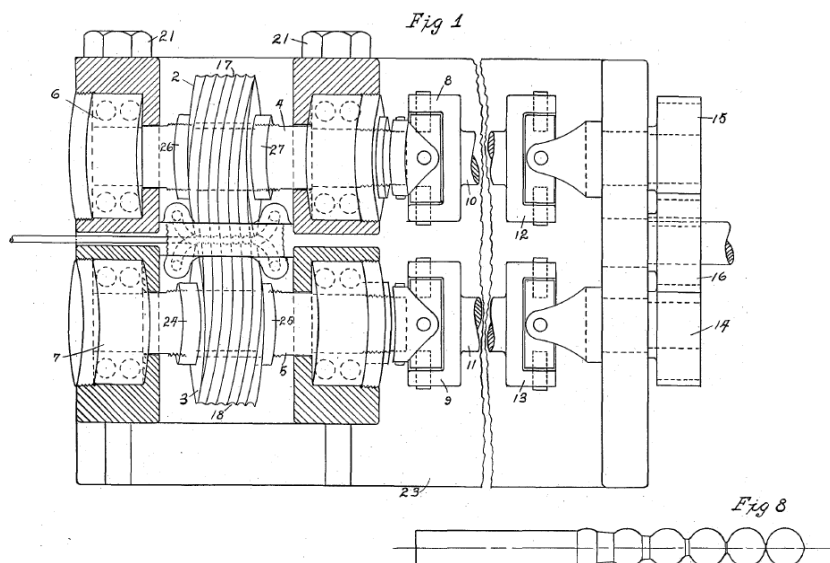
Kolejne modyfikacje procesu walcowania śrubowego zostały wprowadzone w 1928 r. przez Hodge'a [10], który jako pierwszy zaproponował skośne ustawienie walców oraz użycie listew prowadzących - rys. 1.3. W agregacie tego wynalazcy kule kształtowane w sposób ciągły z pręta (o średnicy mniejszej od średnicy kuli) odprowadzane były do specjalnej rury, w której podlegały hartowaniu.



Rys. 1.1. Koncepcja walcowania śrubowego nitów, wg Kempstera [16]

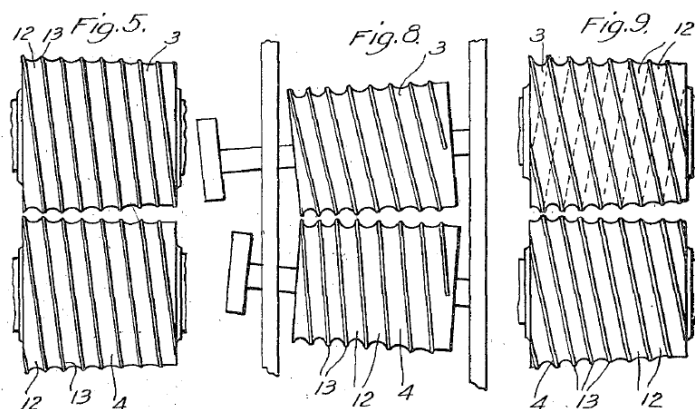


Rys. 1.2. Sposób kształtowania kul walcami śrubowymi opracowany przez Bornemann'a [3]



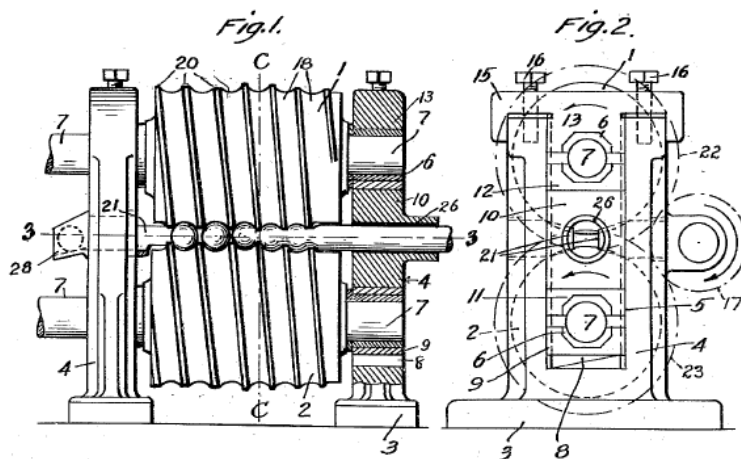
Rys. 1.3. Walcarka skośna do walcowania kul (Fig. 1) oraz progresja kształtu półwyrobu w procesie walcowania (Fig. 8), wg Hodge'a [10]

W tym samym okresie Kanadyjczyk Munro zaproponował użycie śrubowych walców stożkowych, celem zintensyfikowania zginięcia materiału w strefie kształtowania [20]. Podobny efekt można było uzyskać stosując walce cylindryczne ustawione skośnie, o osiach znajdujących się w jednej płaszczyźnie. Dla zwiększenia wydajności procesu oraz lepszego kształtowania (przez zwiększenie zbieżności wykroju) wynalazca ten, jako pierwszy zaproponował stosowanie walców mających bruzdy wykonane w sposób wielozwojny. Wymienione koncepcje walcowania, opracowane przez Munro, pokazano na rys. 1.4.



Rys. 1.4. Sposoby walcowania śrubowego kul zaproponowane przez Munro [20]: walcami stożkowymi (Fig. 5), walcami cylindrycznymi ustawionymi zbieżnie (Fig. 8), walcami stożkowymi trójszwojnymi (Fig. 9)

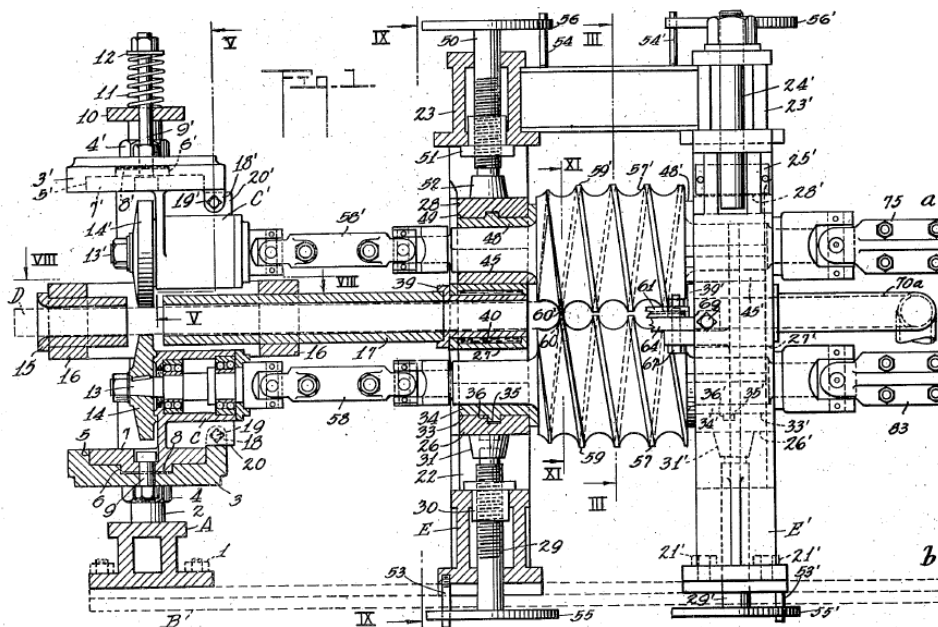
W 1930 r. Munro uzyskuje kolejny patent [21] na walcarkę, o równolegle ustawionych walcach, mających bruzdy o zmiennym skoku linii śrubowej (rys. 1.5). Obrzeża (burty) rozdzielające kolejne bruzdy mają zmienną wysokość, która wzrasta do momentu rozzerwania ukształtowanych kul, a następnie maleje. Nowością zaproponowaną w tym patencie była propozycja zastosowania, jako wsadów do walcowania zużytych szyn kolejowych, które przed kształtowaniem powinny być poddane prasowaniu celem uzyskania kształtu zbliżonego do walcowego.



Rys. 1.5. Walcarka śrubowa z walcami o osiach równoległych, wg Munro [21]

Wychodząc ze słusznego założenia, że przebieg walcowania śrubowego jest uzależniony od wahań średnicy materiału wsadowego Wells zaproponował (1946 r.) użycie w walcarce (rys. 1.6) specjalnego podajnika, służącego także do kalibrowania pręta wsadowego [69]. Stanowiły go dwie rolki, ustawione skośnie do osi pręta, które obracając

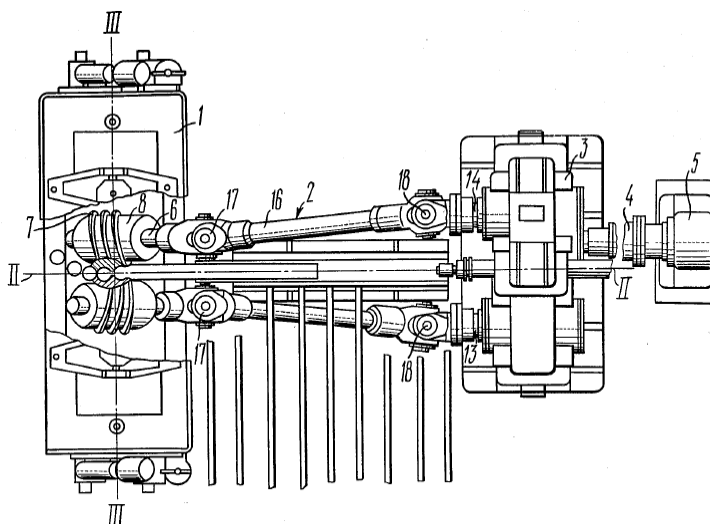
się w tę sama stronę kalibrowały średnicę wsadu, wprawiając go w ruch obrotowy i przemieszczając w stronę ustawionych równolegle walców śrubowych. Prędkość posuwu regulowano zmianą kąta skręcenia rolek. Ponadto, Wells zaproponował wyposażenie walców w spiralne noże rozcinające (praktycznie stykające się ze sobą), które służyły do oddzielania ukształtowanej kuli.



Rys. 1.6. Walcarka śrubowa Wells'a wyposażona w specjalny podajnik rolkowy [69]

Pomimo tego, że podstawy procesu walcowania śrubowego kul były opracowane głównie w Stanach Zjednoczonych, to zastosowanie praktyczne tego procesu na skalę masową miało miejsce w byłym Związku Radzieckim. Tamże około 1950 roku zespół badawczy pod kierunkiem Celikova zbudował pierwszą radziecką skośną walcarkę przemysłową, w oparciu o którą opracowano proces technologiczny walcowania kul o średnicach w zakresie od 25 do 45 mm. Począwszy od 1956 r. w zakładzie OAO "EZTM" w miejscowości Elektrostal (obecnie Rosja) uruchomiono produkcję komercyjnych walcarek do kształtowania kul. Agregaty te były wielokrotnie modernizowane - przykład jednego z nowszych rozwiązań pokazano na rys. 1.7.

W naszym kraju proces walcowania śrubowego kul nie jest w praktyce stosowany. Wynika to przede wszystkim z trudności związanych z zaprojektowaniem (do niedawna również z wykonaniem) narzędzi gwarantujących wytwarzanie kul o odpowiedniej jakości. Jedynym, jak dotychczas polskim akcentem w zakresie walcowania śrubowego kul były prace badawcze wykonane przez Dobruckiego w latach 70-tych XX wieku. Sprowadziły się one do prób walcowania kul z handlowo czystego ołowiu oraz stali w walcarkach laboratoryjnej. Wyniki tych prac zebrane w publikacjach [5, 6] nie były zadowalające. Pozwoliły w zasadzie na zgrubne określenie wpływu podstawowych parametrów technologicznych procesu, zarówno na wady kształtu i powierzchni kul, jak i na ich pękanie.



Rys. 1.7. Schemat nowoczesnej walcarki śrubowej do kształtowania kul, zaprojektowanej w dawnym ZSRR [66]

Obecnie stosowane w Polsce kule są produkowane głównie przez odlewanie i kucie matrycowe. Sporadycznie wykorzystywane są również procesy walcowania poprzecznego [12], korzystnego przy mniejszych seriach wytwarzania. Dokładność wykonania kul do młynów nie musi być wysoka (tab. 1.1), co pozwala na poszukiwanie nowych, innowacyjnych metod ich wytwarzania.

Tab. 1.1. Wymiary i dopuszczalne odchyłki wymiarowe kul, w zależności od technologii wykonania [65]

Średnice kul, mm	Technologia wykonania kul	Dopuszczalna wielkość ¹⁾ , mm		
		odchyłki wymiarów	pozostałość wypłytki	przesadzenia
30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140	kucie matrycowe	+3 -2	2,0	2,0
60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140; 150; 170; 190; 200 i powyżej	kucie swobodne	±3 ±4 ±5 ±6 ±7	—	—
30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100	walcowanie	±3	—	—

¹⁾ Dopuszczalne maksymalne wartości odchyłki wymiaru, pozostałości wypłytki i przesadzenia nie mogą występować jednocześnie

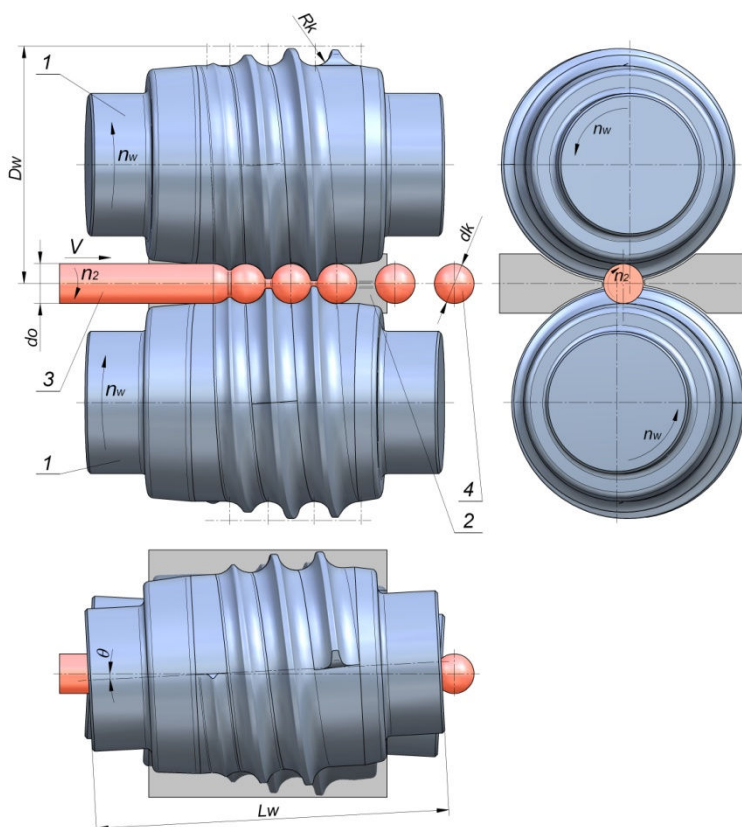
W Politechnice Lubelskiej od ponad 20 lat realizowane są prace badawcze w zakresie walcowania poprzeczno-klinowego, których rezultaty przedstawiono w szeregu monografií naukowych [24, 27, 28, 34]. W ostatnim okresie w jednostce tej korzystając z wiedzy na temat tego procesu realizowano projekt rozwojowy p.t.: "Opracowanie no-

wej technologii walcowania kul stalowych ze złomowanych szyn kolejowych”, w ramach którego wykonano także szereg prac badawczych w zakresie walcowania śrubowego. Ważniejsze wyniki z tych prac zebrano w niniejszym opracowaniu.

Na zakończenie autorzy chcieliby złożyć wyrazy podziękowania szeregowi osób, które przyczyniły się do wykonania prac badawczych w zakresie walcowania śrubowego. W szczególności wdzięczność należy się prof. dr hab. inż. Janowi Kazaneckiemu z AGH w Krakowie, który nie tylko umożliwił przeprowadzenie prób walcowania w walcarce skośnej, ale czynnie w nich uczestniczył wraz z współpracownikami. Podziękowania należą się także pracownikom Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, którzy przygotowywali próbki do badań. Osobne wyrazy wdzięczności kierowane są do recenzentki monografii - dr hab. inż. Anny Kawałek, prof. Politechniki Częstochowskiej, której uwagi i spostrzeżenia wpłynęły na ostateczną postać opracowania.

2. Analiza stanu zagadnienia

Walcowanie śrubowe kul, polega na kształtowaniu pomiędzy dwoma ustawionymi skośnie walcami (wyposażonymi w wykroje śrubowe) odkuwek kul z pręta pełnego z oddzieleniem wyrobu gotowego - rys. 2.1. Przy każdym obrocie walców jest kształtowana tylko jedna kula. Dla uzyskania wyrobu o prawidłowym kształcie, należy spełnić trzy następujące warunki:



Rys. 2.1. Schemat procesu walcowania kul w walcarce skośnej: 1– walce z wykrojami śrubowymi, 2 – prowadnice, 3 – wsad, 4 – ukształtowana kula

- objętość metalu zamkniętego w wykrojach powinna być stała podczas całego procesu kształtowania;
- zmiana zarysu i rozmiarów obrzeży wykroju powinny odpowiadać wydłużeniu zamkniętego półwyrobu;

- zamykanie metalu powinno realizować się na stosunkowo krótkich odcinkach, żeby zapobiec tworzeniu pęknięć w strefie osiowej półwyrobu.

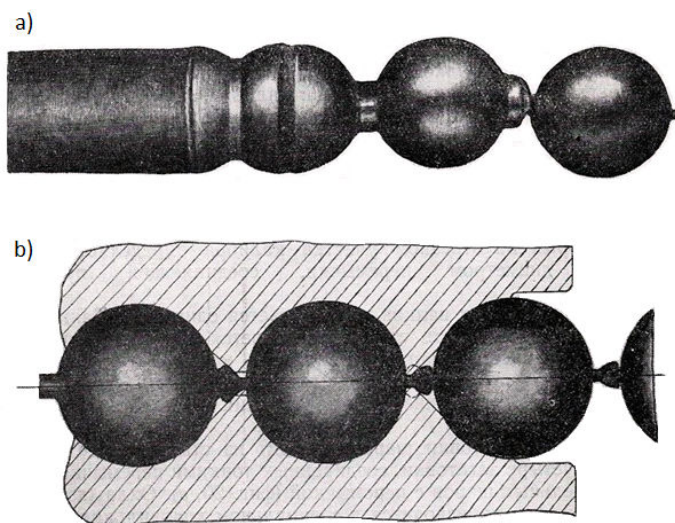
Spełnienie powyższych wymogów zapewnia uzyskanie odkuwek o prawidłowym kształcie przy minimalnej pracy odkształcenia plastycznego. Jednakże w praktyce nie zawsze udaje się uzyskać tak idealne warunki walcowania, a co za tym idzie – taki proces walcowania poprzecznego nie jest optymalny.

2.1. Charakterystyka walcowania śrubowego kul

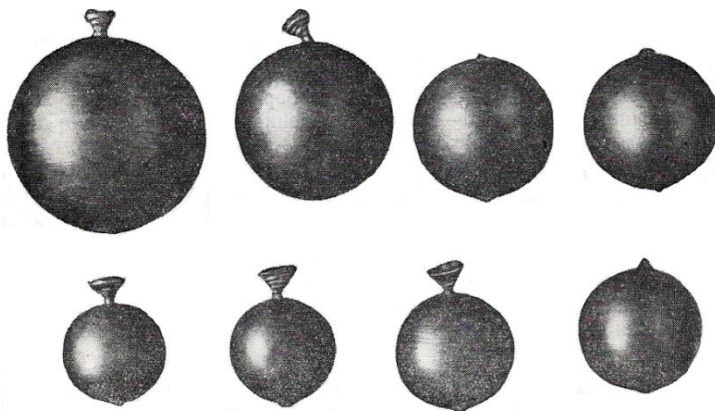
2.1.1. Przebieg procesu

Proces walcowania rozpoczyna się podaniem po prowadnicach nagrzanego półwyrobu między walce robocze, gdy przedni jego koniec zostanie uchwycony kołnierzami walców. Następnie półwyrób zaczyna obracać się wokół swojej osi, jednocześnie rozpoczyna się także jego płynięcie w wykroj śrubowy. Przy tym wskutek ciągłego narastania wysokości kołnierzy wykroju półwyrób poddawany jest gniotowi poprzecznemu i przyjmuje kolejne kształty (rys. 2.2a), aż do uzyskania półwyrobów kul połączonych mostkiem (łącznikiem) (rys. 2.2b).

W trakcie procesu walcowania mostek jest kształtowany (rozwałcowywany) kołnierzami wykroju walca do momentu skalibrowania końcowego kształtu półwyrobu kul. Od strony podania – dla podtrzymania wsadu, stosowane są odpowiednio skalibrowane prowadnice liniowe, o szerokości dostosowanej do uzyskania końcowego wymiaru średnicy walcowanych kul. Przy każdym obrocie walców odwalcowana jest jedna kula, co oznacza, iż przepustowość takiej walcarki określona jest prędkością obrotową walców. Walcowane kule opuszczają walcarkę skośną w postaci mostków (rys. 2.2b), łączących od 3 do 4 kul, lub jako pojedyncze wykalibrowane kule (jedynie z niewielkimi wypływkami) - rys. 2.3.



Rys. 2.2. Przebieg procesu walcowania śrubowego kul: a) półwyrób zahamowany w walcach walcarki skośnej; b) schemat rozdzielania kul podczas walcowania [14]



Rys. 2.3. Odwalcowane w walcach śrubowych półwyroby kul o średnicach w zakresie od 27,0 do 50,8 mm (od 1 1/16" do 2") [64]

Chłodzenie odwalcowanych kul (przeznaczonych na łożyska toczne) zachodzi w ściśle określonych warunkach w specjalnych chłodniach, zabezpieczających proces chłodzenia z temperatury końca walcowania do temperatury otoczenia. Po procesie chłodzenia kule (przeznaczone na elementy łożysk tocznych) poddaje się procesowi odpuszczania, aby wyrównać strukturę metalu i obniżyć twardość przed kolejną operacją ich szlifowania.

Zawyżoną owalność odwalcowanych kul reguluje się kątem nachylenia osi walców roboczych. Zawalcowania i łuski powierzchniowe wywołane są pojawieniem się wad na powierzchni wykroju walców, a także powstają przy nierównomiernym nagrzewie na przekroju walcowanego półwyrobu.

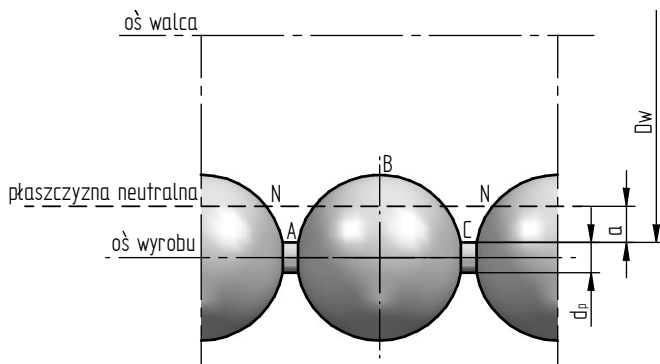
Przy prawidłowym osiowym nastawieniu walców kule wychodzą z walców tak, jak to pokazano na rys. 2.2. W przypadku, gdy osiowe nastawienie walców jest nieprawidłowe, to walcowane kule przesuwają się w wykroju jedna w stosunku do drugiej, mostki wciskają się w objętość kul i powstawać mogą łuski. Nacięcia na powierzchni kul mogą pojawiać się wtedy, gdy półwyrob odkształcany jest w wykroju ze zmiennym naciskiem, wskutek czego metal jest częściowo ścinany brzegiem kołnierza wykroju.

Jedną z podstawowych przyczyn powstawania wgnieceń na powierzchni kuli jest nalepianie się metalu na walec, co wynika z intensywnego poślizgu między odkształcanym półwyrobem i narzędziem, warstwa powierzchniowa ściskanego metalu silnie się nagrzewa i w postaci oddzielnych łusek może nalepiać się na powierzchnię wykroju walca. Jak wykazują doświadczenia skłonność do nalepiania się metalu jest tym większa, im większa jest prędkość poślizgu między walcem i półwyrobem oraz im mniejsza jest twardość walców. Przy zbyt niskim utwardzeniu walców nadtopiony metal zatrzymuje się na narzędziach i przy ponownym zetknięciu się z półwyrobem na kulach pojawiają się głębokie wgniecenia.

2.1.2. Poślizg metalu w wykroju

Poślizg metalu na powierzchni wykroju walców powstaje wskutek różnicy prędkości obwodowych walca roboczego i półwyrobu. Walec styka się z kształtowanym półwyrobem po łuku ABC (rys. 2.4). Prędkość obwodowa w wykroju walca wzrasta od minimum

w punkcie B do maksimum w punktach A i C, proporcjonalnie do zwiększania się średnicy walca D_w . Podobnie zmienia się prędkość obwodowa półwyrobu.



Rys. 2.4. Schemat ilustrujący zagadnienie prędkości poślizgu metalu w wykroju śrubowym

Prędkości obwodowe walca i półwyrobu są sobie równe w punkcie pośrednim wykroju N, oddległym od wierzchołka kołnierza o wielkość a . We wszystkich pozostałych punktach wykroju prędkości obwodowe walca i półwyrobu różnią się, wskutek czego powstaje poślizg między odkształcanym metalem i walcem. Największy poślizg jest w miejscu styku wierzchołka kołnierza walca i odkształcanego mostka (przy minimalnej średnicy d_p). Obwodowa prędkość walca w tym punkcie wykroju wynosi

$$v_{NW} = \frac{\pi}{60} D_W n_W, \quad (2.1)$$

gdzie: n_W – prędkość obrotowa walców w obr/min.

Obwodowa prędkość walcowanego półwyrobu w punkcie A wykroju wynosi

$$v_{Np} = \frac{\pi}{60} d_p n_p, \quad (2.2)$$

gdzie: n_p – prędkość obrotowa półwyrobu walcowanego w obr/min.

W płaszczyźnie neutralnej prędkości obwodowe walców i półwyrobu są sobie równe ($v_{NW} = v_{Np}$). Zatem prędkość obrotowa półwyrobu wynosi

$$n_p = \frac{D_W - 2a}{d_p + 2a} n_W. \quad (2.3)$$

Z kolei maksymalna prędkość poślizgu ($v_s = v_W - v_p$) występuje na wierzchołku kołnierza wykroju, tj w punkcie A (C). Jest ona równa

$$v_s = \frac{\pi}{60} \left[D_W - \frac{d_p(D_W - 2a)}{d_p + 2a} \right] n_W. \quad (2.4)$$

Z powyższego równania widać, że prędkość poślizgu rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej i średnicy walców roboczych. Zwiększa się wówczas tendencja do nalepiania się metalu w wykroju walców, co stwierdzono praktycznie przy walcowaniu kul. Należy jednak pamiętać o tym, że zmniejszenie tendencji do nalepiania się metalu przez obniżenie prędkości obrotowej walców prowadzi do zmniejszenia przepustowości walcarki, natomiast zmniejszenie średnicy walców w dopuszczalnym zakresie nie obniża przepustowości i żywotności walców roboczych.

Wstępne podgrzewanie walców i stosowanie smarów węglowych zmniejsza tendencję do nalepiania się metalu w wykroju walców, co znalazło praktyczne zastosowanie przy walcowaniu kul. W praktyce obniżenie tendencji do nalepiania się metalu w wykroju walców w tym procesie osiąga się przez optymalny dobór średnicy i prędkości obrotowej walców, jak również wskutek doboru odpowiedniego gatunku stali na narzędzia i jego obróbki cieplnej. Praktyczne zastosowanie znalazła w tym zakresie stal, zawierająca 0,4% C, 0,4% Mn, 0,4% Si, 8,0% Cr i 2,5% W, która po utwardzeniu wykazywała twardość rzędu 65 – 68 HRC.

2.1.3. Struktura i własności mechaniczne kul po walcowaniu

W przypadku walcowania kul na mielniki stawia się wymagania odnośnie ich twardości. Zgodnie z PN-H-94057:1998 kule dzieli się na trzy klasy w zależności od twardości: klasa I - min. 500 HB, klasa II - 400 ÷ 500 HB, klasa III - min. 280 HB.

Od kul do łożysk tocznych wymagane są wysokie wymagania odnośnie ich struktury i własności mechanicznych. Badania makro- i mikrostruktury metalu na kule, wykonane ze stali łożyskowej, pokazały, iż te półwyroby niewiele się odkształcają w warstwach osiowych, gdzie włókna zachowują swój prostoliniowy kierunek, a w warstwach zewnętrznych zachodzi intensywne odkształcenie, prowadzące do skręcania włókien. W mikrostrukturze metalu kul po walcowaniu stwierdza się sorbit i perlit, a wielkość ziarna i odpowiednia twardość są różne na przekroju kul. Po odpuszczeniu kul ich struktura zawiera drobnoziarnisty perlit z równomiernie rozłożonymi węglakami.

Dla zabezpieczenia metalu przed pękaniem w jego strefie osiowej walcowanie prowadzi się z temperatury nagrzewu rzędu 850 – 900 °C i przy prędkości obrotowej walców od 75 do 180 obr./min. Kalibrowanie wykroju walców jest tak obliczone, aby gniot półwyrobu zachodził odpowiednio wąskimi kołnierzami, bez przepełniania tego wykroju.

Wskutek tego, walcowane półwyroby kul odnośnie kształtu, jakości powierzchni, struktury i własności mechanicznych w pełni odpowiadają wymaganiom dla łożysk o normalnej dokładności.

2.2. Kalibrowanie walców z wykrojem śrubowym

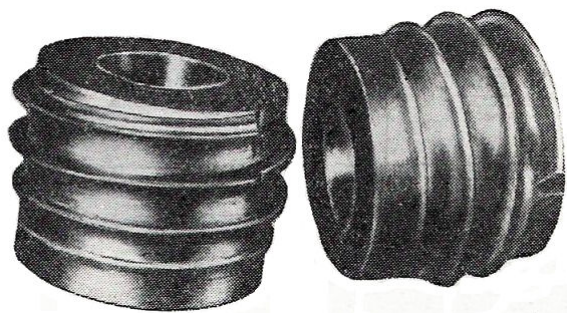
2.2.1. Konstrukcja wykroju śrubowego

Podstawowymi narzędziami roboczymi do wytwarzania półwyrobów kul są dwa walce robocze z wykrojami śrubowymi. Według charakteru odkształcenia wykroj takich walców (rys. 2.5) można rozdzielić na dwie części:

- odcinek kształtujący, na którym zachodzi chwyt półwyrobu i stopniowe ukształtowanie kul, połączonych mostkiem;
- odcinek kalibrujący, na którym dokonywane jest ostateczne kalibrowanie kul i ich rozdzielanie na pojedyncze elementy.

Kształtowanie półwyrobu na kule dokonywane jest kołnierzami wykroju, których wysokość stopniowo wzrasta. Dla uproszczenia obliczeń kalibrowniczych i przygotowania walców przyjmuje się, iż wysokość kołnierza wykroju zmienia się prostoliniowo.

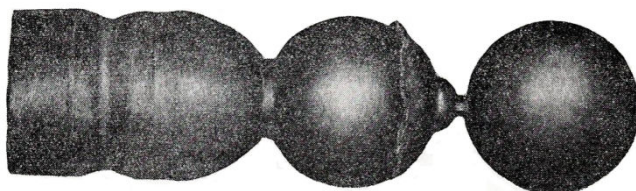
Na podstawie doświadczeń i analiz teoretycznych ustalono warunki, których spełnienie jest niezbędne do uzyskania w procesie walcowania kul o prawidłowym kształcie, bez łusek i zawalcowań, przy minimalnym zużyciu metalu podczas walcowania.



Rys. 2.5. Walce do walcowania śrubowego na gorąco półwyrobów kul [64]

Zgodnie z pierwszym warunkiem koniecznym jest, aby objętość dowolnej części półwyrobu, uchwycona przez walce, pozostawała niezmienną podczas jej przechodzenia przez pozostałe odcinki wykroju. W tym przypadku w dowolnym momencie walcowania w wykroju nie będzie nadmiaru metalu. Powstanie nadmiaru metalu jest szczególnie niekorzystne na tych odcinkach wykroju, gdzie płynięciu osiowemu towarzyszą wysokie kołnierze wykroju. Przy pojawieniu się nadmiaru metalu pogarsza się kształt kul, zachodzi także tendencja do powstawania pustek w osiowej strefie półwyrobu, gdyż powstanie nadmiaru metalu w wykroju, sprzyja poprzecznemu rozwalcowaniu półwyrobu. Nie wielka ilość nadmiernego metalu dopuszczalna jest tylko na początku wykroju, kiedy kołnierz wykroju jest stosunkowo niski i nie ogranicza wypływania nadmiaru metalu z wykroju. Jednakże do dokonania takiego płynięcia konieczna jest dodatkowa praca, co prowadzi do wzrostu mocy, koniecznej do wywołania odkształcenia. Aby zabezpieczyć stałą objętość metalu w wykroju, kołnierze walca powinny mieć na długości wykroju dokładnie określoną grubość.

Według drugiego warunku zmiany profilu i wymiarów kołnierza wykroju powinny odpowiadać wydłужeniu zgniatanego półwyrobu. W wariantcie optymalnym długość zgniatanego mostka (łączącego kule) powinna być równa szerokości wierzchołka kołnierza wykroju. Jeżeli przyrost szerokości kołnierza jest mniejszy od wydłужenia mostka, to materiał będzie odchodził od wykroju i na powierzchni półwyrobu powstanie zawalcowanie (rys. 2.6), które w dalszym toku procesu zostanie rozwalcowane w łuskę. Natomiast wówczas, gdy zmiany szerokości kołnierza są większe od wydłужenia, to w zgniatanym mostku powstaną osiowe naprężenia rozciągające, które mogą doprowadzić do jego zerwania.



Rys. 2.6. Tworzenie się zawalcowania na powierzchni półwyrobu kul [14]

Badania doświadczalne wykazały, iż pod koniec walcowania, gdy mostek ma stosunkowo małą średnicę (mniej niż 10 mm), drugiego z przytoczonych warunków nie udaje

się zachować. Jednakże wówczas zawalcowania i łuski nie powstają, gdyż metal płynie przede wszystkim w kierunku promieniowym i mostek przyjmuje kształt owalny.

Celem spełnienia podanych powyżej warunków, na kolejnych odcinkach wykroju śrubowego należy bardzo dokładnie określić grubość kołnierzy wykroju, która ulega zmianie na długości odcinka kształtującego wykroju.

Trzeci warunek mówi o tym, że materiał powinien być zgniatany na możliwie wąskich odcinkach, gdyż wówczas minimalizuje się możliwość powstawania pęknięć wewnętrznych w materiale (tzw. efekt Mannesmanna). Wychodząc z warunku wytrzymałości, szerokość kołnierza wykroju przyjmuje się nie mniejszą niż $2,0 \div 2,5$ mm, a dla dokonania oddzielenia się metalu (w strefie rozdzielania) szerokość ta powinna być nie mniejsza niż $4 \div 5$ mm. Odcinek oddzielający wykroju ma stały skok podania i profil, odpowiadający zarysowi walcowanych kul. Wierzchołek kołnierza odcinka oddzielającego ma rowek dla obniżenia wypływu metalu, wygniatanego przy rozdzielaniu mostków (rys.2.2b).

2.2.2. Obliczenia wykroju śrubowego do walcowania kul¹

Zgodnie z teorią kalibrowania walców, opracowaną przez Granovskiego [8] dla całkowitego wypełnienia wykroju w procesie walcowania kul konieczne jest nieprzerwane przyleganie materiału do powierzchni narzędzi. Jest to możliwe wtedy, gdy spełniony jest warunek (rys. 2.7) równości objętości materiału wyciśniętego z mostka $dV_{m\alpha}$ i przyrostu objętości półsfer kuli $dV_{k\alpha}$. Zatem, można zapisać, że:

$$|dV_{k\alpha}| = k|dV_{m\alpha}|, \quad (2.5)$$

gdzie: k – współczynnik kompensujący niedokładność wykonania walców i obciążenie walcarki, przyjmowany w zakresie $k=1,2 \div 1,3$.

W każdym momencie walcowania objętości mostka $V_{m\alpha}$ i półsfer kuli $V_{k\alpha}$ określone są następującymi zależnościami:

$$V_{m\alpha} = \pi r_\alpha^2 b_\alpha, \quad (2.6)$$

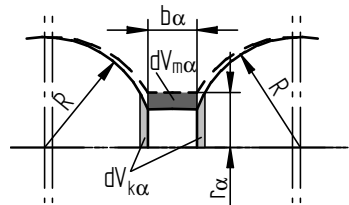
$$V_{k\alpha} = \frac{4}{3}\pi R^2 \sqrt{R^2 - r_\alpha^2} + \frac{2}{3}\pi r_\alpha^2 \sqrt{R^2 - r_\alpha^2}. \quad (2.7)$$

Elementarną objętość materiału wyciśniętego z mostka wylicza się różniczkując wyrażenie (2.6) względem dwóch zmiennych (r_α i b_α):

$$dV_{m\alpha} = 2\pi r_\alpha b_\alpha dr_\alpha + \pi r_\alpha^2 db_\alpha. \quad (2.8)$$

Natomiast przyrost objętości półsfer kuli wynosi:

$$|dV_{k\alpha}| = \frac{2\pi r_\alpha^3}{\sqrt{R^2 - r_\alpha^2}} dr_\alpha. \quad (2.9)$$



Rys. 2.7. Zmiana objętości materiału w procesie walcowania śrubowego

¹ Problematykę obliczania wykroju śrubowego podano za opracowaniem Celikowa i in. [4]

Podstawiając wyrażenia (2.8) i (2.9) do równania (2.5) znajduje się, że:

$$b'_\alpha + \frac{2b_\alpha}{r_\alpha} = \frac{2r_\alpha}{k\sqrt{R^2 - r_\alpha^2}}. \quad (2.10)$$

Z rozwiązania powyższego równania różniczkowego otrzymuje się zależność:

$$b_\alpha = e^{-\int \frac{2}{r_\alpha} dr_\alpha} \left[\int \frac{2r_\alpha}{k\sqrt{R^2 - r_\alpha^2}} e^{\int \frac{2}{r_\alpha} dr_\alpha} dr_\alpha + C \right]. \quad (2.11)$$

Uwzględniając, że

$$\left. \begin{aligned} \int \frac{2}{r_\alpha} dr_\alpha &= 2 \ln r_\alpha \\ e^{2 \ln r_\alpha} &= r_\alpha^2; \quad e^{-2 \ln r_\alpha} = \frac{1}{r_\alpha^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

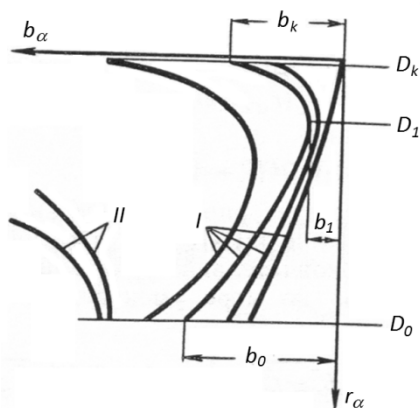
sprowadza się zależność (2.11) do postaci

$$b_\alpha = \frac{1}{r_\alpha^2} \left(\int \frac{2r_\alpha^3}{k\sqrt{R^2 - r_\alpha^2}} dr_\alpha + C \right). \quad (2.13)$$

Po podstawieniu $r_\alpha^2 = u$ z rozwiązania powyższej całki otrzymuje się, że

$$b_\alpha = \frac{-\frac{2}{3k} (2R^2 + r_\alpha^2) \sqrt{R^2 - r_\alpha^2} + C}{r_\alpha^2}. \quad (2.14)$$

Otrzymane rozwiązanie można przedstawić jako rodzinę krzywych (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Rodziny krzywych wyznaczone na podstawie równania (2.14) [4]

Przy walcowaniu kul szerokość kołnierzy powinna być względnie niewielka, by nie dopuścić do naruszenia wewnętrznej spójności materiału. Dlatego też należy korzystać z krzywych należących do rodziny I (rys. 2.8), których cechą charakterystyczną jest posiadanie wartości minimalnej. W tym przypadku przy obciskaniu mostka łączącego kule szerokość kołnierza początkowo zmniejsza się od wartości wyjściowej b_0 do wartości minimalnej b_1 , a następnie zwiększa się do wartości końcowej b_k .

Dla wyznaczenia ostatecznej zależności na szerokość kołnierza niezbędne jest wyznaczenie stałej całkowania C . W tym celu wykorzystuje się warunek wytrzymałości kołnierza o szerokości minimalnej b_1 . Na podstawie doświadczeń z walcowania kul [4] przyjmuje się, że:

$$b_1 = 1,7 + 0,04 (R - 10) [mm]. \quad (2.15)$$

Przyjętej wartości b_1 odpowiada określony promień mostka r_1 . Po podstawieniu wartości r_1 i b_1 do równania (2.14) otrzymuje się zależność na stałą C , a następnie ostateczne wyrażenie na szerokość kołnierza wykroju b_α w funkcji promienia mostka r_α :

$$b_\alpha = \frac{b_1 r_1^2 + \frac{2}{3k} (2R^2 + r_1^2) \sqrt{R^2 - r_1^2} - \frac{2}{3k} (2R^2 + r_\alpha^2) \sqrt{R^2 - r_\alpha^2}}{r_\alpha^2}. \quad (2.16)$$

Promień r_1 mostka wyznacza się korzystając z warunku, że w punkcie przegięcia krzywej $b_\alpha = f(r_\alpha)$ pochodna $b'_\alpha = 0$, a równanie (2.10) przyjmuje postać:

$$\frac{2b_1}{r_1} = \frac{2r_1}{k\sqrt{R^2 - r_1^2}}. \quad (2.17)$$

Rozwiązując powyższą zależność względem r_1 otrzymuje się, że [19]:

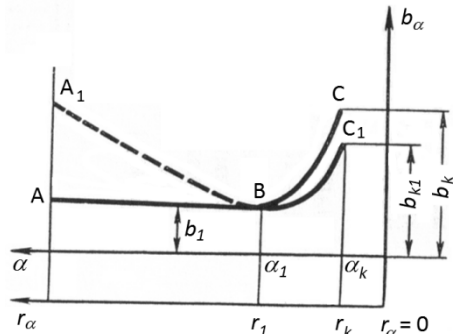
$$r_1 = \sqrt{\sqrt{k^2 b_1^2 R^2 + \frac{k^4 b_1^4}{4}} - \frac{k^2 b_1^2}{2}}. \quad (2.18)$$

Ze względu na fakt, iż b_1 jest dużo mniejsze od promienia kuli R , to do określenia wartości r_1 z wystarczającą dokładnością można zastosować zależność uproszczoną, zgodnie z którą:

$$r_1 \approx \sqrt{k b_1 R}. \quad (2.19)$$

Z praktyki walcowniczej wiadomo, że do ukształtowania kuli walec musi wykonać 1,25 obrotu ($\alpha=450^\circ$). Nie jest możliwe odwalcowanie kuli podczas jednego obrotu walców, gdyż pod koniec kształtowania mostek jest cienki i materiał może odchodzić od wykroju, co prowadzi do błędów kształtu. Niewskazane jest również wydłużanie odcinka kształtującego, ponieważ prowadzi ono do wzrostu złożoności kształtu wykroju.

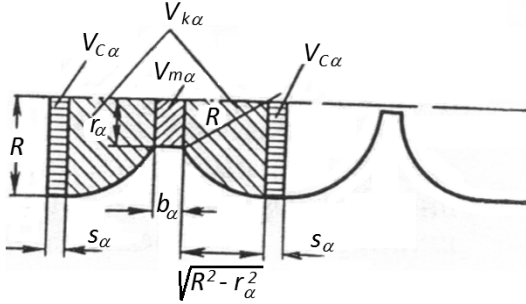
Na rys. 2.9 przedstawiono zależność $b_\alpha = f(r_\alpha)$ - krzywa A_1BC_1 , wyznaczoną na podstawie równania (2.16), której spełnienie zapewnia nieprzerwane przyleganie materiału do kołnierza wykroju.



Rys. 2.9. Wykres zmian szerokości kołnierza wykroju b_α w funkcji promienia mostka r_α i kąta obrotu walca α [4]

W rozwiązaniach przemysłowych często celem uproszczenia wykonawstwa wykrojów śrubowych, przyjmuje się na odcinku od $\alpha=0^\circ$ do α_1 stałą wartość szerokości kołnierza $b_\alpha=b_1$. Na tym odcinku wykroju objętość materiału w mostku jest niewystarczająca do wypełnienia półsfery kuli. Brakująca objętość metalu jest uzupełniana z cylindrycznych

części wykroju o szerokości s_α (rys. 2.10 - objętość $V_{C\alpha}$). Otwarcie wykroju o wartość s_α konieczne jest także do uzyskania potrzebnej szerokości kołnierza b_α . Stosowanie kołnierza o stałej szerokości jest możliwe także dzięki jego dużej wytrzymałości, wynikającej z zaokrąglonej jego powierzchni bocznej promieniem kuli R .



Rys. 2.10. Przekrój przez wykroj otwarty walca [4]

Na odcinku końcowym od α_1 do α_k wybierana jest taka zależność szerokości kołnierza (linia BC - rys. 2.9), przy której wymagane jego rozszerzenie od wartości b_1 do b_k osiągnięte jest przez podcinanie wykroju stałym skokiem T_{p1} (rys. 2.11). Otwarcie wykroju na tym odcinku określone jest zależnością

$$s_{\alpha_1} - s_\alpha = (r_1 - r_\alpha) \tan \beta, \quad (2.20)$$

gdzie: $\tan \beta$ – współczynnik kątowy zależności $b_\alpha = f(r_\alpha)$, przy podcięciu kołnierza stałym skokiem.

Zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 2.11b szerokość kołnierza wykroju, przy zastosowaniu podcinania stałym skokiem, określona jest równaniem

$$b_\alpha = b_1 + 2\sqrt{R^2 - r_1^2} + (r_1 - r_\alpha) \tan \beta - 2\sqrt{R^2 - r_\alpha^2}. \quad (2.21)$$

Przy zadanej zmianie szerokości kołnierza objętość mostka na odcinku od α_1 do α_k opisana jest zależnością

$$V_{m\alpha} = \pi r_\alpha^2 \left[b_1 + 2\sqrt{R^2 - r_1^2} + (r_1 - r_\alpha) \tan \beta - 2\sqrt{R^2 - r_\alpha^2} \right]. \quad (2.22)$$

Elementarny przyrost objętości mostka wynosi zaś

$$dV_{m\alpha} = \left[2\pi b_1 r_\alpha + 4\pi r_\alpha \sqrt{R^2 - r_1^2} - 4\pi r_\alpha \sqrt{R^2 - r_\alpha^2} + \frac{2\pi r_\alpha^3}{\sqrt{R^2 - r_\alpha^2}} + 2\pi r_1 r_\alpha \tan \beta - 3\pi r_\alpha^2 \tan \beta \right] dr_\alpha. \quad (2.23)$$

Podstawiając wyrażenia (2.23) i (2.9) do równania (2.5), zamieniając r_α na r_k uzyskuje się zależność na $\tan \beta$:

$$\tan \beta = \frac{b_1 + 2\sqrt{R^2 - r_1^2} - 2\sqrt{R^2 - r_k^2} + \frac{r_k^2}{\sqrt{R^2 - r_k^2}} \left(1 - \frac{1}{k} \right)}{1,5r_k - r_1}, \quad (2.24)$$

gdzie r_k – promień końcowy mostka łączącego kule.

Graniczną wartość promienia r_k określa się z warunku:

$$1,5r_k - r_1 > 0. \quad (2.25)$$

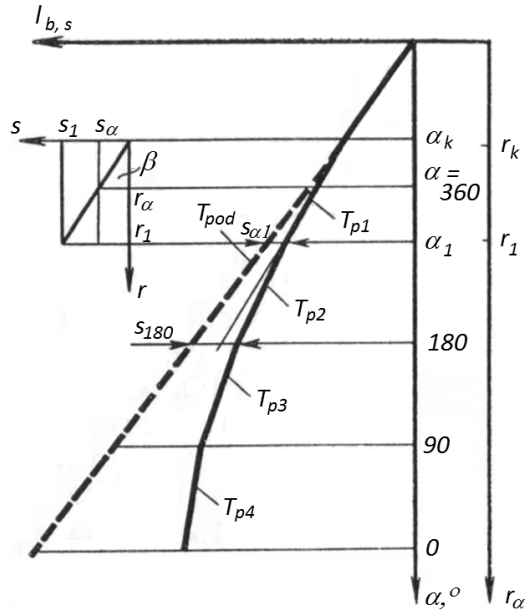
Z praktyki walcowniczej wiadomo [4], że promień mostka przed odcięciem r_{od} przyjmuje się nieco większy od r_k , jako:

$$r_{od} = 0,19R + 0,34 [mm], \quad (2.26)$$

natomiast szerokość kołnierza przed odcinaniem wynosi

$$b_{od} = 4 + 0,14(R - 10)[mm]. \quad (2.27)$$

Korzystając z wymiarów kołnierzy w różnych przekrojach wykroju wyznaczany jest podstawowy skok nacinania wykroju T_{pod} i skok podcięcia kołnierza T_p , który zwykle zmieniany jest co 90° obrotu walca - rys. 2.11.



Rys. 2.11. Schemat przedstawiający sposób nacinania wykroju śrubowego, przy zastosowaniu podcinania [4]

Po wyborze skoków określany jest współczynnik całkowitego nadmiaru metalu w wykroju (rys. 2.10, przy $\alpha=360^\circ$)

$$m = \frac{V_{S360} + V_{m360} + 2V_{C360}}{V_K}, \quad (2.28)$$

gdzie: V_K – objętość kuli i mostka przed jego odcięciem

$$V_K = \pi \left[r_{od}^2 b_{od} + \frac{2}{3} \sqrt{R^2 - r_{od}^2} (2R^2 - r_{od}^2) \right]; \quad (2.29)$$

V_{S360} – objętość dwóch półsfery przy obrocie walca o kąt $\alpha=360^\circ$

$$V_{S360} = \pi \frac{2}{3} \sqrt{R^2 - r_{360}^2} (2R^2 - r_{360}^2); \quad (2.30)$$

V_{m360} – objętość mostka

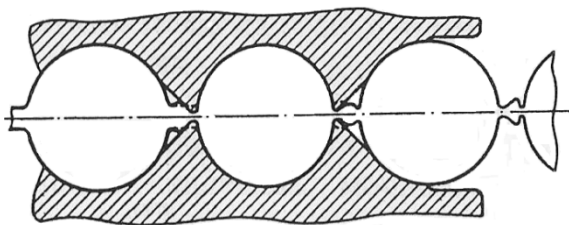
$$V_{m360} = \pi r_{360}^2 b_{360}; \quad (2.31)$$

V_{C360} – objętość walców powstałych w wyniku otwarcia wykroju

$$V_{C360} = \pi R^2. \quad (2.32)$$

Zgodnie z danymi doświadczalnymi dopuszczalny współczynnik nadmiaru materiału (dla $\alpha=360^\circ$) powinien mieścić się w przedziale $m=1,05 \div 1,07$. w przypadku, gdy nadmiar jest większy od podanej wartości to kołnierze pierwszego wykroju powinien być przemieszczony w stronę drugiego zwoju, by zmniejszyć wartość s_a , a w konsekwencji objętość części cylindrycznej wykroju.

Konstrukcja odcinka oddzielającego wykroju walca do walcowania półwyrobów kul powinna zabezpieczać wykalibrowanie oddzielanej kuli, zmniejszenie jej owalności i pewne oderwanie się kuli od mostka. Zarys kołnierza skośnego na odcinku oddzielającym wykroju przedstawiono na rys. 2.12. Odcinające kołnierze obu walców są zastrzone i na ich powierzchniach zewnętrznych znajdują się rowki śrubowe. Przy takim sposobie konstrukcji oddzielającego odcinka wykroju metal, wyciskany z mostka zastrzonymi odcinkami kołnierzy wpływa w rowki śrubowe tychże kołnierzy. Jednocześnie mostek od stron kul jest pocieniany, ale w pełni nie są oddzielone. Taka konstrukcja kołnierzy śrubowych, oddzielających uformowany półwyrób, gwarantuje nie występowanie wad na powierzchni kuli, niedopuszczalnych wskutek tego, iż naddatek na dalszą obróbkę skrawaniem (przy wyrobie kul łożyskowych) wynosi ok. 0,6 mm na stronę.



Rys. 2.12. Zarys wykrojów śrubowych na odcinku rozdzielania półwyrobów kul

Przytoczona w bieżącym rozdziale metodyka projektowania wykroju śrubowego bazuje na literaturze rosyjskojęzycznej. Jednakże znaleźć można także publikacje w języku angielskim, np. [63, 67, 70], poświęcone tej tematyce.

2.2.3. Dobór średnicy walca

Podczas konstruowania walców ważne jest właściwe dobranie średnicy walca, mające na uwadze, iż wraz ze wzrostem średnicy walca maleje gniot jednostkowy i poprawiają się warunki chwytu, wraz z którymi zwiększa się także wytrzymałość walców oraz zmniejszają się ich ugięcie sprężyste i zużycie. Należy przy tym pamiętać, że wraz ze wzrostem średnicy walca, przy stałej prędkości obrotowej, wzrasta także prędkość poślizgu, a w konsekwencji skłonność do nalepiania się metalu na walce. Oprócz tego wzrastają parametry klatki roboczej i koszty przygotowania walców. Wychodząc z danych eksploatacyjnych walcarek skośnych, pracujących w Rosji, do walcowania kul o średnicach od 25 do 125 mm, określono, iż optymalnymi walcami są te, przy których stosunek średnic wynosi $D/d_k = 5 \div 6$.

Wykroje śrubowe walców do walcowania kul naciną się na tokarkach mechanicznych lub numerycznych, przy czym przy toczeniu wykroju na tokarkach mechanicznych początkowo naciną się go ze skokiem podstawowym, a następnie pogłębia się go na pewnych odcinkach zgodnie z nomogramem nacinania (np. rys. 2.11). Następnie wykonuje się część tylną (odcinającą) kołnierza.

2.3. Konstrukcja prowadnic

Zmiennym narzędziem roboczym podczas walcowania kul w walcarce skośnej są prowadnice (rys. 2.13), ustawiane symetrycznie do osi walcowania w odległości od siebie równej

$$f = d_k + (1 \div 2)[mm], \quad (2.33)$$

gdzie: d_k – średnica walcowanej kuli, w mm.

Szerokość roboczej powierzchni prowadnicy g , z uwzględnieniem prześwitu $(0,2 \div 0,5 \text{ mm})$ między wierzchołkami kołnierza walca i boki prowadnicy wynosi

$$g = m + n - (0,4 \div 1,0)[mm], \quad (2.34)$$

gdzie:

$$m = R_W + 0,5d_k - \sqrt{(R_W + h_\alpha)^2 - (f - C)^2}, \quad (2.35)$$

$$n = R_W + 0,5d_k - \sqrt{(R_W + h_\alpha)^2 - (f + C)^2}. \quad (2.36)$$

Przy czym:

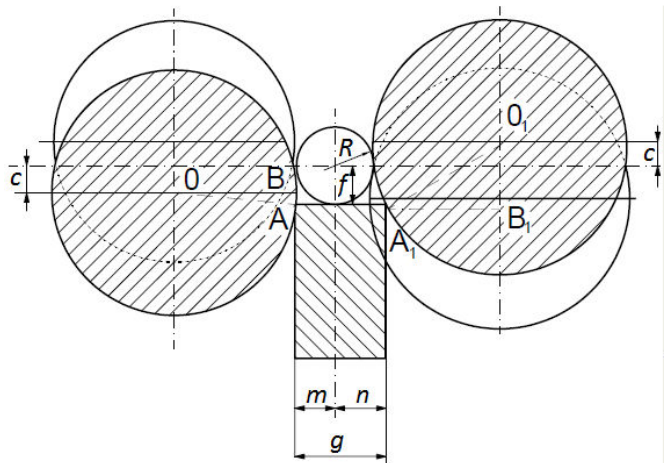
R_W – promień walca na dnie wykroju,

h_α – wysokość kołnierza walca na rozpatrywanym odcinku wykroju,

C – przesunięcie środka walca na rozpatrywanym odcinku wykroju,

$$C = l_1 \tan \theta, \quad (2.37)$$

gdzie: l_1 – odległość od punktu przecinania się osi walców do rozpatrywanego przekroju wykroju, θ – kąt zukosowania walców.



Rys. 2.13. Schemat przedstawiający przekrój poprzeczny narzędzi w procesie walcowania śrubowego kul, służący do określenia szerokości powierzchni roboczej prowadnicy

2.4. Walcarki do kształtowania kul

Stosunkowo niewielkie rozpowszechnienie metody walcowania śrubowego kul powoduje ograniczony dostęp do agregatów, na których można zrealizować proces kształtowania. W związku z tym często wykorzystuje się walcarki skośne, stosowane w procesach walcowania rur. Są to jednak maszyny specjalne i stosunkowo drogie, które wymagają licznych modernizacji w celu ich zaadaptowania do realizacji procesów walcowania półwyrobów kul. Spotyka się również walcarki skośne, zaprojektowane do walcowania odkuwek w wykrojach śrubowych. Najczęściej tego typu walcarki budowane są jako egzemplarze prototypowe, na specjalne zamówienie klienta. Można jednak spotkać maszyny produkowane seryjnie, dedykowane do walcowania skośnego odkuwek. Przy czym głównym producentem tego typu urządzeń są kraje, w których procesy walcowania skośnego odkuwek w wykrojach śrubowych, stosowane są w szerszym zakresie (Rosja i Chiny).

Rosyjską konstrukcją skośnej klatki walcowniczej do kształtowania kul, która jest produkowana seryjnie przez zakłady VNIIMETMASH, przedstawiono na rysunku 2.14. Cechą charakterystyczną urządzenia jest zwarta i sztywna konstrukcja klatki roboczej, wewnątrz której zabudowano dwa walce w układzie poziomym. Na powierzchni walców (narzędzi) wykonane są wykroje śrubowe, umożliwiające kształtowanie odkuwek. Narzędzia ustawione są skośnie w stosunku do osi walcowania (w płaszczyźnie pionowej), a kąt ich zukosowania może być zmieniany w zakresie $0 - 10^\circ$. Dodatkowo walce robocze mają możliwość regulacji położenia w płaszczyźnie poziomej. Ma to istotne znaczenie w przypadku regeneracji narzędzi, podczas której zmniejszeniu ulega średnica części roboczej walców. Klatka walcownicza wyposażona jest w dwie regulowane prowadnice (górną i dolną), które utrzymują półfabrykat między narzędziami w trakcie procesu walcowania. Wsad do przestrzeni roboczej podawany jest w specjalnym podajniku, zaś ukształtowane kule odprowadza się specjalną rynną umieszczoną z drugiej strony urządzenia. Obecnie zakłady VNIIMETMASH produkują trzy typowielkości walcarek skośnych (tab. 2.1), które umożliwiają kształtowanie kul ze stali węglowych i stopowych w zakresie średnic od 20 mm do 125 mm. Walcarki posiadają zwartą konstrukcję z własnym, niezależnym napędem elektrycznym.



Rys. 2.14. Klatka robocza walcarki skośnej ШПС 20-60 firmy VNIIMETMASH [12]

2. Analiza stanu zagadnienia

Cechą charakterystyczną walcarek z serii ШПС jest sposób podawania półfabrykatu do przestrzeni roboczej klatki. Nagrzane indukcyjnie pręty podawane są od strony przegubowych wałów napędowych. Takie rozwiązanie pozwala znacznie zmniejszyć długość całej linii walcowniczej oraz hal produkcyjnych.

Tab. 2.1. Parametry techniczne rosyjskich walcarek skośnych do walcowania odkuwek firmy VNII-METMASH [12]

Model walcarki	ШПС 20-60	ШПС 40-100	ШПС 80-125
Średnica walcowanej kuli, mm	20 – 60	40 – 100	80 – 125
Maksymalna długość półfabrykatów, m	4 – 5	4 – 6	4 – 6
Temperatura walcowania, °C	1000 – 1100	1000 – 1100	1000 – 1100
Średnica walców, mm	350	500, 560	690
Moc silnika napędowego, kW	250	630	900
Powierzchnia zabudowy agregatu, m	~ 2,7 x 15,5	~ 4,0 x 21	~ 5,4 x 25
Wydajność, t/h	Ø20 mm - 1,2 Ø30 mm - 1,5 Ø40 mm - 2,0 Ø50 mm - 3,4 Ø60 mm - 4,0	Ø40 mm - 5,4 Ø50 mm - 6,2 Ø60 mm - 7,9 Ø70 mm - 6,5 Ø80 mm - 9,7 Ø90 mm - 12,7 Ø100 mm - 15,0	Ø80 mm - 13,0 Ø90 mm - 10,5 Ø100 mm - 14,0 Ø110 mm - 16,5 Ø125 mm - 17,0

Kolejnym producentem seryjnych walcarek skośnych do kształtowania odkuwek w wykrojach śrubowych jest chińska firma Anyang Forging Press Machinery Industry, która jest wiodącym wytwórcą maszyn do obróbki plastycznej na rynku azjatyckim. AFPM w swoich liniach walcowniczych do kształtowania skośnego odkuwek umieszcza dodatkowo urządzenia grzewcze, (nagrzewnicę indukcyjną) do nagrzewania półfabrykatów oraz urządzenie do odbioru i normalizacji temperatury (przed procesem hartowania) ukształtowanych wyrobów. Typową linię walcowniczą do walcowania skośnego kul o wymiarach Ø60 mm, opracowaną i zbudowaną przez firmę Anyang Forging Press Machinery Industry, pokazano na rysunku 2.15. Składa się ona ze skośnej klatki walców roboczych, klatki walców zębatych, redukcijnej przekładni zębatej, silnika elektrycznego, nagrzewnicy indukcyjnej oraz urządzenia przenośnikowego do normalizacji temperatury odkuwek. Proces walcowania kul realizowany jest w dwustojakowej klatce skośnej, pomiędzy walcami, na powierzchni których wykonane są wykroje śrubowe. Podobnie jak w rozwiązaniach walcarek rosyjskich, walce usytuowane są w układzie poziomym. Mają również możliwość zmiany wartości kąta zukosowania osi oraz regulacji położenia w płaszczyźnie poziomej. Walce robocze, napędzane są za pośrednictwem wałów przegubowych od klatki walców zębatych, której zadaniem jest podział prędkości obrotowej

pojedynczego czopa napędowego na dwie jednakowe prędkości obrotowe walców. W odróżnieniu od walcarek rosyjskich, półfabrykat podawany jest do przestrzeni roboczej od strony swobodnych czopów walców, zaś ukształtowane kule odbierane są od strony przegubowych wałów napędowych. Firma Anyang Forging Press Machinery produkuje sześć wielkości walcarek, które umożliwiają kształtowanie kul stalowych w zakresie średnic od $\varnothing 20$ mm do $\varnothing 105$ mm. Podstawowe parametry techniczne linii walcowniczych zestawiono w tabeli 2.2.



Rys. 2.15. Linia walcownicza do walcowania skośnego kul o wymiarach $\varnothing 60$ mm firmy Anyang Forging Press Machinery Industry (Chiny) [11]

Tab. 2.2. Parametry techniczne walcarek skośnych produkcji chińskiej firmy Anyang Forging Press Machinery Industry [11]

Oznaczenie	$\varnothing 30$	$\varnothing 40$	$\varnothing 50$	$\varnothing 60$	$\varnothing 80$	$\varnothing 100$
Zakres wymiarów walcowanych kul, mm	20 – 32	30 – 42	30 – 52	40 – 63	60 – 84	80 – 105
Prędkość obrotowa walców, obr/min	100	90	71,5	71,5	64	40
Wydajność t/h	0,74	1,57	2,44	4,22	8,96	10,94
Moc silnika napędowego, kW	37	90	132	185	450	630
Moc nagrzewnicy indukcyjnej, kW	300	600	1000	1600	3500	4000
Masa agregatu, t	3,1	5,8	10	16	27	57

2.5. Przykład walcowania śrubowego kul $\text{S}\varnothing 33$ mm

Bazując na przybliżonej w rozdziale 2.1 metodyce postępowania przeprowadzono prace projektowe, których celem było opracowanie walców śrubowych umożliwiających walcowanie kul z prętów okrągłych, w warunkach laboratoryjnych Katedry Plastycznej Przeróbki Metali AGH w Krakowie. Założono, że próby walcowania wykonane zostaną w laboratoryjnej walcarni skośnej, znajdującej się na wyposażeniu tejże Katedry. Mając na uwadze parametry walcarki przyjęto, że w trakcie prób walcowania kształtowane będą kule o średnicy $\varnothing 33$ mm, które połączone będą ze sobą łącznikami walcowymi o średnicy $\varnothing 6$ mm. Badania doświadczalne poprzedzono symulacją numeryczną projektowanego procesu walcowania półwyrobów kul.

2.5.1. Analiza numeryczna MES

Prace projektowe w zakresie modeli narzędzi – zabezpieczających procesy walcowania skośnego kul $\text{S}\varnothing 33$ mm – wykonano w programie SolidEdge v. 20. Zastosowanie w próbach konkretnej walcarki narzuciło na narzędzia ograniczenia gabarytowe, zgodnie z którym średnica robocza walca wynosiła $\varnothing 215$ mm.

Sprawdzenia poprawności przyjętego rozwiązania narzędzi dokonano numeryczne, symulując proces walcowania półwyrobów kul $\text{S}\varnothing 33$ mm. Należy przy tym podkreślić, iż w literaturze specjalistycznej znaleziono tylko jedno opracowanie [39], poświęcone modelowaniu procesu walcowania śrubowego kul. Jednakże opisana w tej pracy symulacja była niekompletna i ograniczyła się do stadium początkowego kształtowania, w trakcie którego walce wykonały zaledwie 1 obrót.

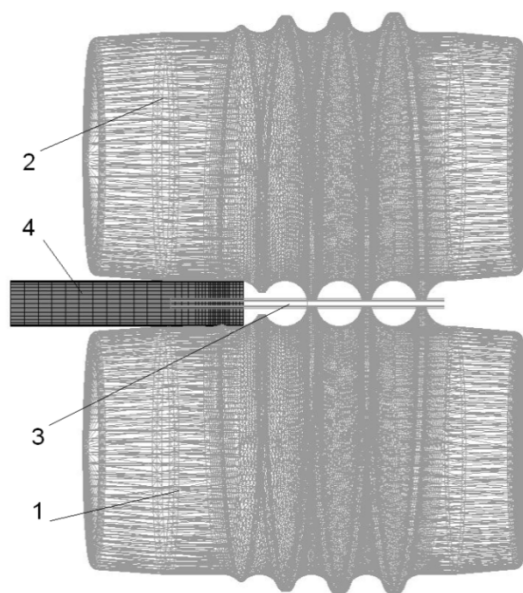
Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych (MES) w programie Simufact Forming GP w wersji 10.0, wykorzystywanym wielokrotnie przez autorów w analizie procesów walcowania poprzecznego. Opracowany na potrzeby prowadzonej analizy model geometryczny procesu walcowania skośnego kul pokazano na rysunku 2.16. W skład modelu wchodzi dwa identyczne walce, dwie listwy prowadzące mające za zadania ustalenie pozycji półfabrykatu w trakcie walcowania oraz wsad (pręt okrągły o średnicy $\varnothing 33$ mm), modelowany za pomocą ośmiowęzłowych elementów heksagonalnych. Na powierzchniach roboczych walców wykonane są śrubowe wykroje o wklęsłych powierzchniach bocznych, których promień jest równy promieniowi walcowanej kuli. W symulacji wykorzystano model materiałowy stali w gatunku 100Cr6, zaczerpnięty z biblioteki zastosowanego programu. Ponadto założono, że: materiał wsadu przed walcowaniem został nagrany w całej objętości do temperatury 1150°C , zaś narzędzia mają stałą temperaturę 150°C . Walce skrócone są względem osi wsadu o kąt $\theta = 3^{\circ}$ i obracają się w tę samą stronę z jednakową prędkością $n_w = 60$ obr/min. Na powierzchni styku materiał-narzędzie przyjęto wartość graniczną czynnika tarcia $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami założono na poziomie $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, zaś między materiałem a otoczeniem $0,35 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Przyjęto również, że symulowane będzie kształtowanie, w trakcie którego walce wykonają co najmniej 4 obroty.

Progresję kształtu półwyrobu w rozważanym wariantcie walcowania pokazano na rys. 2.17. Widoczne jest, że zastosowane rozwiązanie umożliwia kształtowanie kul z dokładnością wystarczającą w przypadku ich przeznaczenia na mielniki (zgodnie z Polską Normą PN-H-94057:1998 dokładność wykonania kul przez walcowanie wynosi

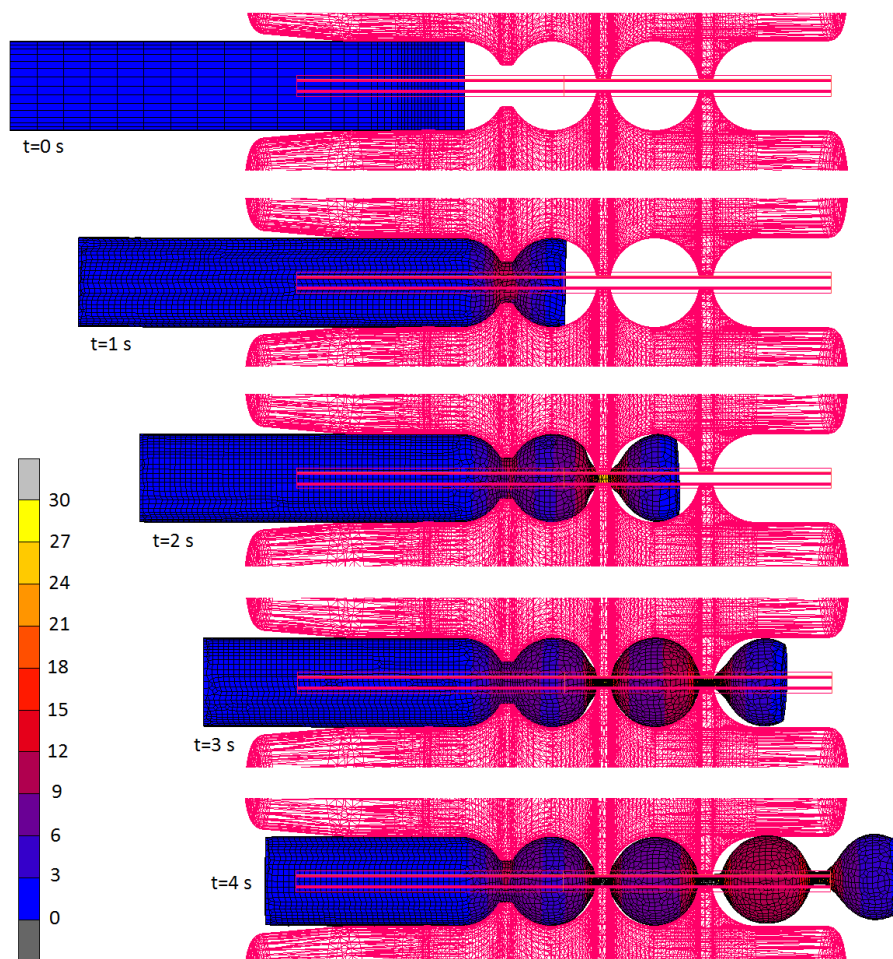
$\pm 3\text{mm}$). Widać wyraźnie, że przemieszczające się śrubowo występy wałców wcinają się okresowo (co jeden obrót) we wsad i zamykają w wykroju materiał o objętości równej objętości kuli. W materiale wsadu kształtowany jest pierścieniowy rowek klinowy o powierzchni wklęsłej, odpowiadającej czaszy kuli. W trakcie kształtowania łączników występuje tendencja do odchodzenia materiału od powierzchni wykroju, w efekcie czego zniekształceniu ulega zarys kuli. Ponadto, w końcowej fazie procesu walcowania łącznik ulega nadmiernemu wydłużeniu, co może utrudnić operację odcinania ukształtowanej kuli od łącznika.

Rysunek 2.17 przedstawia również rozkłady intensywności odkształcenia w półwyrobach kul. Widoczne jest, iż najbardziej materiał jest przerabiany plastycznie w obszarze łączników (mostków). Jest to oczywiste, gdyż w tym miejscu półwyrobu występuje największy przerób plastyczny stali. Należy przy tym wspomnieć, że intensywność odkształcenia w analizowanym procesie walcowania osiąga bardzo duże wartości. Niewątpliwie jest to skutkiem intensywnego płynięcia materiału w kierunku stycznym, powodującego duże odkształcenia zbędne w materiale kształtowanym.

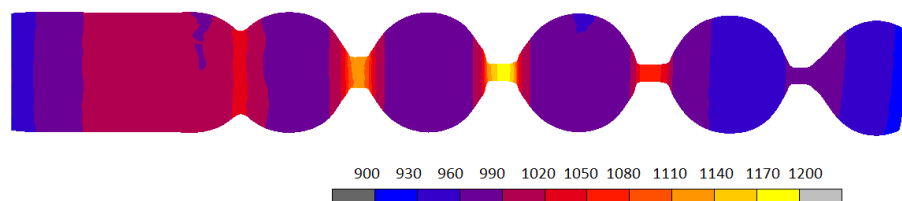
W trakcie symulacji numerycznych analizowano również parametry termiczne procesu. Rozkład temperatury w końcowym etapie symulacji pokazano na kolejnym rysunku 2.18. Można stwierdzić, że materiał utrzymuje w swej objętości temperaturę umożliwiającą kształtowanie plastyczne kul. Fakt ten nie jest oczywisty, gdyż czas kształtowania półwyrobu jest dość długi (ok. 4 s). Należy zatem przyjąć, że w trakcie procesu walcowania w wykrojach śrubowych, ciepło odprowadzone do narzędzi i otoczenia jest rekompensowane w dużym stopniu przez ciepło generowane w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. Temperatura ukształtowanej kuli jest na tyle wysoka by bezpośrednio po walcowaniu możliwe było przeprowadzenie procesu jej hartowania. Dodatkowo w wyniku przeprowadzonych obliczeń MES wyznaczono parametry siłowe analizowanego procesu walcowania śrubowego.



Rys. 2.16. Model geometryczny procesu walcowania kul w walcarce skośnej: 1 – wałek dolny, 2 – wałek górny, 3 – prowadnice, 4 – wsad

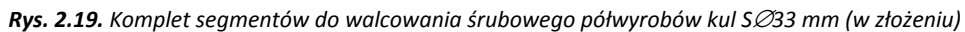


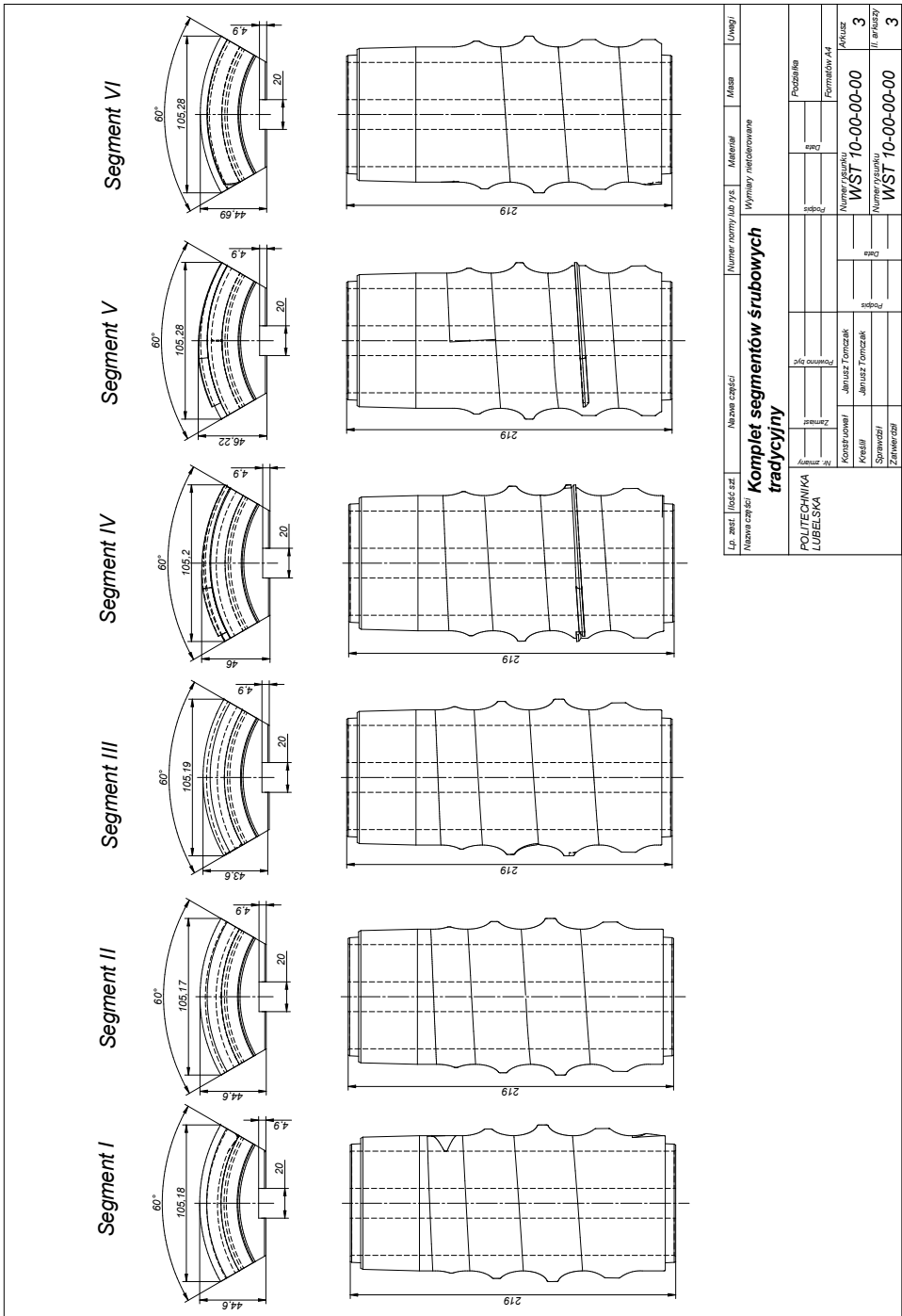
Rys. 2.17. Progresja kształtu i rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobie kul $\varnothing 33$ mm, otrzymanym w procesie walcowania śrubowego



Rys. 2.18. Rozkład temperatury (w °C) w półwyrobie kul $\varnothing 33$ mm otrzymanym w procesie walcowania śrubowego

Reasumując, wyniki analizy numerycznej pokazały, że w zaprojektowanym procesie walcowania śrubowego możliwe będzie otrzymanie kul spełniających wymagania stawiane mielnikom do młynów kulowych. Stąd też podjęto decyzję o wykonawstwie narzędzi, których dokumentację zamieszczono na kolejnych rysunkach 2.19 i 2.20.





Rys. 2.20. Segmenty walca do walcowania śrubowego półwyrobów kul $S\varnothing 33$ mm, z zaznaczonymi podstawowymi parametrami

2.5.2. Próby laboratoryjne walcowania

Badania doświadczalne walcowania śrubowego kul wykonano w dwuwalcowej walcarce skośnej (rys. 2.21), która umożliwia zastosowanie różnych typów kalibrowania walców roboczych, złożenia walców (układ dwu- lub trójwalcowy), narzędzi prowadzących (w układzie dwuwalcowym: prowadnica tarczowa, prowadnica stała lub rolka obrotowa, a w układzie trójwalcowym: walec roboczy).



Rys. 2.21. Walcarka skośna zabudowana w układzie dwóch walców roboczych, zainstalowana w laboratorium Katedry Plastycznej Przeróbki Metali AGH w Krakowie, w której wykonano próby walcowania kul $S\varnothing 33$ mm (widok od strony prowadzenia wsadu)

Walcarka skośna wyposażona jest w układ pomiarowy wykorzystujący czujniki: tensometryczne (do pomiaru momentów obrotowych i sił nacisku) oraz mechaniczne (do pomiaru współczynników prędkości). Maszyna ta umożliwia realizację badań laboratoryjnych przy następujących parametrach technologicznych:

- maksymalna średnica kęsów, w zależności od gatunku stali:
 - węglowa, $50 \div 70$ mm,
 - stopowa i wysokostopowa, $50 \div 60$ mm,
- długość kęsów max. 180 mm,
- temperatura nagrzewu max. 1250°C,
- średnica główek dziurujących $22 \div 54$ mm,
- gniot w przewężeniu walców $10 \div 30$ %,
- kąt zukosowania walców $0 \div 15^\circ$,
- kąt rozwalcowania $0 \div 7^\circ$,
- współczynnik owalizacji $1,0 \div 1,15$,
- stosunek prędkości obwodowej prowadnicy tarczowej do prędkości osiowej walcowanej tulei, zmieniany skokowo w zakresie $1,2 \div 3,0$ poprzez dobór odpowiednich przełożeń kół zębatych przekładni czołowych,

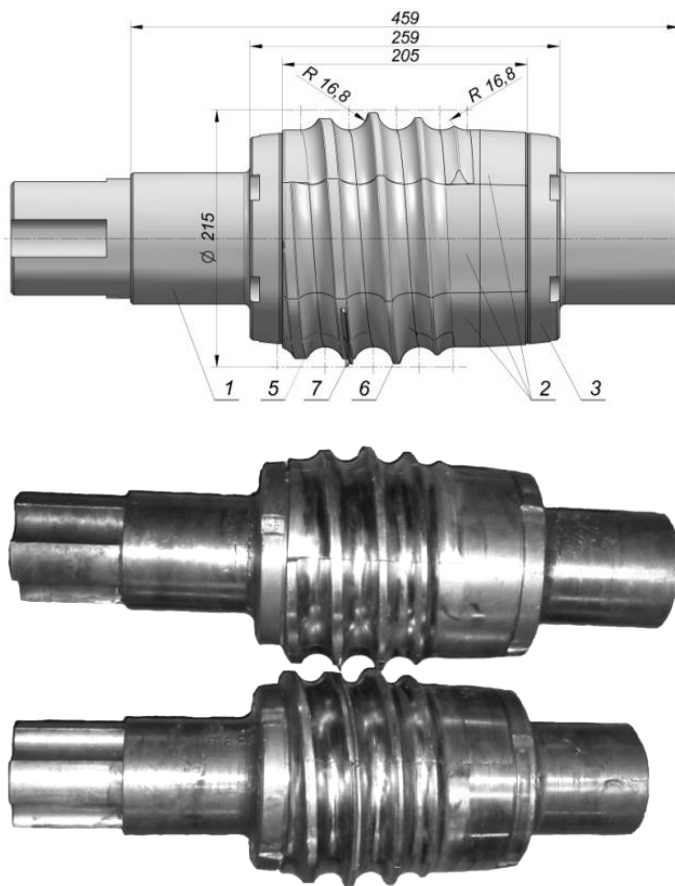
2. Analiza stanu zagadnienia

- średnica walca roboczego max. 220 mm,
- długość beczki walca roboczego 260 mm,
- średnica prowadnicy tarczowej max. 280 mm,
- prędkość obrotowa walca max. $0 \div 84$ obr/min,

oraz parametrach siłowych:

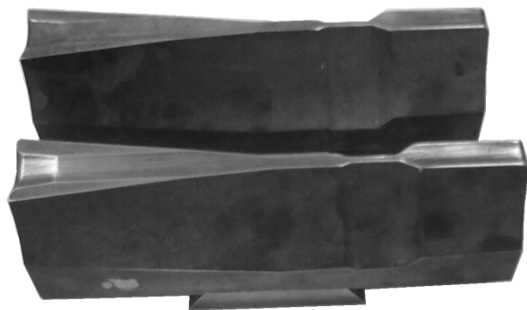
- siła nacisku na czop walca max. 240 kN,
- siła nacisku na narzędzie górne max. 160 kN,
- siła nacisku na główkę dziurującą max. 160 kN,
- moment obrotowy na łączniku max. 8 kNm.

Walce do kształtowania kul miały budowę segmentową. Wykroje każdego z walców tworzone były przez sześć segmentów narzędziowych, wykonanych ze stali do pracy na gorąco w gatunku WNL, mocowanych do wału walcarki za pomocą dwóch czołowych nakrętek (rys. 2.22). Moment obrotowy z wałów na segmenty robocze przenoszony był za pomocą połączeń wpustowych.



Rys. 2.22. Zestawy śrubowych segmentów narzędziowych do walcowania kul $S\varnothing 33$, zamocowane na wałach walcarki: 1 - wał, 2 - segment narzędziowy, 3 - nakrętka czołowa, 5 - bruzda, 6 - kołnier, 7 - nóż odcinający

Na kolejnym rys. 2.23 przedstawiono prowadnice, utrzymujące półwyrob w strefie kształtowania, w trakcie walcowania. Mocowane były one do korpusu walcarki za pomocą połączenia kształtowego na jaskółczy ogon. Prowadnice zostały wyfrezowane z główki zużytej szyny kolejowej. Sposób zabudowania narzędzi (walców skręconych o kąt 3° i prowadnic) pokazano w widoku (od strony wyprowadzania półwyrobów kul) na rys. 2.24.



Rys. 2.23. Prowadnice liniowe, wykorzystane w procesie walcowania śrubowego kul $S\varnothing 33$ mm



Rys. 2.24. Komplet narzędzi (walców i listew prowadzących) zabudowanych w walcarce i wykorzystanych w procesie walcowania śrubowego kul (widok od strony odbioru półwyrobów)

Wsady do walcowania stanowiły pręty cylindryczne (ze stali w gatunku C45 i 100Cr6) o średnicy $\varnothing 33$ mm i różnej długości, przygotowane toczeniem. Celem ułatwienia inicjacji procesu walcowania z jednej strony pręty te miały zakończenie stożkowe.

Wsady nagrzewane były w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania 1150°C . Następnie wprowadzane były za pomocą kleszczy do podajnika rurowego pozycjonującego wsad w przestrzeni roboczej walcarki. Wsad chwycony przez części stożkowe walców wciągany był samoczynnie między walce, a ukształtowane kule odprowadzane były z drugiej strony walcarki przez prowadnicę rurową (rys. 2.25). W trakcie procesu walce obracały się w tym samym kierunku ze stałą prędkością $n_w = 60$ obr/min, a ich osie skręcono pod kątem $\theta = 3^\circ$ w stosunku do osi walcowania (wsadu).



Rys. 2.25. Półwyroby kul $S\varnothing 33$ mm otrzymane w procesie walcowania śrubowego, odbierane przez prowadnicę rurową

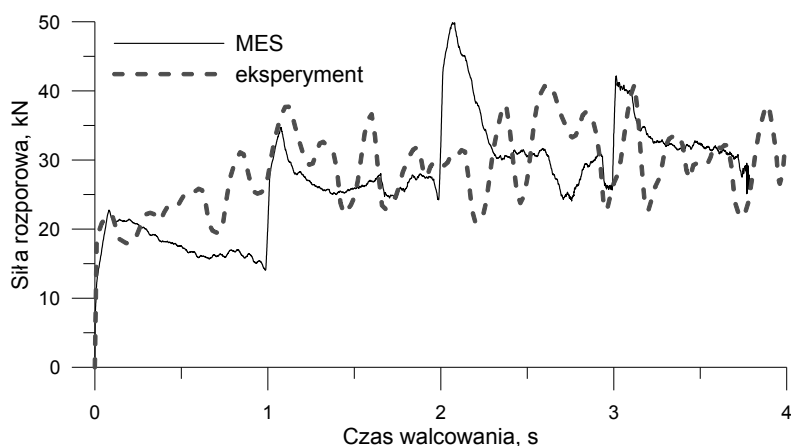


Rys. 2.26. Półwyroby kul $S\varnothing 33$ mm odwalcowane w walcach śrubowych połączone mostkami

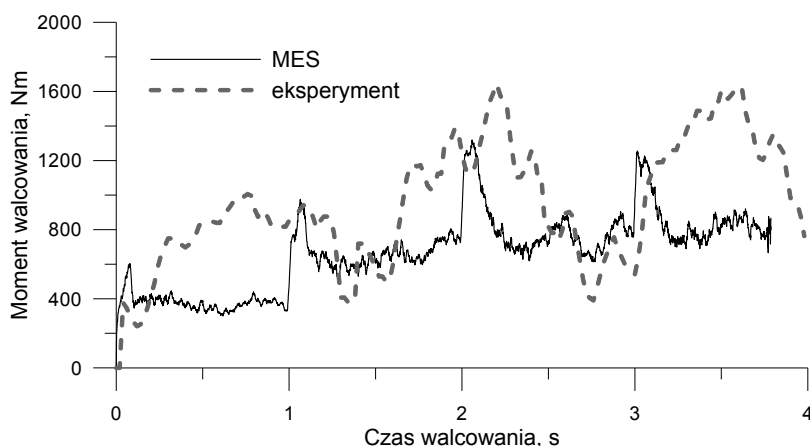
W rezultacie prowadzonych prób odwalcowano kilka zestawów kul, których przykładowy kształt pokazano na rysunku 2.26. Cechą charakterystyczną kul ukształtowanych w wykrojach śrubowych było niecałkowite rozdzielanie półfabrykatów. Kule były połączone ze sobą łącznikami (mostkami), jedynie nadciętymi z dwóch stron przy powierzchni kul, które jednak dawały się w łatwy sposób oddzielić od siebie. Zauważono również deformację kształtu wyrobów, przejawiającą się brakiem dokładnego zarysu kołowego w płaszczyźnie osiowej (kule były spłaszczone od strony łączników). Zaobserwowane deformacje oraz niecałkowite rozdzielanie kul mogą być związane z trudnościami w prawidłowym zabudowaniu i ustawieniu narzędzi w walcierce. Walce powinny być tak zabudowane w przestrzeni roboczej maszyny, aby punkt przecięcia zukosowanych osi segmentów z osią wsadu znajdował się w środku wykroju wykańczającego (w obszarze noży rozcinających). Jednak ze względów konstrukcyjnych walcarki warunek ten nie był spełniony, a osie narzędzi przecinały się z osią walcowania w strefie kształtowania (drugi zwój wykroju śrubowego). W efekcie takiego ustawienia walców, zwiększała się wartość szczeliny między nożami rozcinającymi, znajdującymi się na przedostatnich kołnierzach wykroju, które nie oddzielały całkowicie kul, a jedynie nadcinały szypki łączące. Jednakże można stwierdzić, iż po dopracowaniu rozcinania kul narzędzia te z powodzeniem będą mogły być wykorzystane w młynach kulowych (gdzie nie wymaga się wysokiej jakości wykonania).

W trakcie symulacji numerycznej oraz praktycznej realizacji procesu walcowania skośnego kul rejestrowano parametry siłowe. Wyznaczone podczas badań rozkłady siły roz-

porowej (rozpychającej walce) pokazano na rysunku 2.27, zaś rozkłady momentu walcowania na rysunku 2.28. Cechą charakterystyczną pokazanych przebiegów jest duża zbieżność wyników uzyskanych w trakcie obliczeń numerycznych i prób laboratoryjnych. Zgodnie z oczekiwaniami rozkłady sił i momentów mają charakter cykliczny. W początkowym etapie walcowania śrubowe występy narzędzi zagłębiają się w materiał, w wyniku czego obserwuje się szybki wzrost siły i momentu. Następnie widoczny jest niewielki spadek parametrów siłowych związany z kształtowaniem oddzielonej części materiału w wykroju śrubowym. Po wykonaniu przez narzędzia pełnego obrotu obserwuje się kolejny wzrost siły i momentu. Jest on efektem ponownego wcinania się we wsad początkowych kołnierzy wykroju śrubowego, które oddzielają od półfabrykatu objętość materiału równą objętości kuli i łącznika. Następnie materiał w dalszej części wykroju śrubowego kształtowany jest w kulę, czemu odpowiada malejąca wartość siły i momen-



Rys. 2.27. Rozkład siły rozporowej wyznaczony w procesie kształtowania półwyrobów kul $S\varnothing 33$ mm w wykrojach śrubowych

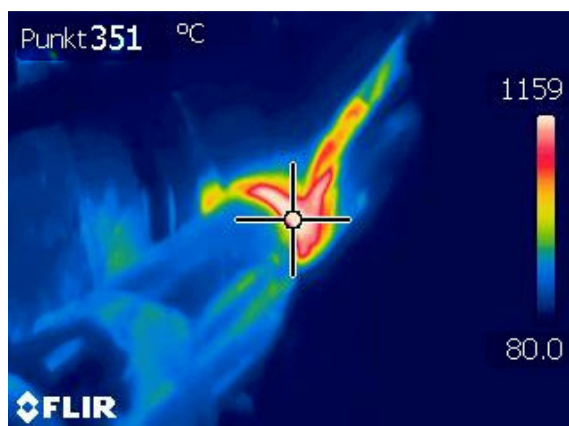


Rys. 2.28. Rozkład momentu walcowania wyznaczony w procesie kształtowania półwyrobów kul $S\varnothing 33$ mm w wykrojach śrubowych

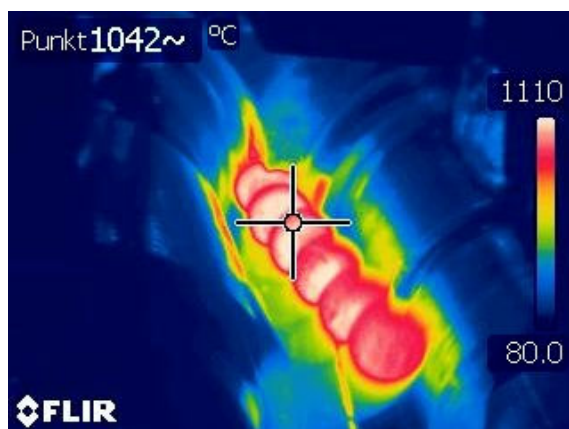
tu. Okresowe wcinanie się kołnierzy w półfabrykat powoduje cykliczny wzrost sił i momentów, co jeden pełny obrót narzędzi. Rozkład siły i momentu w ustalonej fazie walcowania (gdy materiał wypełnia wszystkie wykroje utworzone przez narzędzia) jest powtarzalny i nie zwiększa się istotnie. Maksymalna siła w tym etapie waha się w granicach 40 kN, natomiast moment maksymalny nie przekracza wartości 1200 Nm.

Pomimo dość długiego czasu walcowania (wynoszącego czasami nawet kilkadziesiąt sekund) materiał w trakcie kształtowania praktycznie nie ulegał wychłodzeniu. Było to efektem rekompensowania strat cieplnych (wynikających z odprowadzenia ciepła do narzędzi) przez ciepło generowane w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. Zasadność takiego przypuszczenia potwierdza rejestracja temperatury wsadu (rys. 2.29) i odwalcowanych półwyrobów kul (rys. 2.30), dokonana za pomocą kamery termowizyjnej.

Rys. 2.29. Pomiar temperatury wsadu wprowadzanego do przestrzeni roboczej walcarki za pośrednictwem podajnika rurowego



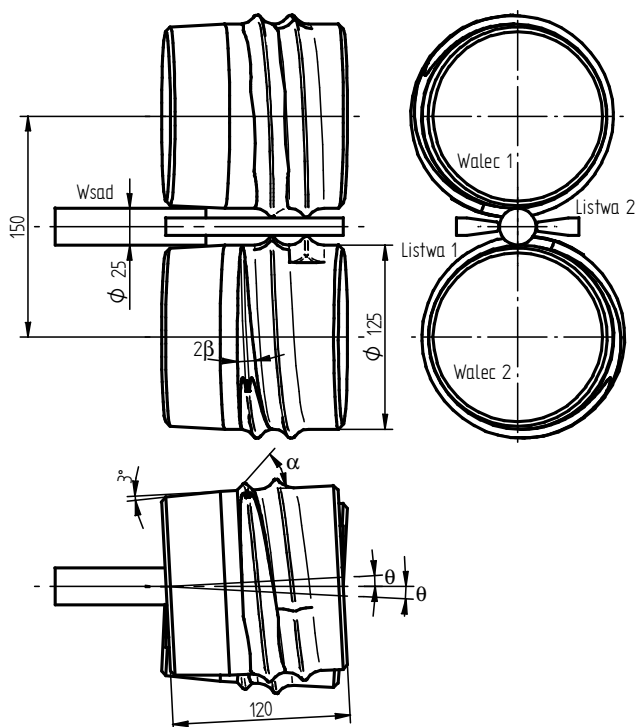
Rys. 2.30. Pomiar temperatury półwyrobów kul $S\varnothing 33$ mm odwalcowanych w walcach śrubowych, widok od strony odbioru



3. Walcowanie śrubowo-klinowe

Walcowanie śrubowo-klinowe (WŚK) stanowi kompromis między znanymi i stosowanymi procesami walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) i walcowania śrubowego. Narzędzia wykorzystywane w tym procesie wykonywane są przez nawinięcie śrubowe na wałek klinów [39].

Schemat procesu WŚK przedstawiono na rys. 3.1. Może on być wykonany w układzie walców poziomych (sytuacja z rys. 3.1), jak i pionowych. Walce śrubowe ustawione są skośnie (pod kątem θ) do osi wsadu. Kąt zukosowania θ powinien być tak dobrany, by składowa prędkości osiowej walców była równa prędkości osiowego przemieszczania pierwszego zwoju walca. Oczywiście kierunek obrotów walców (poruszających się w tym samym kierunku) musi być tak dobrany, by narzędzia te wciągały materiał w przestrzeń międzywalcową.



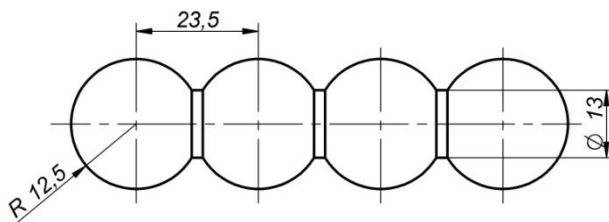
Rys. 3.1. Schemat procesu walcowania śrubowo-klinowego (WŚK)

Walce zbudowane są z dwóch zasadniczych części: wejściowej (stożkowej) i kształtującej (cylindrycznej), w której na beczce walca nawinięte są kliny służące do

walcowania półwyrobów kul połączonych mostkami (sytuacja jak na rys. 3.1) lub rozdzielanych (po wyposażeniu walców w dodatkowy zwój do rozcinania). Zadaniem części wejściowej jest skalibrowanie średnicy materiału wsadowego. Jest to niezwykle istotne w przypadku walcowania prowadzonego z wsadu wykonanego z dużymi odchyłkami. Dodatkowe dwa narzędzia wykorzystywane w procesie WŚK stanowią prowadnice liniowe, których zadaniem jest utrzymanie wsadu i wytwarzanych kul we właściwej pozycji w czasie walcowania. Kształt oraz sposób wykonania prowadnic jest identyczny jak w dotychczas znanych metodach walcowania śrubowego kul.

3.1. Projektowanie walców

Analizę procesu walcowania śrubowego kul wykonano na przykładzie kształtowania półwyrobów S $\varnothing$ 25, połączonych ze sobą mostkiem o średnicy $\varnothing$ 13 mm - rys. 3.2.

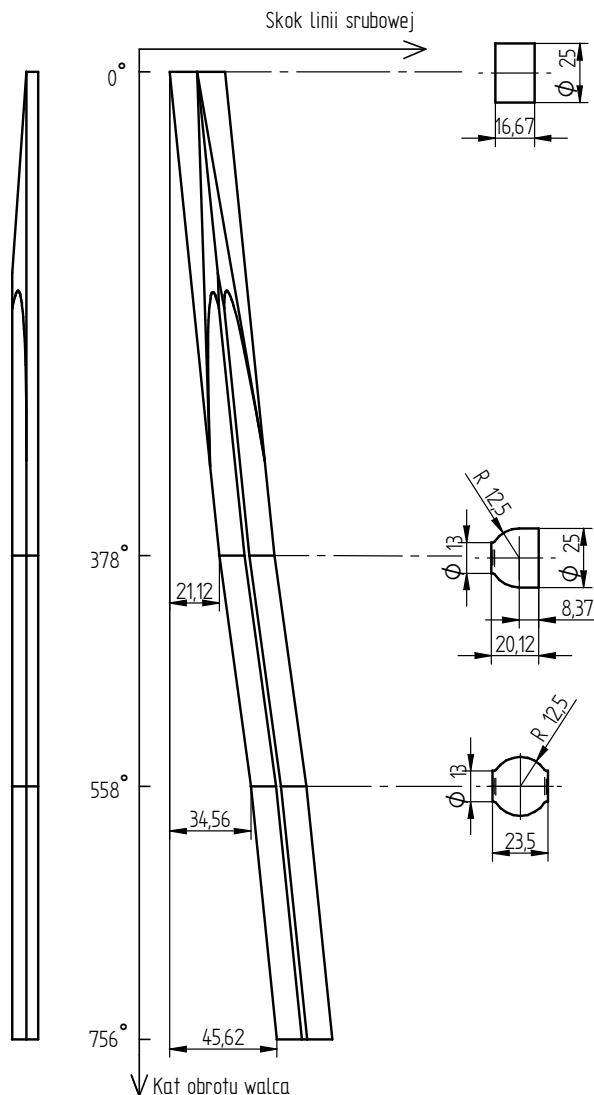


Rys. 3.2. Kształt półwyrobu założony do uzyskania w procesie walcowania śrubowego klinami (częścią kształtującą klinów)

Najważniejszym zadaniem podczas kalibrowania walców jest dobranie kątów klina (kształtującego α oraz rozwarcia β) oraz skoku linii śrubowej - rys. 3.1. W celu ustalenia skoku linii śrubowej klina wykonano schemat pomocniczy, przedstawiający w rozwinięciu jeden z zaprojektowanych klinów, który pokazano na rys. 3.3. Na osi odciętej zaznaczono kąt obrotu walca, a na osi rzędnej określany skok linii śrubowej. Klin zaprojektowany został w ten sposób, by jego wcięcie w materiał na maksymalną głębokość nastąpiło już w czasie pierwszego obrotu walca. Podany schemat nie uwzględnia zmian wymiarów kuli wynikających z rozszerzenia cieplnego materiału (w efekcie którego podane wymiary należy zwiększyć o 1,5%).

W rozważanych przypadkach walcowania założono, że kształtowanie kul przebiegać będzie metodą redukcji, tj. z wsadu o średnicy równej średnicy kul. Zatem długość wsadu przypadającego na wytworzenie jednej kuli wyniesie 16,67 mm. W efekcie wcięcia klina (w czasie pierwszego obrotu walca) nastąpi wydłużenie odkuwki, której długość wyniesie 20,12 mm. Taki zatem powinien być skok klina w trakcie jego pierwszego obrotu.

Podczas drugiego obrotu walca ukształtowane pierwsze przewężenie pozostaje bez zmian. Jednocześnie klin ponownie wcina się w materiał, rozpoczynając kształtowanie kuli drugiej. Materiał przemieszczany jest wtedy na obie strony klina, co doprowadza do zwiększenia długości półwyrobu do wartości ostatecznej wynoszącej 23,5 mm. Ta zmiana długości musi być uwzględniona w wielkości skoku zwoju drugiego, który musi się odsunąć od zwoju pierwszego na wymaganą odległość.



Rys. 3.3. Schemat ilustrujący sposób określania skoku linii śrubowej klina, wykorzystywanego do walcowania kul $S\phi 25$ mm

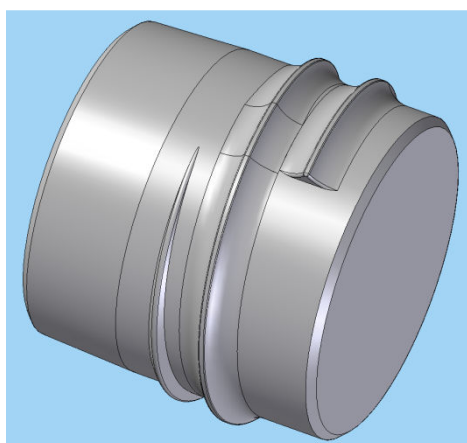
Ostatnie pół zwoju klina odpowiada za kalibrowanie, w trakcie którego usuwana jest owalizacja kuli. Nie ma tutaj wydłużenia półwyrobu i skok linii śrubowej jest zmniejszony do wartości, jaka była stosowana dla zwoju pierwszego.

Wymiary walca są zależne od wartości kątów klina α i β . Bazując na znajomości procesów WPK do kształtowania półwyrobu pokazanego na rys. 3.2 postanowiono zastosować narzędzia charakteryzowane przez kąty, których wartości podano w tabeli 3.1. Jak widać z danych zamieszczonych w tabeli iloczyn tangensów kątów α i β przyjmuje wartości bliskie stosowanym w typowych procesach WPK, gdzie $0,04 \leq \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \leq 0,08$.

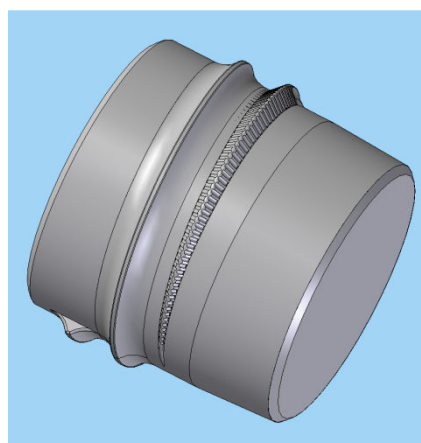
Tab. 3.1. Proponowane do stosowania w procesie walcowania śrubowego klinami zestawy kątów kształtującego α i rozwarcia klina β

Lp.	Kąt kształtujący α	Kąt rozwarcia klina β	$\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta$
1	2°	30°	0,0202
2	2°	45°	0,0349
3	2°	60°	0,0605
4	3°	30°	0,0302
5	3°	45°	0,0524
6	3°	60°	0,0907
7	4°	30°	0,0404
8	4°	45°	0,0699
9	4°	60°	0,1211

Postępując zgodnie z opracowaną metodyką postępowania, opracowano dziewięć walców z klinami nawiniętymi śrubowo, charakteryzowanych przez kąty α i β wyszczególnione w tabeli 3.1. Modele przestrzenne narzędzi wykonano w programie CAD SolidEdge, z którego mogą one być wyeksportowane do programu MES. Jeden z takich modeli pokazano na rys. 3.4. Krawędź robocza klina została zaokrąglona promieniem R1,5 mm, a krawędzie łączące powierzchnie kształtujące z kalibrującą promieniem R0,5 mm.



Rys. 3.4. Model walca z klinem nawiniętym śrubowo, wykonany w programie Solid Edge



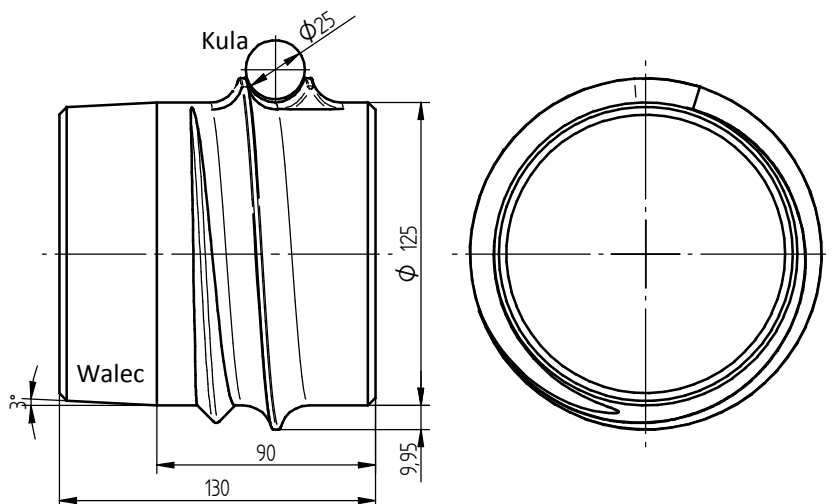
Rys. 3.5. Powierzchnia boczna klina ponacinana celem zwiększenia tarcia między narzędziem a materiałem kształtowanym

W przypadku wystąpienia w trakcie walcowania niekontrolowanego poślizgu można boczne powierzchnie klina ponacinać tak, jak się to czyni w typowych procesach WPK. Głębokość nacięć powinna wynosić od 0,3 do 0,5 mm i powinny być one rozmieszczone w odległości od 3 do 5 mm. Przykład klina z wykonanymi nacięciami pokazano na rys. 3.5.

Zgodnie z danymi literaturowymi [19] w procesie walcowania śrubowego promień r_m mostka łączącego kule (przed procesem rozdzielenia) powinien wynosić:

$$r_m = 0,19 r_k + 0,34 \text{ mm} \quad (3.1)$$

gdzie: r_k - promień kuli. Oznacza to, że w analizowanym przypadku (walcowanie kul o średnicy 25 mm) średnica łącznika powinna wynosić $\varnothing 5,1$ mm. Postanowiono więc zaprojektować również narzędzie, które umożliwiałoby walcowanie kul w podanej sytuacji. Walec ten pokazano na rys. 3.6.

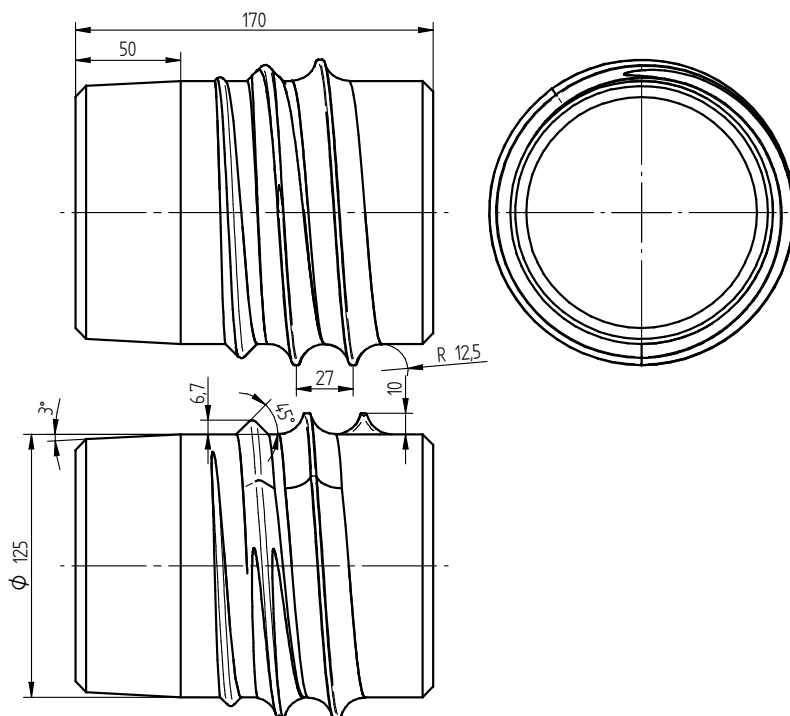


Rys. 3.6. Walec służący do walcowania kul $S\varnothing 25$ połączonych cylindrycznym mostkiem o średnicy $\varnothing 5,1$ mm

Kształtowanie kul narzędziem pokazanym na powyższym rysunku oznacza, że walcowanie realizowane będzie ze stopniem gniołu δ (rozumianym, jako stosunek średnic przed i po walcowaniu) dochodzącym do 5. Wartość taka jest bardzo trudna do uzyskania w procesie WPK (praktycznie występuje wyłącznie podczas cięcia). Wydaje się, że przy walcowaniu realizowanym za pomocą takiego walca nastąpi rozsuniecie materiału na boki. Można temu przeciwdziałać unieruchamiając kule w położeniu osiowym, co osiąga się przez wydłużenie strefy kształtowania (z jednego do dwóch zwojów klina). Wówczas kula unieruchomiona jest między sąsiednimi zwojami i nie powinno mieć miejsce przewężenie materiału w obszarze kształtowanego mostka. Walec zabezpieczający proces walcowania kul wg takiej koncepcji pokazano na kolejnym rys. 3.7.

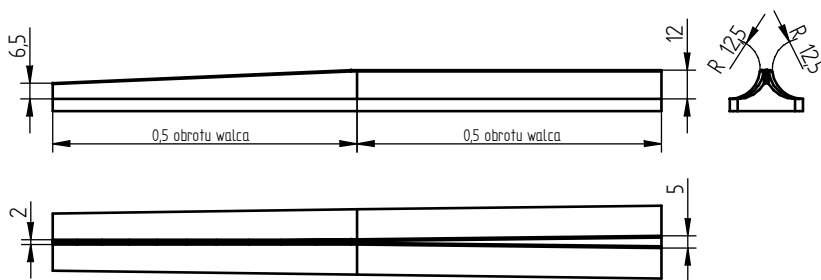
W procesie WSK narzędziami z rys. 3.7 wykorzystuje się znany z procesu WPK sposób zwiększania redukcji przekroju poprzecznego w następstwie kilku przejść narzędzi roboczych. Najpierw na długości pierwszego zwoju walcowane jest przewężenie o średnicy $\varnothing 11,5$ mm, a następnie na długości drugiego uzwojenia kształtowana jest kula połączona mostkiem o średnicy $\varnothing 5$ mm.

W ramach prac badawczych przygotowano również modele geometryczne narzędzi umożliwiające walcowanie kul $S\varnothing 25$ mm połączonych łącznikami o średnicy pośredniej, między uwzględnianymi wcześniej wartościami, która wynosiła: 10, 8 i 6 mm.



Rys. 3.7. Walec do kształtowania kul $S\varnothing 25$, z wydłużoną częścią kształtującą kule

Odcinanie ukształtowanych kul można przeprowadzić co najmniej dwiema metodami. Pierwszą z nich stanowi sposób zaadoptowany z technologii WPK, zaś drugą metodą wykorzystywaną w Rosji w procesie walcowania śrubowego kul.

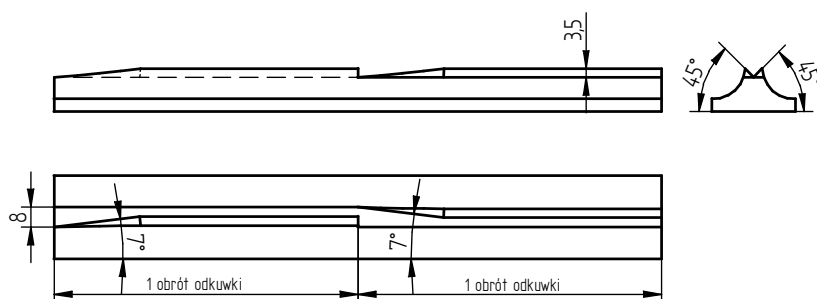


Rys. 3.8. Nóż do rozcinania kul (w rozwinięciu) kształtowanych klinami śrubowymi, skonstruowany na podstawie znajomości technologii WPK

W procesie WPK wyroby kształtowane w układzie podwójnym rozcinane są za pomocą klina o dwóch skośnych ściankach, zwykle nachylonych do pionu pod kątem $10\div 30^\circ$. Jednakże zastosowanie noży o takim kształcie w analizowanym procesie walcowania może prowadzić do deformowania powierzchni bocznych kul. Powinno się, zatem stosować noże o wklęsłych ściankach bocznych - zgodnie z rysunkiem 3.8, na którym po-

kazano nóż rozcinający w rozwinięciu. Jak widać z rysunku, początkowo (przy zachowaniu szerokości ostrza) zwiększa się wysokość noża, a następnie, gdy uzyska on wysokość maksymalną zwiększa się jego szerokość. W ten sposób ukształtowany w czasie rozcinania łącznik o niewielkiej średnicy ulega rozerwaniu. Nóż przedstawiony na rys. 3.8 należy dodać do walca śrubowego, jako kolejne uzwojenie. Należy przy tym pamiętać o zmianie skoku linii śrubowej, gdyż materiał znajdujący się w łączniku jest przemieszczany po równo na obie strony noża.

Druga koncepcja rozcinania, bazująca na rozwiązaniu rosyjskim, wymaga ukształtowania kul połączonych łącznikiem o znacznej długości. W ramach bieżącej analizy przyjęto, że średnica łącznika wynosi $\varnothing 8$ mm przy długości równej 10 mm. Rozcięcie kul następuje w dwóch etapach. Najpierw nadcinany jest łącznik od strony jednej kuli, a następnie od drugiej. Nóż zabezpieczający odcinanie wg tej metody pokazany został w rozwinięciu na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Nóż do rozcinania kul (w rozwinięciu) kształtowanych klinami śrubowymi, skonstruowany na podstawie wytycznych podawanych w literaturze rosyjskojęzycznej

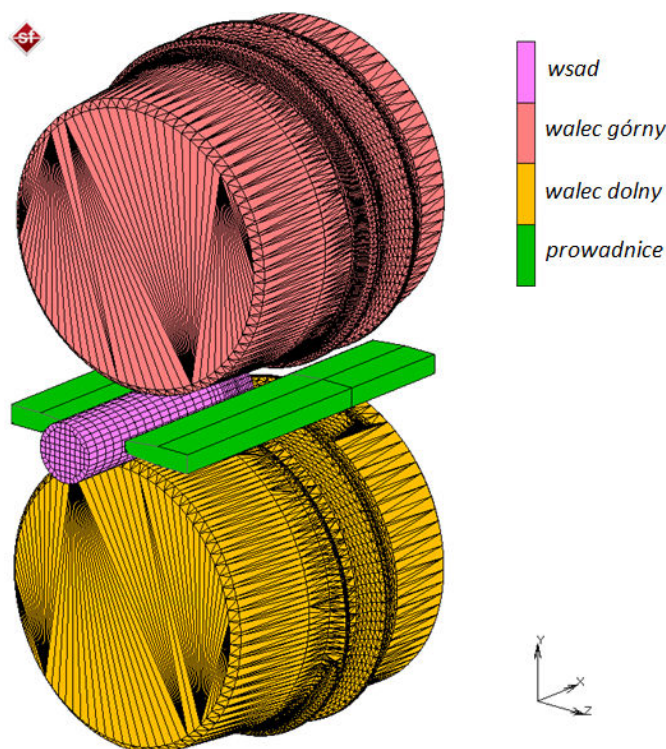
3.2. Analiza numeryczna

W symulacjach numerycznych procesu WSK wykorzystano program Simufact, który powstał na bazie oprogramowania MES.SuperForm i stanowi obecnie jego rozszerzoną wersję. Program MSC.SuperForm był w przeszłości z sukcesem stosowany do modelowania procesów walcowania skośnego tulei grubościennych [15, 35, 36] oraz walcowania poprzecznego [1, 2, 23, 25, 26, 30, 31, 33 37, 56]. Uznano zatem za celowe wykorzystanie tego oprogramowania do zamodelowania procesu WSK.

Na rys. 3.10 pokazano model geometryczny procesu walcowania skośnego kul $\varnothing 25$ mm, przygotowany w programie Simufact. Walce śrubowe modelowano w programie CAD Solid Edge i wczytywano do programu MES. Natomiast listwy prowadzące i wsad modelowane były bezpośrednio w programie Simufact. Narzędzia traktowane jako ciała doskonale sztywne opisywane były za pomocą elementów powierzchniowych (trójkątów i czworokątów). Materiał kształtowany (wsad) modelowany był 8-węzłowymi elementami prostopadłościennymi, które zagęszczano w strefie kształtowania celem zwiększenia dokładności obliczeń. Model materiału kształtowanego (stali w gatunku 100Cr6) zaczerpnięto z biblioteki zastosowanego oprogramowania.

W obliczeniach założono, że: walce obracają się z prędkością obrotową 60 obr/min; wszystkie narzędzia mają jednakową i stałą temperaturę równą 150°C; czynnik tarcia

na powierzchni kontaktu materiał-narzędzie ma wartość graniczną równą 1; współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami wynosi $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Przyjęto, że symulowane będzie kształtowanie, w trakcie którego walce wykonają co najmniej 3 obroty, co jest wystarczające do opuszczenia przez materiał przestrzeni międzywalcowej. Każdy obrót walców modelowano w 1000 kroków, co przekładało się na dość długi czas obliczeń (wynoszący klika, a nawet kilkanaście dni).



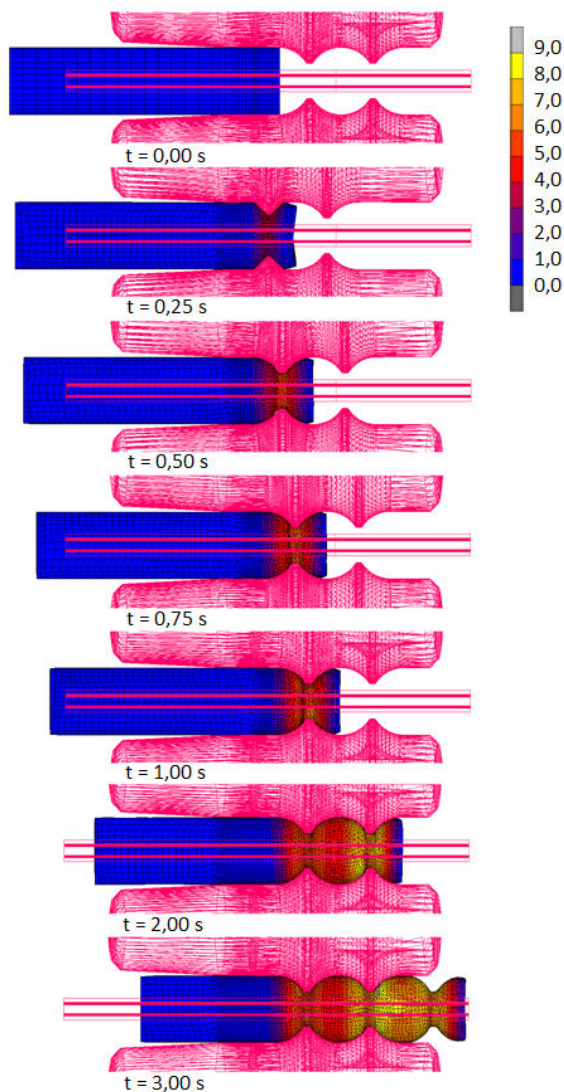
Rys. 3.10. Model geometryczny procesu walcowania skośnego kul $S\varnothing 25 \text{ mm}$ (widok izometryczny), opracowany w programie Simufact

Wykonane symulacje w pełni potwierdziły słuszność stosowania oprogramowania Simufact do modelowania procesów walcowania kul w walcarce śrubowej. Przykładowy przebieg takiego procesu pokazano na rys. 3.11. Widać wyraźnie, że przemieszczające się śrubowo występy walców wcinają się okresowo (co jeden obrót) we wsad i zamykają w wykroju materiał o objętości równej objętości kuli. Początkowo w materiale kształtowany jest pierścieniowy rowek klinowy (o ściankach płaskich), który następnie przekształcany jest w rowek o powierzchni wklęsłej (odpowiadającej czaszy kuli). W trakcie całego procesu kształtowania materiał przylega do powierzchni bocznych wykroju, co świadczy o prawidłowo dobranym kształcie walców śrubowych.

W czasie kształtowania zmienia się powierzchnia, na której narzędzia oddziałują na materiał. Jest ona największa w czasie pierwszej połowy obrotu walców, gdy kształtowany jest rowek klinowy. Wówczas materiał ulega intensywnemu płynięciu powodującemu wzrost owalizacji przekroju poprzecznego i szerokości powierzchni kontaktu materiał-narzędzie. W trakcie drugiej połowy obrotu owalizacja jest usuwana, przekroje poprzeczne uzyskują pożądany kształt kołowy, a styk walców z materiałem jest niemal liniowy. W efekcie kula S $\varnothing$ 25 mm otrzymywana jest w trakcie jednego obrotu walców.

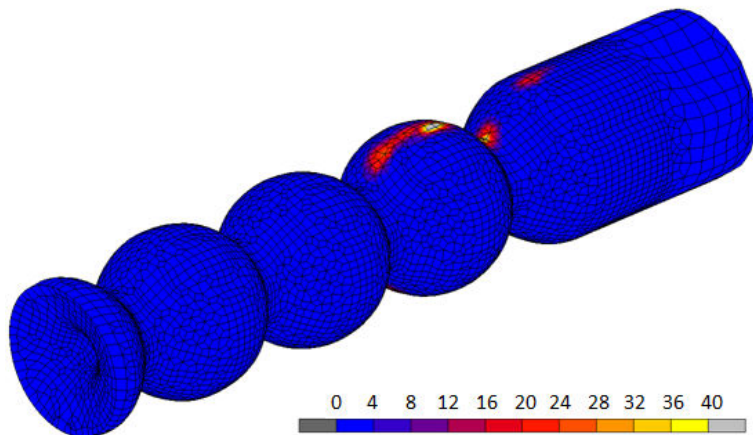
Powyższe spostrzeżenie potwierdza rozkład prędkości odkształcenia na powierzchni odkuwki, przedstawiony na rys. 3.12. Widać wyraźnie, że zmiany odkształcenia występują tylko na pierwszej kuli, która pod koniec obrotu walców podlega kalibrowaniu. Wartości prędkości odkształcenia są stosunkowo duże i świadczą o intensywnym płynięciu metalu w strefach przypowierzchniowych, wywołanych oddziaływaniem walców.

Na kolejnym rys. 3.13 przedstawiono przykładowy rozkład intensywności odkształcenia w jednym z odwalcowanych wyrobów. Widoczne jest, że materiał nie jest przerobiony na wskroś w sposób jednakowy. Najbardziej odkształcone są warstwy przypowierzchniowe, gdzie działają siły tarcia (wywołujące płynięcie obwodowe), a najmniej warstwy centralne (osiowe). Odkształcenia uzyskują charakterystyczny rozkład pierścieniowy, którego występowanie stwierdzono wielokrotnie w procesach walcowania poprzecznego. Na uwagę zasługuje także fakt, iż kule w przekroju poprzecznym uzyskują niemal idealny kształt kołowy.

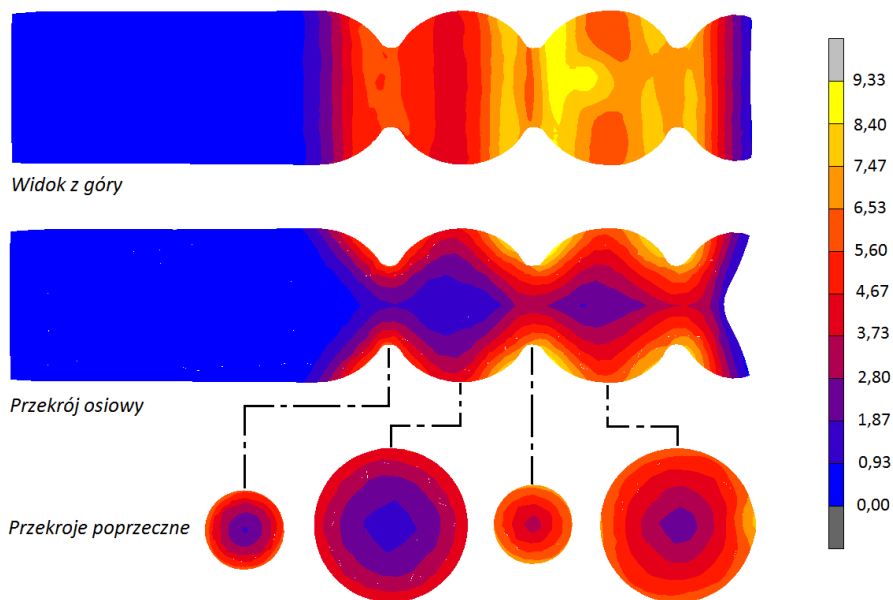


Rys. 3.11. Progresja kształtu półwyrobu (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia) w procesie WSK przy $\beta=3^\circ$ i $\alpha=45^\circ$

W dalszej części opracowania przedstawiono wyniki analizy teoretycznej mającej na celu określenie wpływu głównych parametrów procesu, tj. kątów α i β oraz redukcji przekroju poprzecznego R_p na przebieg procesu WŚK.



Rys. 3.12. Rozkład prędkości odkształcenia (w 1/s) na powierzchni półwyrobu w procesie WŚK przy $\beta=2^\circ$, $\alpha=30^\circ$ oraz $t=4$ s

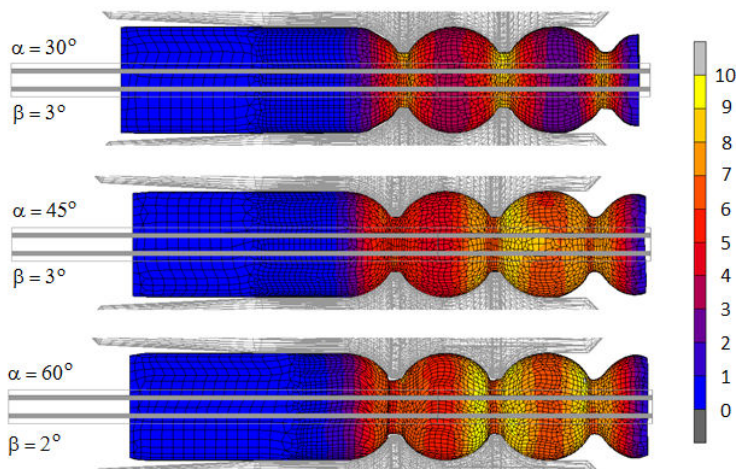


Rys. 3.13. Rozkład intensywności odkształcenia w wyrobie walcowanym przy $\beta=3^\circ$ i $\alpha=45^\circ$

3.2.1. Wpływ kątów kształtującego α i rozwarcia klina β na przebieg WŚK kul

W ramach analizy wpływu kątów α i β (oznaczenia zgodnie z rys. 3.1) rozważano dziewięć przypadków walcowania, w których kule $S\emptyset 25$ mm połączone były łącznikami

o średnicy $\varnothing 13$ mm. Rozważano przy tym zastosowanie narzędzi o kątach α w zakresie $30^\circ \div 60^\circ$ oraz β równych $2^\circ \div 4^\circ$. Poniżej pokrótce scharakteryzowano uzyskane wyniki.



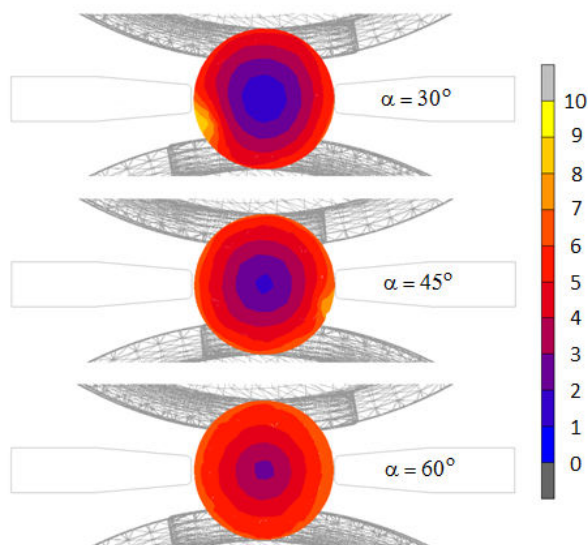
Rys. 3.14. Zarys odkuwki (w widoku z boku) kształtowanych w procesie WŚK, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, przy czasie $t=3$ s

Analizując kształt półwyrobów otrzymanych w poszczególnych procesach stwierdzono, że stosowanie narzędzi z małymi kątami kształtującymi $\alpha=30^\circ$ powoduje, że materiał, który nie jest jeszcze zamknięty w wykroju, nie przylega do powierzchni bocznej klina. Jest to dobrze widoczne na rys. 3.14 (dla $\alpha = 30^\circ$), gdzie widać brak kontaktu powierzchni ze ścianką boczną przewężenia (od strony wejściowej). Co prawda mankament ten nie prowadzi do błędów kształtu kuli, które w następnych wykrojach mają już właściwą geometrię, ale zmniejsza powierzchnię, na której działają siły tarcia wywołujące ruch obrotowy półwyrobu. W przypadku, gdy do walcowania stosuje się kliny o dużych kątach kształtujących ($\alpha=60^\circ$) w obszarze ukształtowanego przewężenia występują niewielkie podcięcia bocznej powierzchni kuli. Są one najbardziej widoczne w procesie, w którym zastosowano najmniejszy kąt rozwarcia klina $\beta=2^\circ$ (rys. 3.14). Wymienione niedoskonałości kształtu nie występują podczas walcowania narzędziami z kątami $\alpha=45^\circ$. Zatem tę wartość kąta α należy uznać za optymalną i rekomendować ją do stosowania praktycznego.

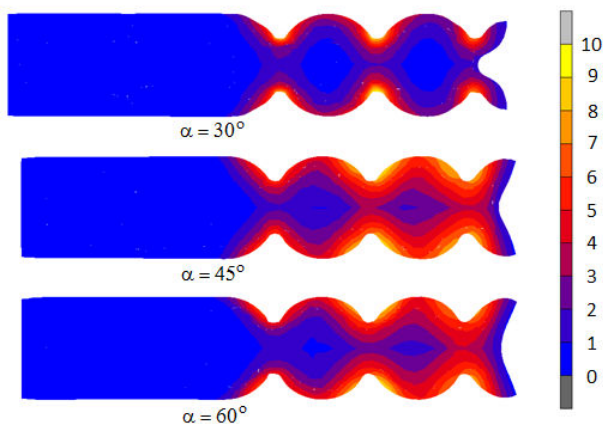
W celu określenia dokładności wykonania kul w ich przekroju poprzecznym (rys. 3.15) wykonano następujące działania. Wyznaczone z obliczeń MES przekroje wczytano do programu CAD, w którym wpisywano w nie okrąg o średnicy 25 mm (po uwzględnieniu skali). Następnie analizowano odchylenia kształtu przekroju od pożądanego zarysu. Stwierdzono, że odchylenia te nie przekraczają 0,2 mm i są nieistotne z praktycznego punktu widzenia. Kule nie wykazują owalizacji, co jest konsekwencją skośnego położenia walców względem osi odkuwki. W efekcie tego wzrasta odległość między narzędziami a osią odkuwki (w końcowej fazie walcowania), co sprzyja skutecznemu usunięciu owalizacji.

W procesie WŚK kul materiał jest odkształcany w sposób właściwy dla walcowania poprzecznego. Występują tutaj intensywne odkształcenia postaciowe (będące efektem płynięcia w kierunku obwodowym), które są największe przy powierzchni, a najmniejsze

w obszarach osiowych. Prowadzi to do charakterystycznego warstwowego (w formie pierścieni) rozkładu odkształceń, pokazanego chociażby na rys. 3.11. Oczywiście wartość odkształceń zależy także od redukcji przekroju poprzecznego, która jest największa w obszarze kształtowanego przewężenia i tamże lokalizowane są maksymalne wartości intensywności odkształcenia.



Rys. 3.15. Przekroje poprzeczne kul otrzymanych po trzech obrotach walców śrubowych, przy $\beta=2^\circ$



Rys. 3.16. Rozkład intensywności odkształcenia w przekrojach wzdłużnych półwyrobów otrzymanych po trzech obrotach walców, przy stałym kącie rozwarcia klina $\beta=3^\circ$

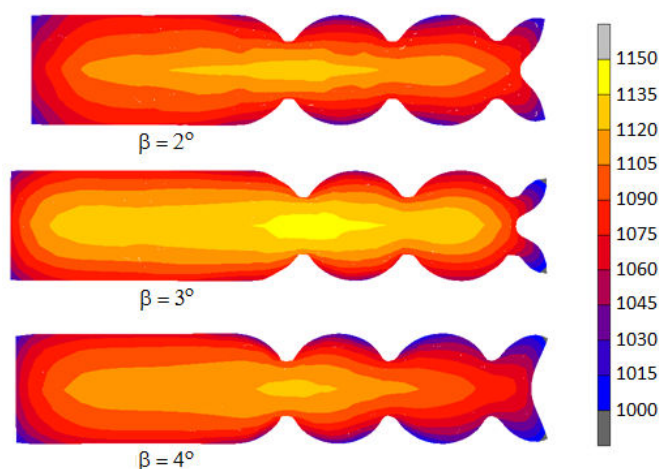
Odnośnie wpływu kątów α (rys. 3.16) i β na rozkład intensywności odkształcenia można podać, że zmniejszenie kąta rozwarcia klina β prowadzi do wzrostu intensywności odkształcenia. Jest to oczywiste, gdyż przy mniejszym β wydłuża się czas, w którym kliny wcinają się w materiał, co skutkuje zwiększeniem ilości cykli odkształcenia. W efek-

cie wzrasta płynięcie metalu w kierunku obwodowym, powodujące zwiększenie odkształceń postaciowych. Natomiast wpływ kąta kształtującego α na rozkład intensywności odkształcenia nie jest już tak jednoznaczny. Przy tym najlepsze rezultaty pod względem odkształcenia na wskroś materiału daje stosowanie w trakcie procesu WSK kul narzędziami o kątach kształtujących $\alpha = 45^\circ$.

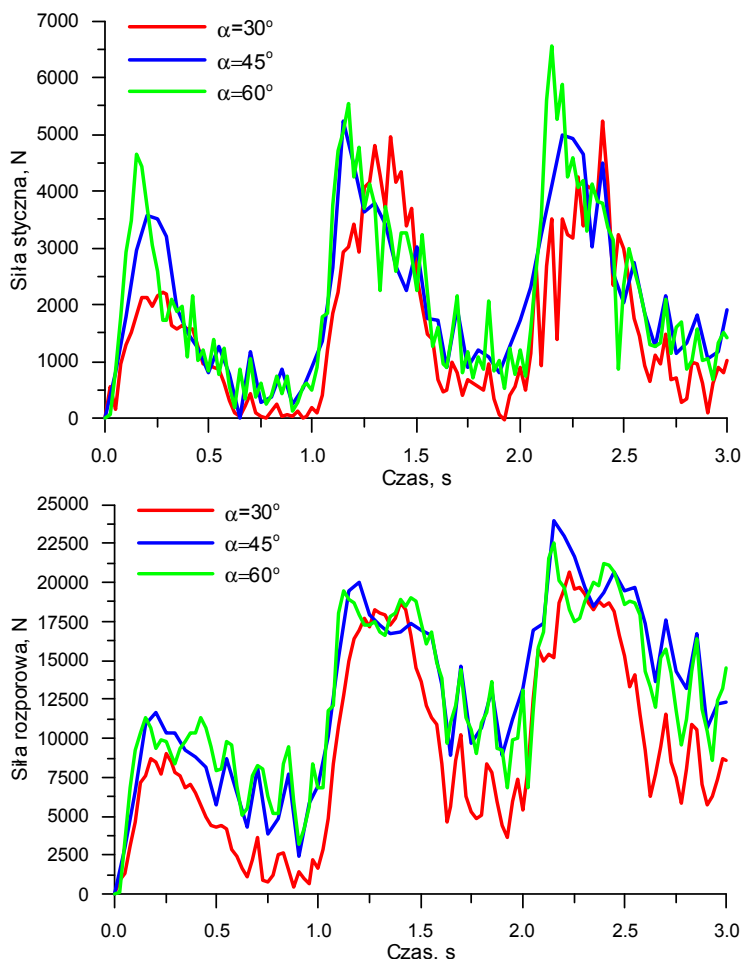
W trakcie walcowania gorący materiał kontaktuje się z chłodnymi narzędziami oddając im ciepło. W efekcie warstwy materiału przy powierzchni kontaktu mają temperaturę mniejszą niż warstwy środkowe (osiowe) - rys. 3.17. Straty ciepła odprowadzonego (w drodze wymiany) do narzędzi są częściowo rekompensowane przez zamianę na ciepło pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. Spowalnia to spadek temperatury kształtowanego materiału, która pomimo znaczącego czasu kształtowania utrzymuje się w zakresie właściwym dla obróbki plastycznej na gorąco stali 100Cr6. Zauważono także, że zmniejszenie kątów α i β sprzyja zwiększeniu temperatury materiału (w granicach 20°C).

Korzystając z MES można również wyznaczyć siły i momenty działające na walce śrubowe. Cykliczny charakter walcowania znajduje swoje odzwierciedlenie w uzyskanych rozkładach sił walcowania pokazanych na rys. 3.18 i 3.19. Rozkłady te odnoszą się do siły stycznej, decydującej o mocy walcarki oraz siły rozporowej, mającej wpływ na dokładność walcowania.

W czasie walcowania skośnego kul obie składowe siły walcowania ulegają wahaniom, w ten sposób, że zwiększają swą wartość w początkowej fazie każdego obrotu, by następnie ulec zmniejszeniu. Przy czym w przypadku siły stycznej spadek wartości siły jest niemal całkowity (siła prawie zanika), co oznacza, że likwidacji ulegają opory ruchu tocznego walcowanej odkuwki. Natomiast siła rozporowa nie zmniejsza się tak radykalnie, gdyż także w trakcie kalibrowania występuje liniowy kontakt materiału z narzędziami, skutkujący powstawaniem siły rozporowej. Należy tutaj zauważyć, że siły styczne są około 4x mniejsze od sił rozporowych. Taka relacja wartości sił jest typowa dla procesów walcowania poprzecznego.



Rys. 3.17. Rozkład temperatury (w $^\circ\text{C}$) w przekrojach wzdłużnych półwyrobów otrzymanych po trzech obrotach walców, przy stałym kącie kształtującym $\alpha=30^\circ$



Rys. 3.18. Rozkłady sił stycznej i rozporowej, działających na wałek w procesach walcowania śrubowego przy stałym kącie rozwarcia klina $\beta=3^\circ$

Analizując wpływ kątów α i β na rozkłady sił można stwierdzić, że zwiększenie kąta kształtującego α oraz zwiększenie kąta rozwarcia klina β skutkuje wzrostem sił kształtowania. Wydaje się zatem, że ze względów siłowych dobrze jest prowadzić procesy walcowania skośnego kul korzystając z narzędzi o kątach $\beta=2^\circ$.

3.2.2. Wpływ redukcji przekroju poprzecznego R_p na przebieg WSK kul

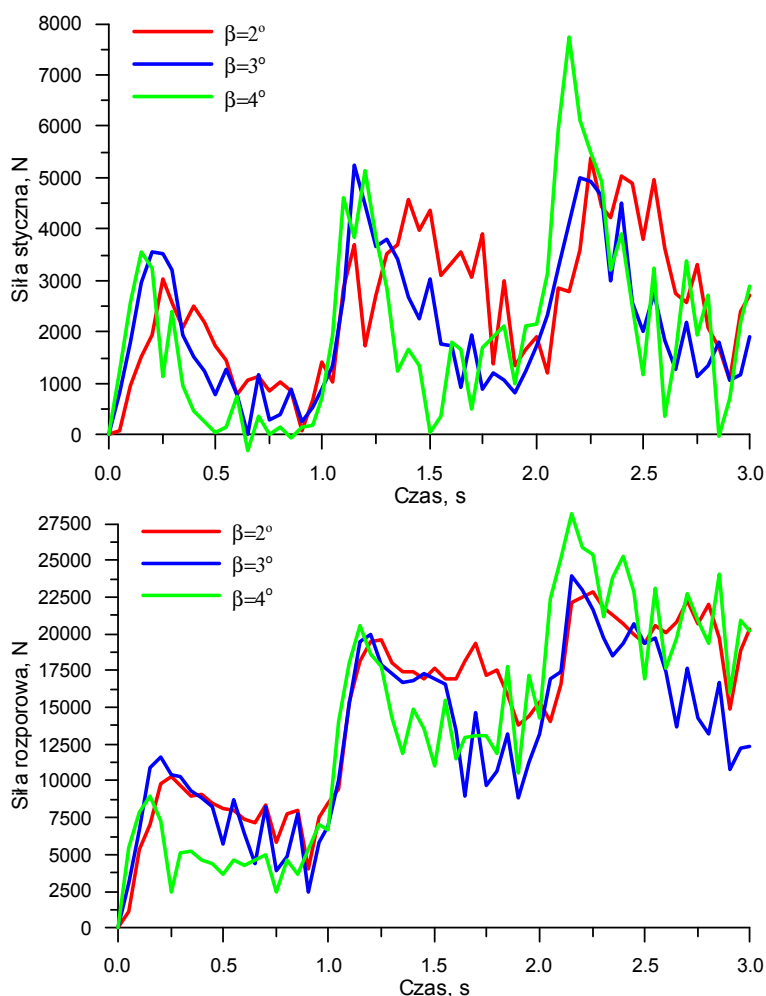
Ważnym zagadnieniem jest określenie możliwej do uzyskania, w czasie jednego obrotu wałków, redukcji przekroju poprzecznego w procesie walcowania skośnego. Redukcja ta określona jest następującą zależnością

$$R_p = 100\% (S_0 - S)/S_0, \quad (3.2)$$

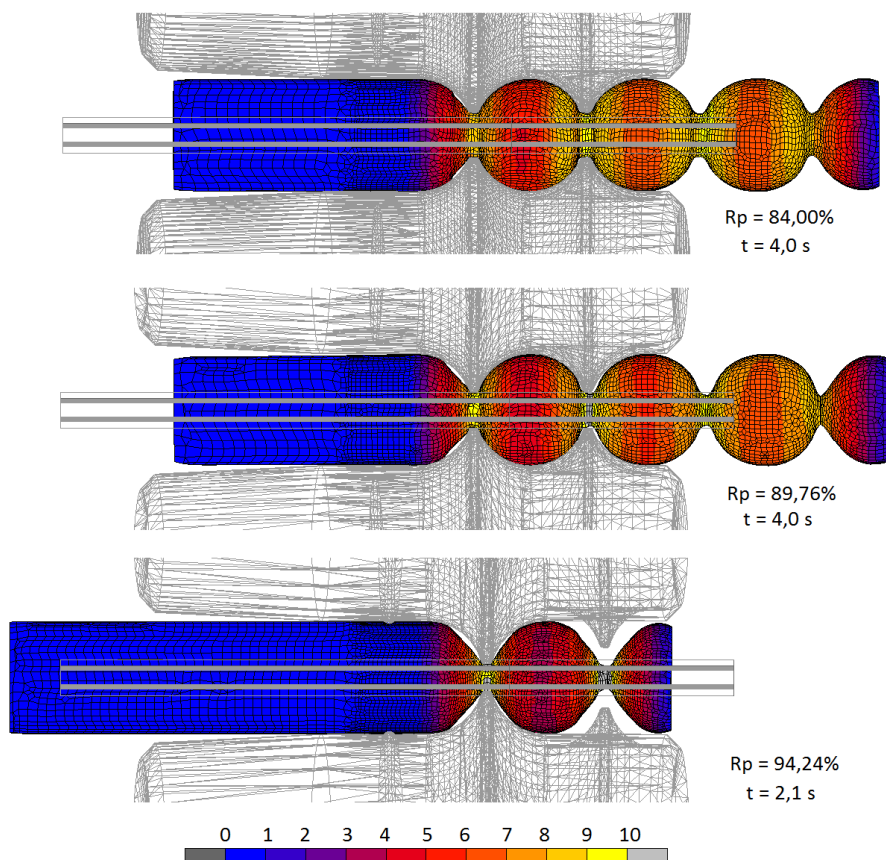
gdzie: S_0 – pole przekroju poprzecznego wsadu, S – pole przekroju poprzecznego wyrobu walcowanego.

Dla jej wyznaczenia wykonano dodatkowe trzy symulacje numeryczne, w których kształtowano kule $S\varnothing 25$ mm, połączone ze sobą łącznikami o średnicy $\varnothing 10$, $\varnothing 8$, $\varnothing 6$ mm (rys. 3.20). Redukcja przekroju poprzecznego wyniosła dla tych przypadków walcowania odpowiednio 84,00%, 89,76% i 94,29%. W przedstawionych poprzednio przypadkach walcowania redukcja przekroju poprzecznego była stała i wynosiła 72,96%. Należy przy tym zaznaczyć, że minimalna średnica każdego z przewężeń (maksymalne R_p) otrzymywana była już w pierwszym obrocie walca.

Prezentowane na rysunku 3.20 półwyroby otrzymano w symulacjach numerycznych, w których przyjęto identyczne parametry jak w procesach opisywanych uprzednio. Obliczenia prowadzono do wykonania przez walce 4 obrotów, za wyjątkiem kształtowania przy $R_p = 94,24\%$, które przerwano już po dwóch obrotach ze względu na duże zniekształcenie półwyrobu. Jest ono dobrze widoczne na rys. 3.20.



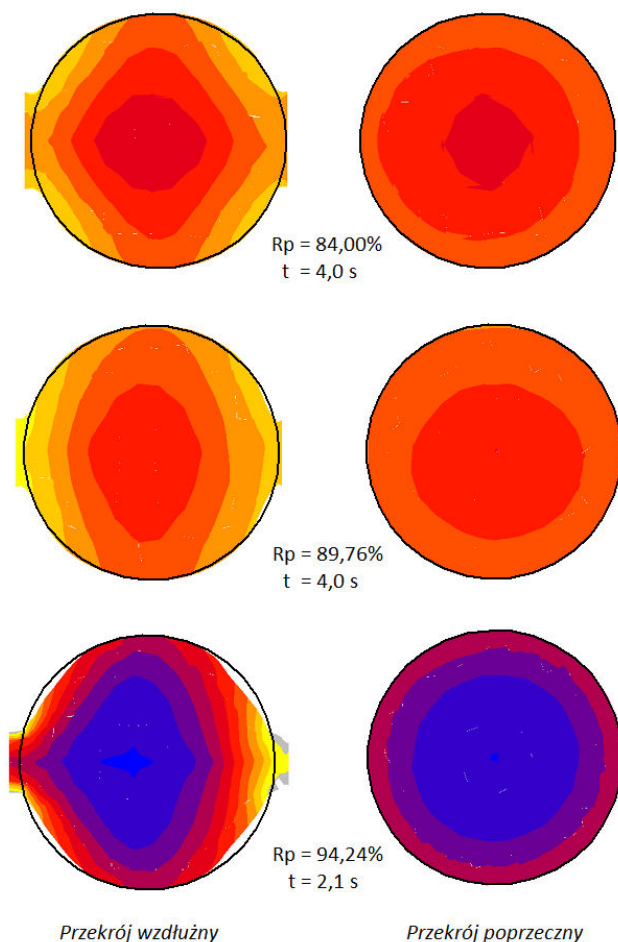
Rys. 3.19. Rozkłady sił stycznej i rozporowej, działających na walec w procesach walcowania śrubowego przy stałym kącie kształtującym $\alpha=45^\circ$



Rys. 3.20. Zarys odkuwek (w widoku z boku), z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, otrzymanych w procesach walcowania skośnego w zależności od zastosowanej redukcji przekroju poprzecznego

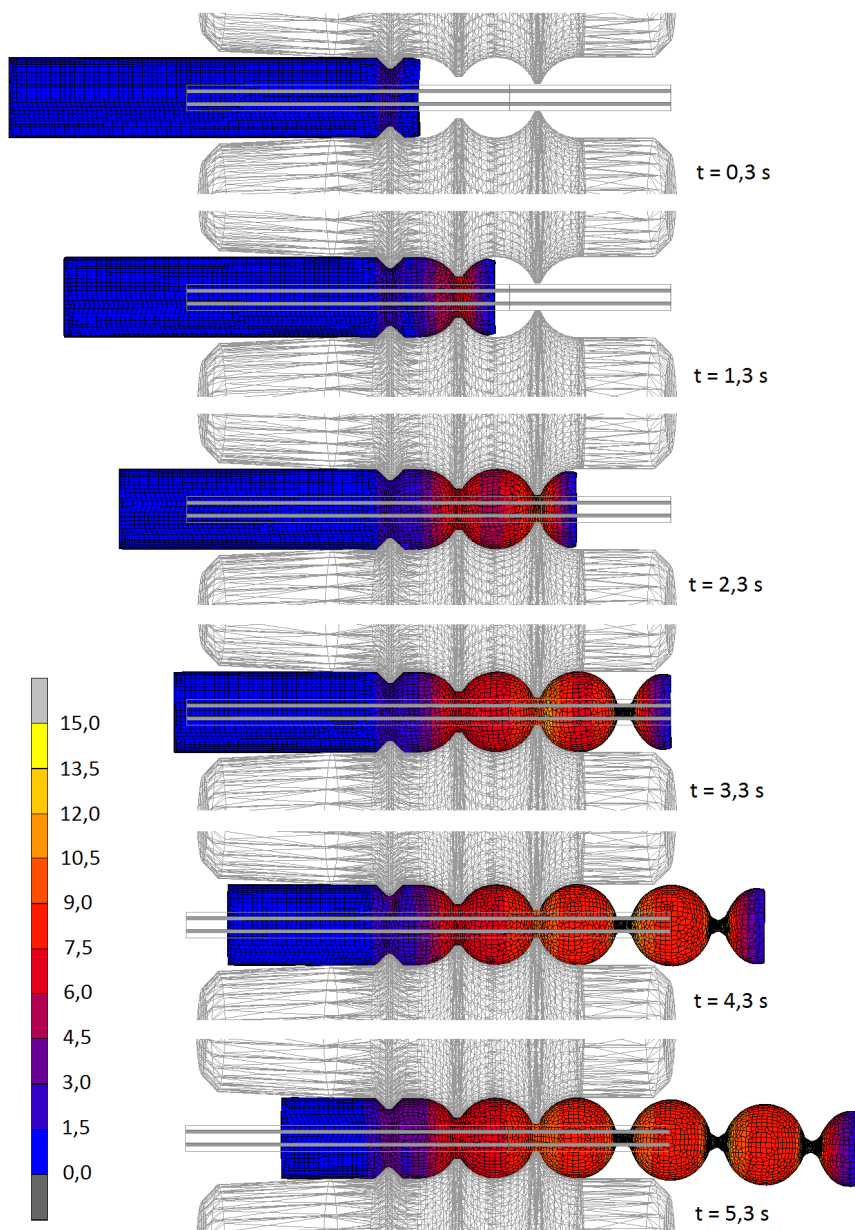
W celu określenia dokładności walcowania w zależności od redukcji R_p wykonano przekroje kul (w płaszczyźnie wzdłużnej i poprzecznej), otrzymanych w procesie walcowania śrubowego. Przekroje te pokazano na rys. 3.21.

Widoczne jest, że we wszystkich przypadkach kule mają doskonały zarys kołowy w przekroju poprzecznym (nie ma nawet szczątkowej owalizacji). Natomiast w przekroju wzdłużnym występują niewypełnienia wykroju, nieznaczne przy $R_p = 89,76\%$ oraz bardzo duże (dyskwalifikujące walcowany wyrób) przy $R_p = 94,24\%$. Niewypełnienia te są skutkiem obciskania przewężenia przez kołnierze w fazie końcowej, prowadzącego do intensywnego płynięcia metalu w kierunku osiowym, które powoduje odepchnięcie materiału od bocznych ścianek wykroju. Zmniejsza się wówczas powierzchnia kontaktu materiał - narzędzie, na której oddziałują siły tarcia wprawiające walcowany wyrób w ruch obrotowy. Wydaje się zatem, że w procesie walcowania poprzecznego kul nie powinno stosować się większej redukcji przekroju poprzecznego niż $R_p = 85\%$ (licząc na jeden obrót walców).



Rys. 3.21. Zarysy kul otrzymanych w procesie walcowania śrubowego, realizowanego przy różnych wartościach redukcji przekroju poprzecznego R_p

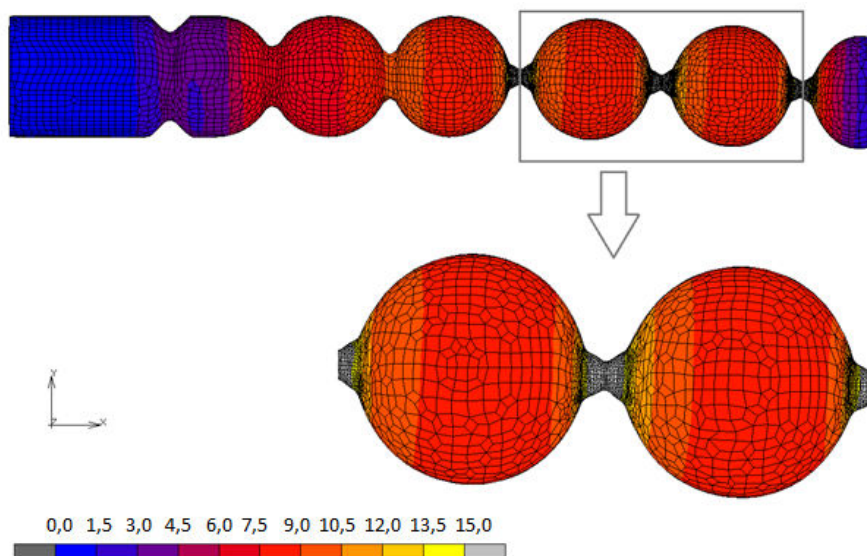
W procesach przemysłowych kule walcowane są z redukcją przekroju poprzecznego, w obszarze przewężenia, wynoszącą około 96%. W takiej sytuacji zalecane jest kształtowanie dwustopniowe przewężenia, realizowane za pomocą narzędzia pokazanego na rys 3.7, w trakcie trzech obrotów walców (rys. 3.22). Po pierwszym obrocie walców uzyskiwany jest łącznik o średnicy $\varnothing 13$ mm, którego kształt w czasie drugiego obrotu narzędzi nie ulega zmianie (walcowany jest wówczas drugi łącznik i kula zamykana jest w wykroju). W trakcie następnej połowy obrotu walca redukowana jest średnica łącznika do wartości $\varnothing 5,1$ mm. Następnie w czasie obrotu walców o kąt 120° zwiększana jest długość łącznika z 2,5 mm do 4,5 mm, celem ułatwienia rozdzielenia kul. Separacja odwalcowanego wyrobu może nastąpić w wyniku rozerwania łącznika (należy bardziej rozszerzyć występ narzędzia) lub odcięcia za pomocą noża umieszczonego na końcu uzwojenia wykroju.



Rys. 3.22. Progresja kształtu półwyrobu (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia) w procesie walcowania śrubowego kul SØ25 mm połączonych łącznikami o średnicy Ø5,1 mm

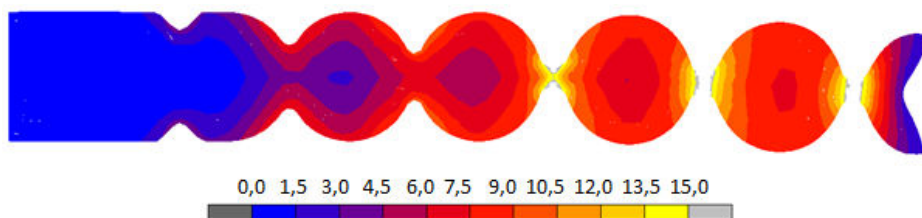
Analizy kształtu otrzymanych kul można dokonać posługując się rys. 3.23. Widoczne jest, że wykroje śrubowe walców zostały wypełnione prawidłowo, a kule mają wręcz idealny kształt. Łączniki między kulami, w wyniku rozszerzenia występu wykroju, uległy przewężeniu (uzyskana została szyjka jak w klasycznym procesie rozciągania) i przy większej szerokości kołnierzy narzędzi zostałyby zerwane. Można zatem rozdzielić kule

zmniejszając jeszcze bardziej średnicę łączników, przy jednoczesnym zwiększeniu ich długości. Jednak po takim rozdzieleniu na powierzchni kuli powstanie zadziór, będący pozostałością zerwanego łącznika.



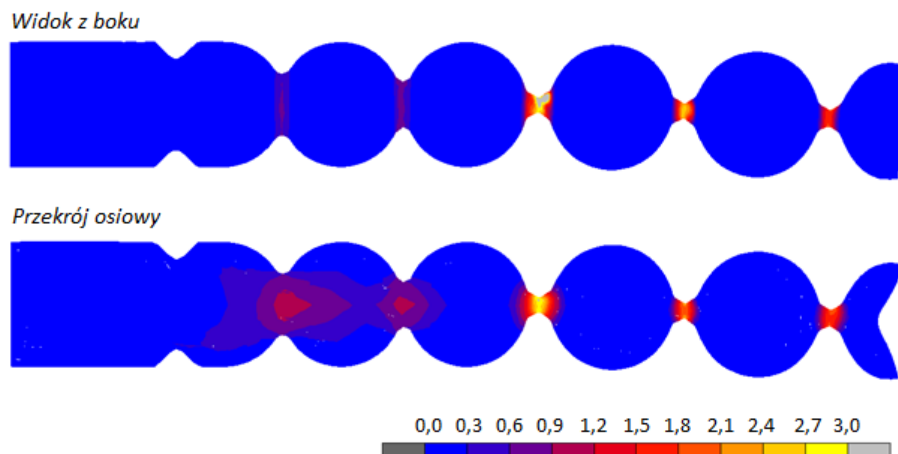
Rys. 3.23. Kształt odkuwek kul, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, otrzymanych w dwustopniowym procesie walcowania śrubowego

Korzystając z rys. 3.22 i 3.23 można dokonać analizy rozkładu intensywności odkształcenia na powierzchni walcowanego wyrobu. Widać jest, że największe odkształcenia występują w obszarze łącznika, który jest kształtowany przy największej redukcji przekroju poprzecznego. Duże odkształcenia występują także na powierzchni kul i to nawet w tych miejscach, gdzie redukcja przekroju poprzecznego była bardzo mała. Świadczy to intensywnym przerobie plastycznym materiału kul, następującym w efekcie płynięcia materiału w kierunku stycznym (obwodowym). Wniosek ten potwierdza również rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym półwyrobu, pokazany na rys. 3.24.



Rys. 3.24. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju wzdłużnym (osiowym) kul otrzymanych w dwustopniowym procesie walcowania śrubowego

Rozkład funkcji zniszczenia wg zmodyfikowanego kryterium Cockrofta-Lathama pokazano na rys. 3.25. Funkcja zniszczenia przyjmuje maksymalne wartości w łącznikach pomiędzy kulami, gdzie też powinno dojść do rozdzielenia materiału. Natomiast w ukształtowanych kulach funkcja zniszczenia ma wartości poniżej 0,3, co oznacza, że nie powinno tam dochodzić do utraty spójności materiału.

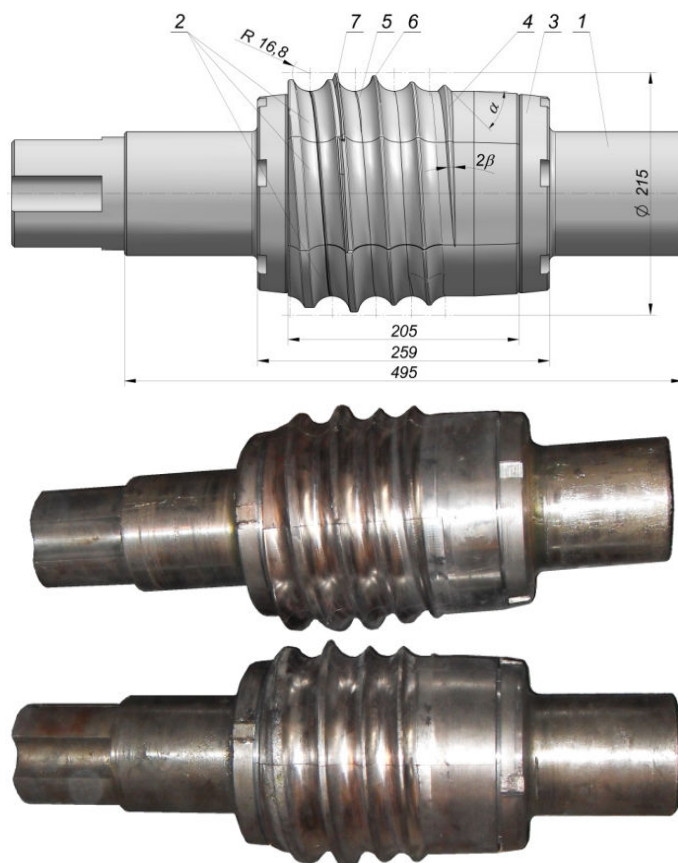


Rys. 3.25. Rozkład funkcji zniszczenia (wg zmodyfikowanego kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwkach kul otrzymanych w dwustopniowym procesie WŚK

3.3. Próby walcowania

Badania doświadczalne procesu WŚK wykonano w dwuwalcowej walcierce skośnej, która zainstalowana jest w Katedrze Plastycznej Przeróbki Metali Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie. Walcarka ta charakteryzuje się dużą uniwersalnością, umożliwiającą zastosowanie różnych typów kalibrowania walców roboczych. Dodatkowo możliwe jest prowadzenie procesu w układzie dwuwalcowym oraz trójwalcowym z wykorzystaniem różnych układów prowadnic (prowadnica tarczowa, prowadnica stała lub rolka obrotowa, a w układzie trójwalcowym: walec roboczy). W rezultacie przy odpowiednim uzbrojeniu, możliwe jest modelowanie różnych stanowisk laboratoryjnej walcarki, np. dwuwalcowej Mannesmanna, trójwalcowej Assela lub walcarki Dieschera (w której napęd prowadnicy tarczowej dolnej realizuje się przez dodatkową przekładnię). Walcarka skośna wyposażona jest w tensometryczne układy pomiarowe rejestrujące parametry siłowe procesów (momenty obrotowe i siły nacisku) oraz przetworniki mechaniczne rejestrujące parametry geometryczne procesu, takie jak prędkość obrotowa narzędzi. Dane techniczne walcarki zamieszczono w części drugiej opracowania.

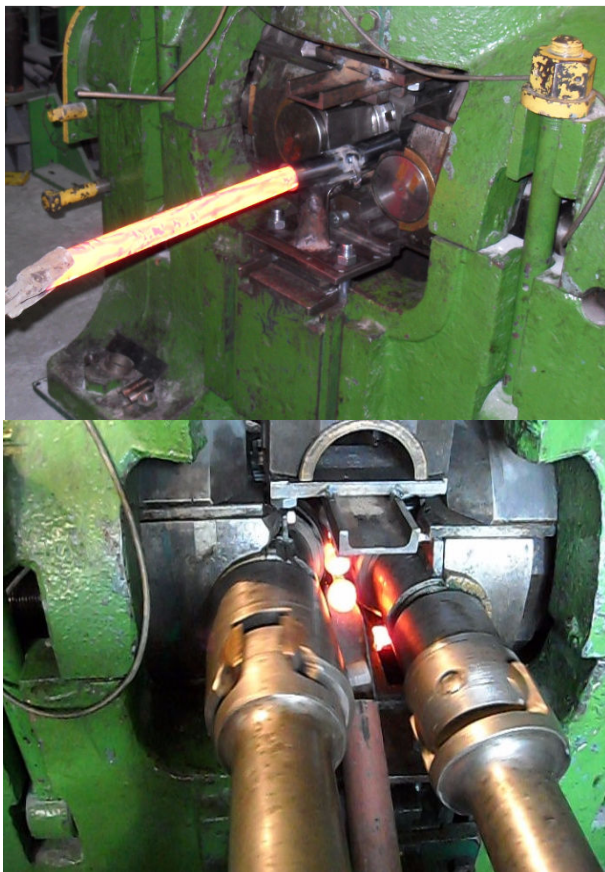
Mając na uwadze parametry walcarki przyjęto, że w trakcie prób walcowania kształtowane będą kule o średnicy $\varnothing 33$ mm. Założono przy tym, że kule walcowane będą z różnych materiałów, tj. stali konstrukcyjnej C45, stali łożyskowej 100Cr6 oraz stali kolejowej R200.



Rys. 3.26. Zestawy śrubowo-klinowych segmentów narzędziowych do walcowania kul $S\varnothing 33$, zamocowane na wałach walcarki (opis w tekście)

W oparciu o przedstawioną (w rozdziale 3.1) metodykę kalibrowania walców z wykrojami śrubowymi opracowano, a następnie wykonano zestaw narzędzi śrubowych do walcowania kul o wymiarach $S\varnothing 33$, stosowanych w młynach kulowych. Dodatkowo w celu utrzymania półfabrykatu w przestrzeni roboczej narzędzi zastosowano dwie prowadnice, mocowane do korpusu maszyny (identyczne jak w rozwiązaniu tradycyjnym przedstawionym w części 2). Zastosowanie w próbach konkretnej walcarki wymusiło ograniczenia gabarytowe narzędzi, zgodnie z którymi średnica robocza walców wynosiła $\varnothing 215$ mm, a długość beczki $L = 260$ mm. Kształt i wymiary gabarytowe opracowanych narzędzi śrubowych przedstawiono na rysunku 3.26. Narzędzia miały budowę segmentową. Wykroje robocze każdego z walców tworzyło sześć segmentów narzędziowych - 2, wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco (WNL). Segmenty mocowane są do wałów - 1 walcarki za pomocą dwóch czołowych nakrętek - 3. Na powierzchni segmentów - 2 wykonane są kształtowe bruzdy - 5 rozdzielone kołnierzami - 6 o wklęsłych powierzchniach bocznych. Noże - 7 odcinające szyjki od ukształtowanych kul umieszczono na przedostatnim kołnierzu, dzięki czemu w trakcie rozcinania kule są utrzymywane w wykroju przez ostatnie kołnierze. Strefę wcinania wykonano w kształcie kłino-

wych występow śrubowych – 4 o kącie rozwarcia klina 2β i kącie pochylenia ścianek bocznych α . W kolejnej strefie narzędzi – kształtowania powierzchnie klinowe stopniowo przechodzą we wklęsłe kołnierze kształtujące o zarysie walcowanej kuli.



Rys. 3.27. Przebieg procesu WŚK: wprowadzanie wsadu (pręta) do podajnika walcarki (rys. górny); odwalcowane kule opuszczają przestrzeń roboczą walcarki (rys. dolny)

Wykorzystując wykonane zestawy narzędzi z wykrojami śrubowymi przeprowadzono laboratoryjne próby walcowania kul o średnicy $S\varnothing 33$ mm. W trakcie procesu stosowano wsady stalowe w kształcie prętów cylindrycznych w gatunku 100Cr6 (ŁH 15) o średnicy $\varnothing 33$ mm i długości około 500 mm. Półfabrykaty nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około 1150 °C, a następnie wprowadzano je za pomocą kleszczy do podajnika pozycjonującego położenie wsadu w przestrzeni roboczej walcarki (rys. 3.27). Wsad uchwycony przez części stożkowe obracających się walców wprawiany był w ruch obrotowy i wciągany samoczynnie między segmenty, gdzie następowało kształtowanie kul w wykrojach śrubowych. Podczas walcowania materiał był utrzymywany w przestrzeni roboczej za pomocą prowadnic umieszczonych pomiędzy walcami. Odległość między prowadnicami dobrano jako nieco większą od średnicy walcowanych kul, dzięki czemu nie następowało klinowanie się wy-

robów w wykroju. Odwalcowane kule po opuszczeniu kotliny walcowniczej wypadają po przeciwnej stronie narzędzi śrubowych (rys. 3.27). W trakcie procesu walce obracają się w tym samym kierunku ze stałą prędkością $n_w = 60$ obr/min, a ich osie skrecono pod kątem $\theta = 3^\circ$ w stosunku do osi walcowania (wsadu).

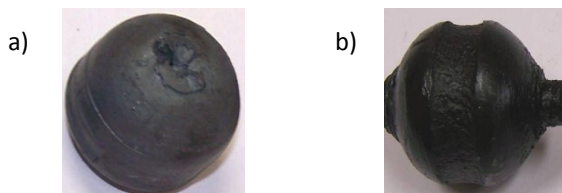
Półwyroby kul kształtowanych w procesie walcowania chłodzone były w powietrzu swobodnym. Dodatkowo, niektóre z kul poddano hartowaniu w wodzie lub oleju (bez dodatkowego nagrzewania), celem oszacowania własności wytrzymałościowych półwyrobów kul produkowanych analizowana metodą walcowania.

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że uzyskane kule są dokładnie rozdzielone od siebie, mają pożądaną okrągłą kształt, a na ich powierzchni nie występują żadne zadziory, będące pozostałością po sztykach łączących półwyroby, które są od nich odcinane w ostatniej fazie walcowania (rys. 3.28). Jedynym mankamentem jaki zauważono były stosunkowo płytkie rysy, wgniecenia na powierzchni ukształtowanych kul, będące następstwem zbyt małych promieni zaokrąglenia krawędzi ostatnich kołnierzy walców. Zaobserwowane zniekształcenia mieszczą się jednak w polu tolerancji wykonania i nie wpływają w sposób istotny na jakość otrzymanych kul. Uzyskana dokładność pozwala przypuszczać, że tak ukształtowane wyroby mogą być z powodzeniem stosowane jako półfabrykaty elementów tocznych łożysk.



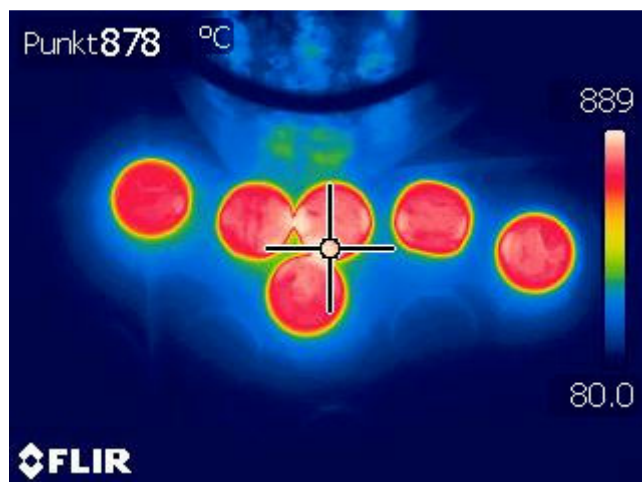
Rys. 3.28. Kule odwalcowane w trakcie badań laboratoryjnych w wykroju skalibrowanym wg metody opracowanej w Politechnice Lubelskiej

Stabilny przebieg procesu walcowania półwyrobów kul jest silnie uzależniony od ilości materiału zamykanego w przestrzeni roboczej walców. W przypadku, gdy walce są zbyt zsunięte do siebie, lub zastosowano wsad o większej średnicy, dochodzi do przepełnienia wykrojów, w efekcie czego kule mają silnie zowalizowany przekrój w płaszczyźnie przechodzącej przez oś materiału wsadowego. Często podczas przepełnienia wykroju dochodzi również do powstawania pęknięć wewnętrznych w osi walcowanych wyrobów (rys. 3.29a). Natomiast zastosowanie wsadu o zbyt małej średnicy prowadzi do niewypełnienia wykrojów śrubowych. W rezultacie otrzymuje się kule o niepełnym zarysie w płaszczyźnie centralnej wyrobu (rys. 3.29b).



Rys. 3.29. Kule ukształtowane w procesie WSK, przy: a) przepełnionym wykroju, b) niewypełnionym wykroju

Pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania (wynoszącego kilkadziesiąt sekund) materiał w trakcie walcowania nie ulegał znacznemu wychłodzeniu. Przyczyna tego faktu tkwiła w rekompensowaniu strat cieplnych (wynikających z odprowadzenia ciepła do narzędzi) przez ciepło generowane w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. Zasadność takiego przypuszczenia potwierdza rejestracja temperatury półwyrobów odwalcowanych (rys. 3.30), dokonana za pomocą kamery termowizyjnej.

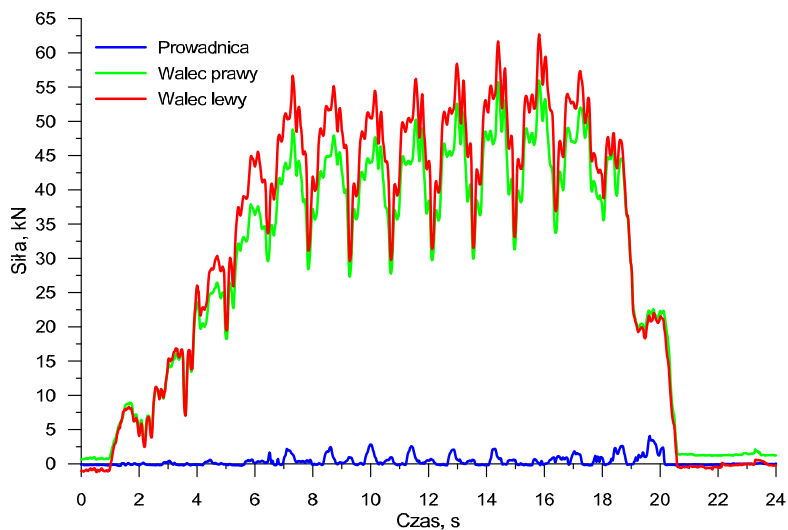


Rys. 3.30. Temperatura kul ukształtowanych w procesie WŚK, zarejestrowana kamerą termowizyjną

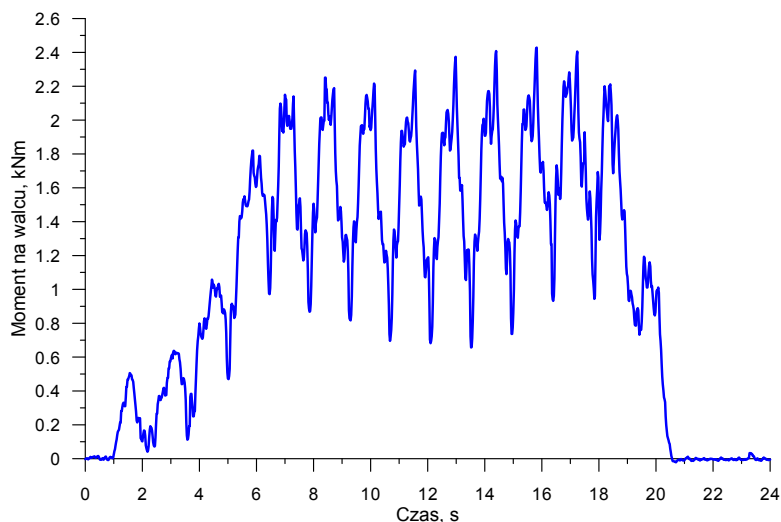
Ważnym zagadnieniem na etapie opracowywania technologii jest możliwość dokładnego określenia parametrów siłowych procesu. Trafne oszacowanie wielkości siły i momentów walcowania pozwala na prawidłowe opracowanie kształtu narzędzi oraz dobór wielkości walcarki. Dlatego też w trakcie prób walcowania rejestrowano wartości sił (rys. 3.31) i momentów (rys. 3.32) działających na walce śrubowe. Cechą charakterystyczną zarejestrowanych w trakcie procesu rozkładów jest ich cykliczność, która związana jest bezpośrednio ze specyfiką procesu. Co jeden pełny obrót początkowe zwoje wykrojów (kliny) wcinają się we wsad oddzielając objętość materiału równą objętości kuli i łączącej szyjki. Powoduje to cykliczny wzrost sił i momentów. Następnie materiał w dalszej części wykroju śrubowego jest przekształcany w kulę, czemu odpowiadają malejące wartości sił i momentów.

Wartości maksymalne sił działających na segmenty robocze są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają 60 kN, co pozwala wnioskować, że opracowane narzędzia nie powinny ulegać przedwczesnemu zużyciu. Znacznie mniejsze siły (około 2,5 kN) działają na prowadnice utrzymujące wsad w przestrzeni roboczej. Jednak w tym przypadku powierzchnie robocze prowadnic, zwłaszcza w strefie rozcinania kul są bardzo wąskie. Dodatkowo gorące półfabrykaty praktycznie przez cały czas stykają się z powierzchniami roboczymi prowadnic, w wyniku czego nawet stosunkowo niewielkie siły mogą prowadzić do przyspieszonego zużycia się tych elementów. Również maksymalne wartości momentu obrotowego są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają 2,5 kNm, co stanowi

niewiele ponad 30% momentu nominalnego urządzenia. Duże znaczenie na wartości parametrów siłowych ma ilość materiału zamkniętego w wykroju. Nawet niewielkie przepełnienie wykroju prowadzi do gwałtownego wzrostu sił i momentów. Dodatkowo w takich przypadkach pojawia się niebezpieczeństwo deformacji ukształtowanej kuli, która przejawia się silną owalizacją przekroju poprzecznego w płaszczyźnie prostopadłej do osi materiału wsadowego.



Rys. 3.31. Rozkłady sił działających na narzędzia w procesie kształtowania walcami śrubowymi klinowymi półwyrobów kul ze stali w gatunku 100Cr6



Rys. 3.32. Rozkłady momentu walcowania w procesie kształtowania walcami śrubowymi klinowymi półwyrobów kul ze stali w gatunku 100Cr6

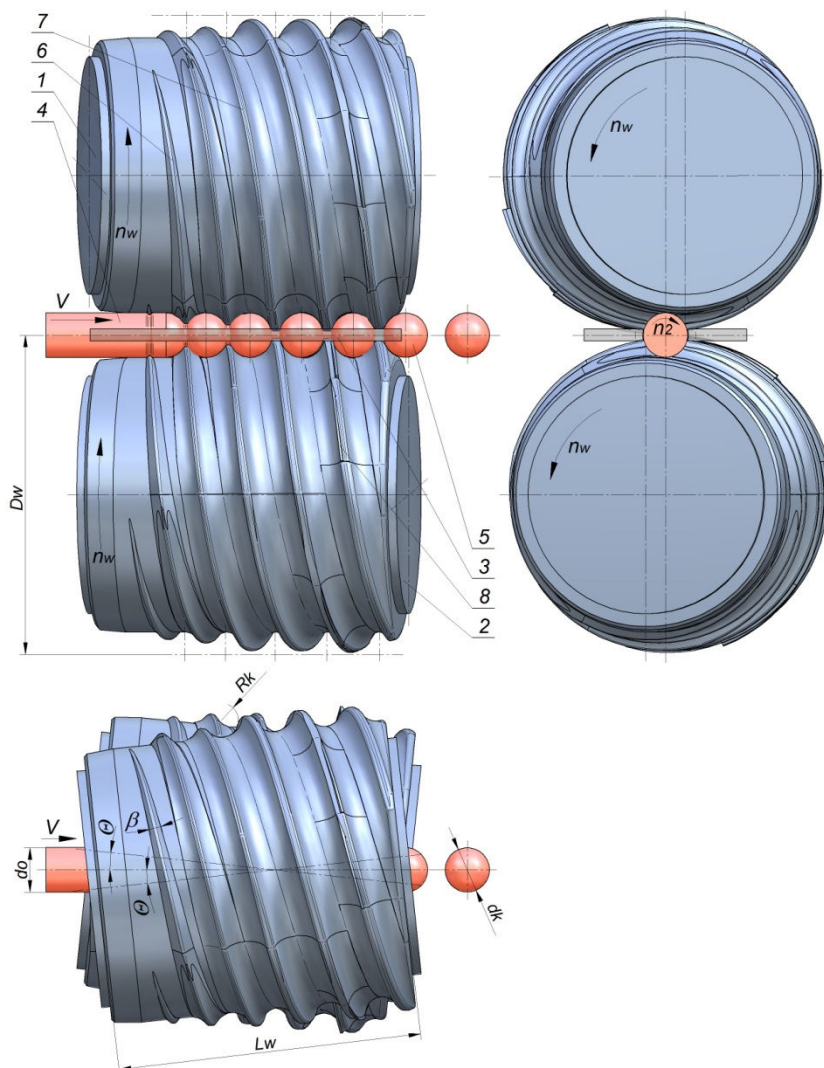
4. Walcowanie śrubowo-klinowe w wykrojach wielozwojnych

Dążenie do obniżania kosztów wytwarzania oraz poprawy jakości kształtowanych wyrobów w połączeniu z produkcją na skalę masową wyrobów w kształcie kul, powoduje konieczność udoskonalania obecnie stosowanych technologii. Rozwijając technologię walcowania skośnego oduwek opracowano proces kształtowania półfabrykatów kul w wielozwojnych wykrojach śrubowych. Zastosowane rozwiązanie pozwala na kilkukrotne zwiększenie wydajności walcowania kul w stosunku do rozwiązań tradycyjnych, przy jednoczesnej poprawie jakości kształtowanych wyrobów. Walcowanie śrubowo-klinowe w wykrojach wielozwojnych bazuje na metodzie WŚK opisanej w rozdziale 3. Zasadnicza zmiana w stosunku do procesu WŚK polega na wykorzystaniu wielozwojnych narzędzi śrubowo-klinowych [45, 46]. Narzędzia stosowane w tym procesie wykonywane są przez jednoczesne nawinięcie śrubowe na walec kilku klinów [39].

Schemat procesu WŚK w wykrojach wielozwojnych przedstawiono na rys. 4.1. Przebieg procesu walcowania w śrubowych wykrojach wielozwojnych jest identyczny jak w przypadku metod opisanych w rozdziałach 2 i 3. Kule kształtowane są bezpośrednio z pręta - 3 pomiędzy dwoma jednakowymi walcami – 1 i 2, na powierzchniach których nacięte są wielozwojne bruzdy śrubowe (wykroje) (rys. 4.1). Bruzdy rozdzielone są od siebie kołnierzami – 6 i 7, które stopniowo zwiększają swoją szerokość i wysokość. Na ostatnich kołnierzach umieszczone są noże - 8, które oddzielają ukształtowane kule - 5 od łączących je mostków. Podczas walcowania narzędzia obracają się w tym samym kierunku i z jednakową prędkością, wprawiając materiał w przeciwbieżny ruch obrotowy. Kształt i skok śrubowych bruzd umieszczonych na powierzchniach walców są tak dobrane, aby w każdym położeniu kątowym narzędzi zachowana była stała objętość materiału zamkniętego w wykroju. Osie walców nachylone są ukośnie względem osi walcowania, a kąt zukosowania narzędzi w przybliżeniu odpowiada kątowi wzniosu linii śrubowej wykroju w strefie kalibrowania. Podczas walcowania materiał jest utrzymywany w kotlinie walcowniczej za pomocą prowadnic umieszczonych pomiędzy walcami. Cechą charakterystyczną procesu WŚK w wykrojach wielozwojnych jest jego wysoka wydajność. W czasie jednego obrotu walców uzyskuje się kilka kul, których liczba jest równa krotności wykrojów śrubowych. Przykładowo w przypadku zastosowania narzędzi trójzwojnych, które obracają się z prędkością 160 obr/min możliwe jest ukształtowanie w ciągu jednej minuty nawet 480 kul, co jest praktycznie niemożliwe do osiągnięcia przy wykorzystaniu innych metod kształtowania.

Narzędzia wykorzystywane w procesie zbudowane są z dwóch zasadniczych części (podobnie jak walce jednozwojne opisane w rozdziale 3): wejściowej (stożkowej) i kształtującej (cylindrycznej). W strefie kształtującej, na becze walca nawinięte są wielozwojne powierzchnie klinowe, tworzące wykroje, w których realizowany jest proces

walcowania półwyrobów kul. Natomiast zadaniem części wejściowej jest skalibrowanie wymiaru materiału wsadowego przed jego wejściem do strefy kształtującej.

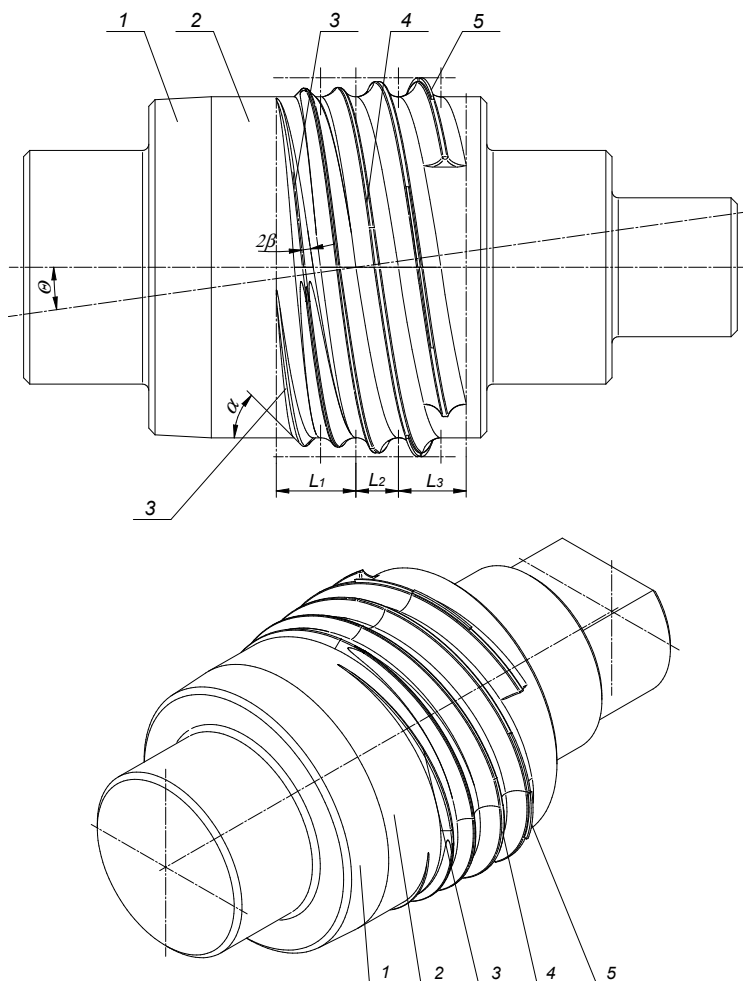


Rys. 4.1. Schemat procesu walcowania śrubowo-klinowego (WŚK) w wykrojach wielozwojnych (opis w tekście)

4.1. Konstrukcje walców

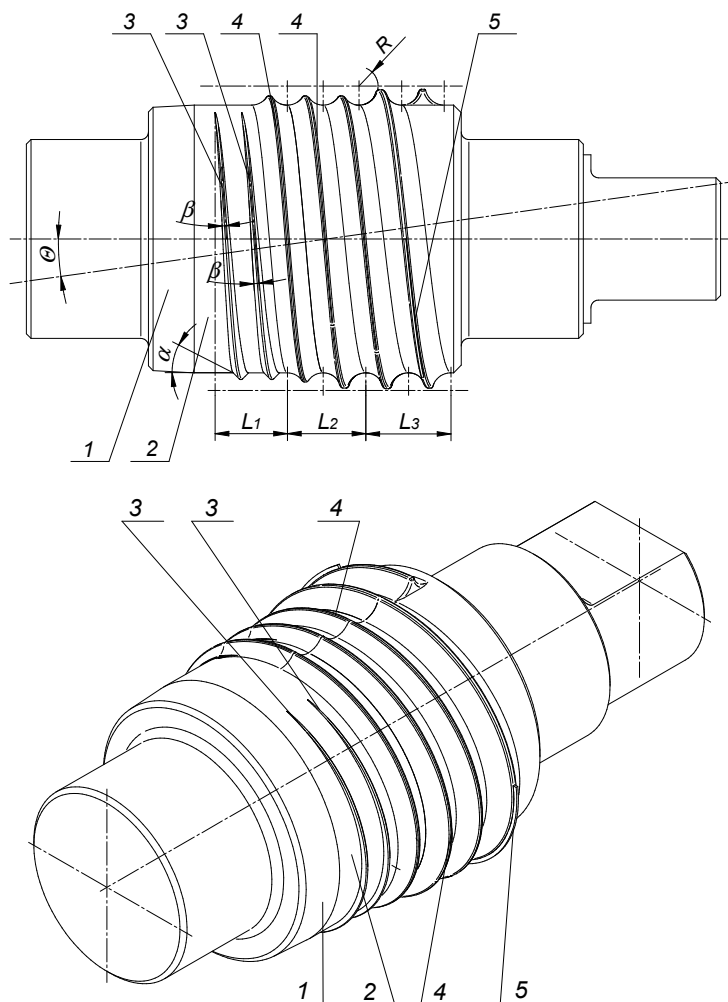
Sposób kalibrowania narzędzi wielozwojnych jest identyczny jak w przypadku walców jednozwojnych do WŚK. Podobnie jak dla tradycyjnych wykrojów śrubowych oraz narzędzi do WŚK, podstawą do wyznaczenia skoku i kształtu zarysu bruzd jest konieczność utrzymania stałej objętości materiału między kołnierzami narzędzi, równej objętości walcowanej kuli i łącznika, dla każdego położenia kąтового walców. Natomiast dla

zabezpieczenia płynnego przebiegu procesu walcowania, który gwarantuje możliwość uzyskania wyrobów o wysokiej jakości, opracowane wykroje powinny spełniać dodatkowe warunki, a mianowicie: zmiany kształtu i skoku kołnierzy powinny odpowiadać wydłużeniu kształtowanego półfabrykatu oraz gniot powinien być wywierany przez stosunkowo wąskie kołnierze. Słuszne również pozostają założenia odnośnie zalecanych wartości kątów kołnierzy klinowych α i β (tab. 3.1). Szczegółowe wytyczne projektowania wykrojów śrubowych do walcowania kul szerzej opisano w rozdziale 2 i 3. W zależności od położenia początkowych zwojów kołnierzy klinowych, wielozwojne narzędzia śrubowe do walcowania kul mogą być skalibrowane na dwa sposoby. W pierwszej metodzie przyjmuje się, że początkowe zwoje kołnierzy rozmieszczone są symetrycznie na obwodzie cylindrycznej strefy kształtującej (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Schemat budowy wielozwojnych narzędzi śrubowych, z wykrojami rozmieszczonymi symetrycznie na obwodzie walca: 1 – część stożkowa, 2 – część cylindryczna, 3 – kołnierz klinowy, 4 – kołnierz wklęsły, 5 – nóż rozcinający

Druga metoda kalibrowania polega na umieszczeniu początkowych zwojów wszystkich kołnierzy w jednej płaszczyźnie (rys. 4.3). Należy tutaj zaznaczyć, że z praktycznego punktu widzenia, korzystniejsze jest stosowanie pierwszego rozwiązania, w którym etap wcinania się początkowych zwojów kołnierzy, rozłożony jest symetrycznie na całym obwodzie walców. W efekcie czego skoki sił w początkowych fazach każdego cyklu są znacznie mniejsze niż dla narzędzi, w których wszystkie wykroje jednocześnie zagłębiają się w półfabrykat. Dlatego też druga metoda kalibrowania ma znaczenie raczej czysto teoretyczne.



Rys. 4.3. Schemat budowy wielozwojnych narzędzi śrubowych, z wykrojami rozmieszczonymi na jednej płaszczyźnie: 1 – część stożkowa, 2 – część cylindryczna, 3- kołnierz klinowy, 4 – kołnierz wklęsły, 5 – nóż rozcinający

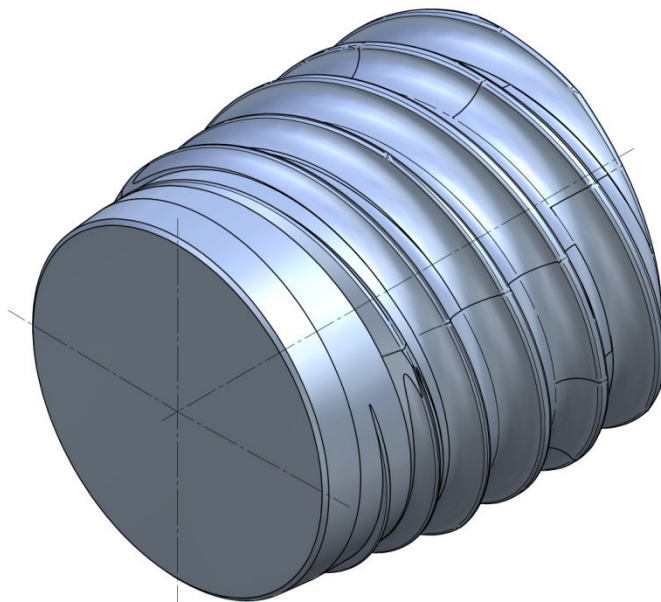
Część roboczą narzędzia wielozwojnego do walcowania kul, opracowaną według pierwszej metody (rys. 4.2), można podzielić na kilka podstawowych stref, w zależności od funkcji, którą pełnią w procesie walcowania. W pierwszej strefie wejściowej – 1, narzędzia mają stożkowy kształt. Zadaniem tej strefy jest ułatwienie w uchwyceniu półfabrykatu przez walce oraz wprowadzenie wsadu do przestrzeni roboczej. Stożkowe powierzchnie walców pozwalają również na redukcję średnicy półfabrykatu do wymiaru kształtowanej kuli. Następnie znajduje się walcowa powierzchnia – 2, na której wykonane są wielozwojne kołnierze kształtujące. Przy czym w strefie wcinania wielozwojne kołnierze mają kształt klinów – 3, nawiniętych symetrycznie na powierzchni walca, które następnie w strefie kształtowania przechodzą płynnie w kołnierze o wklęsłych powierzchniach bocznych – 4. W ostatniej strefie kalibrowania na powierzchniach śrubowych kołnierzy umieszczone są noże rozcinające – 5, które oddzielają szypki od ukształtowanych kul.

Konstrukcja wielozwojnych narzędzi śrubowych, którą opracowano według drugiej metody kalibrowania, posiada wiele cech wspólnych z poprzednio omawianymi walcami. Tutaj również można wyróżnić stożkową strefę wejściową – 1 oraz walcową powierzchnię – 2, na której wykonane są wielozwojne kołnierze kształtujące 3 (o klinowych powierzchniach bocznych) i 4 (o wklęsłych powierzchniach bocznych). Zasadnicza różnica polega na niesymetrycznym usytuowaniu klinowych kołnierzy - 3 w strefie wcinania. Wielozwojne wykroje początkowe rozpoczynają się od jednej płaszczyzny (rys. 4.3). Takie usytuowanie kołnierzy klinowych w strefie wcinania powoduje, że proces walcowania kul w ten sposób skalibrowanych narzędziach, przebiega przy dużych wahaniami wartości sił i momentów. Wpływa to niekorzystnie na dokładność kształtowanych wyrobów oraz trwałość narzędzi i agregatu walcowniczego.

Cechą charakterystyczną wielozwojnych narzędzi do walcowania kul jest znaczne skrócenie drogi, na której kształtowane są kule (mniejsza liczba zwojów). W śrubowych narzędziach jednozwojnych każda kula kształtowana jest w trakcie 3 – 3,5 obrotów walców, natomiast stosując narzędzia wielokrotne liczba obrotów narzędzi, potrzebna do ukształtowania kuli zmniejsza się od 30 % do nawet 70 %. Dodatkowo skok wykrojów śrubowych jest znacznie większy niż przy narzędziach jednozwojnych, wiąże się to z koniecznością większego zukosowania walców, co wpływa na intensyfikację procesu walcowania.

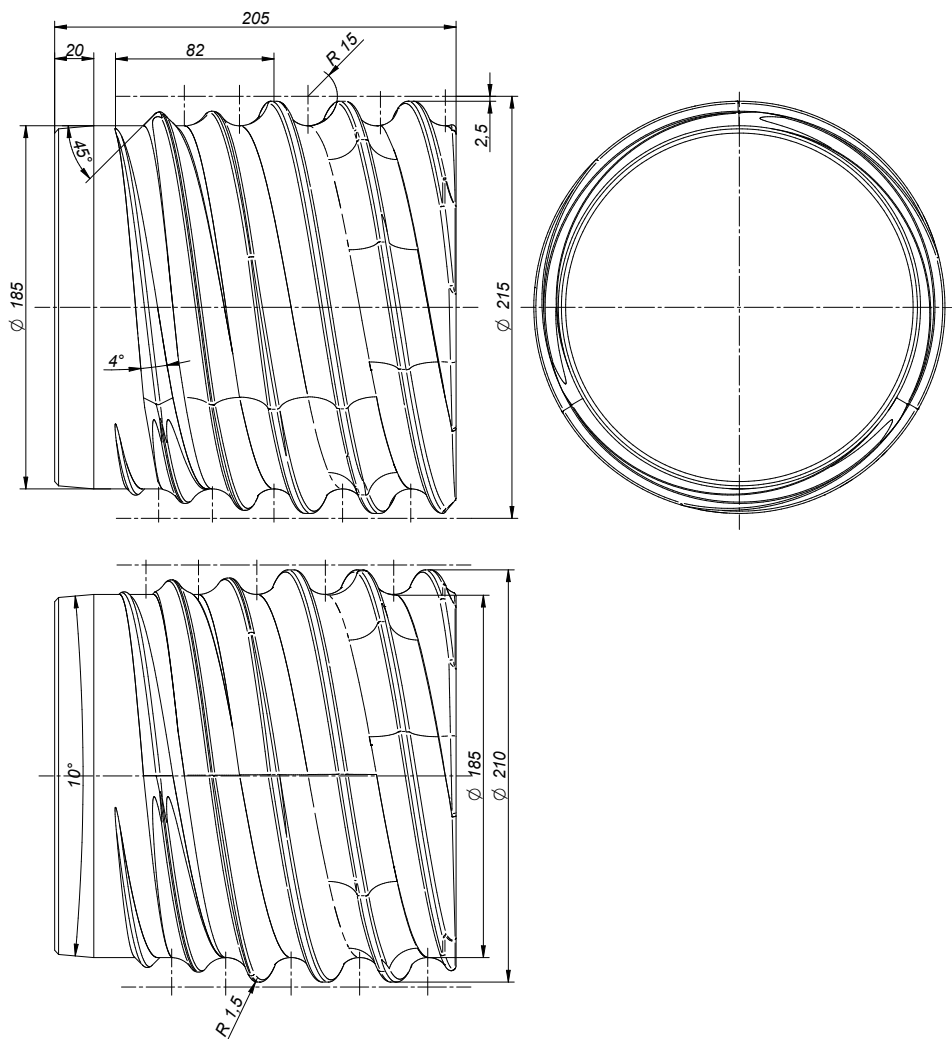
Bazując na opracowanej metodyce projektowania narzędzi klinowo-śrubowych, skonstruowano cztery walce z wielozwojnymi wykrojami śrubowymi. Zaprojektowane narzędzia umożliwiały realizację procesu walcowania skośnego kul o średnicy $\varnothing 30$ mm w wykrojach trójzwojnych oraz $\varnothing 40$ mm w wykrojach jednozwojnych, dwuzwojnych i trójzwojnych. Modele przestrzenne narzędzi wykonano przy użyciu oprogramowania CAD Solid Edge, które następnie wykorzystano w symulacjach numerycznych procesu. Dodatkowo narzędzia trójzwojne do walcowania kul o średnicy $\varnothing 30$ mm zostały opracowane pod kątem przeprowadzenia weryfikacji doświadczalnej. Opracowany model 3D trójzwojnego narzędzia śrubowego, które umożliwia kształtowanie kul $\varnothing 30$ mm, przedstawiono na kolejnym rysunku 4.4. Często w procesach walcowania poprzeczno – klinowego na powierzchniach bocznych klinów (zwłaszcza w strefie wcinania), wykonuje się nacięcia technologiczne, co zapobiega pojawianiu się niekontrolowanych poślizgów w początkowych etapach walcowania. Dlatego też w przypadku pojawienia się tego zjawiska ograniczającego, należy powierzchnie boczne klinowych kołnierzy wykrojów na-

ciąć. Można jednak przypuszczać (opierając się na danych literaturowych procesów walcowania rur), że przy stosunkowo dużych kątach zukosowania walców (charakterystycznych dla narzędzi wielozwojnych), zjawisko niekontrolowanego poślizgu nie powinno występować. Opracowany model przestrzenny części roboczej walca trójzwojnego posiada stosunkowo krótką strefę wejściową, o stożkowym kształcie. Jest to spowodowane ograniczeniami gabarytowymi agregatu, na którym planuje się przeprowadzić weryfikację doświadczalną.



Rys. 4.4. Model walca z trójzwojnym wykrejem klinowo-śrubowym, wykonany w programie Solid Edge do walcowania kul $S\varnothing 30$

Na kolejnym rysunku 4.5 pokazano kształt trójzwojnych narzędzi śrubowych wraz z zaznaczonymi głównymi wymiarami gabarytowymi. Długość czynna beczki walca wynosi 205 mm, zaś jego średnica czynna 215 mm. Początkowe kołnierze śrubowe o klinowych powierzchniach bocznych, rozmieszczono symetrycznie co 120° na obwodzie powierzchni walcowej. Przy czym powierzchnie klinowe charakteryzowane były przez kąt pochylenia powierzchni bocznej, który wynosił $\alpha = 45^\circ$ oraz kąt rozwarcia klinów o wartości $2\beta = 4^\circ$. W strefie kształtowania, klinowe powierzchnie kołnierzy płynnie przechodzą w powierzchnie wklęsłe o promieniu równym połowie średnicy walcowanych kul ($R = 15$ mm). Krawędzie wszystkich kołnierzy zaokrąglono promieniem o wartości $R1,5$ mm. Zaprojektowane narzędzia umożliwiają walcowanie skośne kul, które połączone są ze sobą za pomocą szyjek o średnicy wynoszącej około $\varnothing 5$ mm i długości $l = 5$ mm. Modele opracowane na potrzeby prowadzonej analizy numerycznej nie posiadały noży rozcinających. Natomiast w narzędziach zaprojektowanych do badań doświadczalnych, uwzględniono elementy rozcinające, które zaprojektowano zgodnie z wytycznymi zawartymi w rozdziale 3.



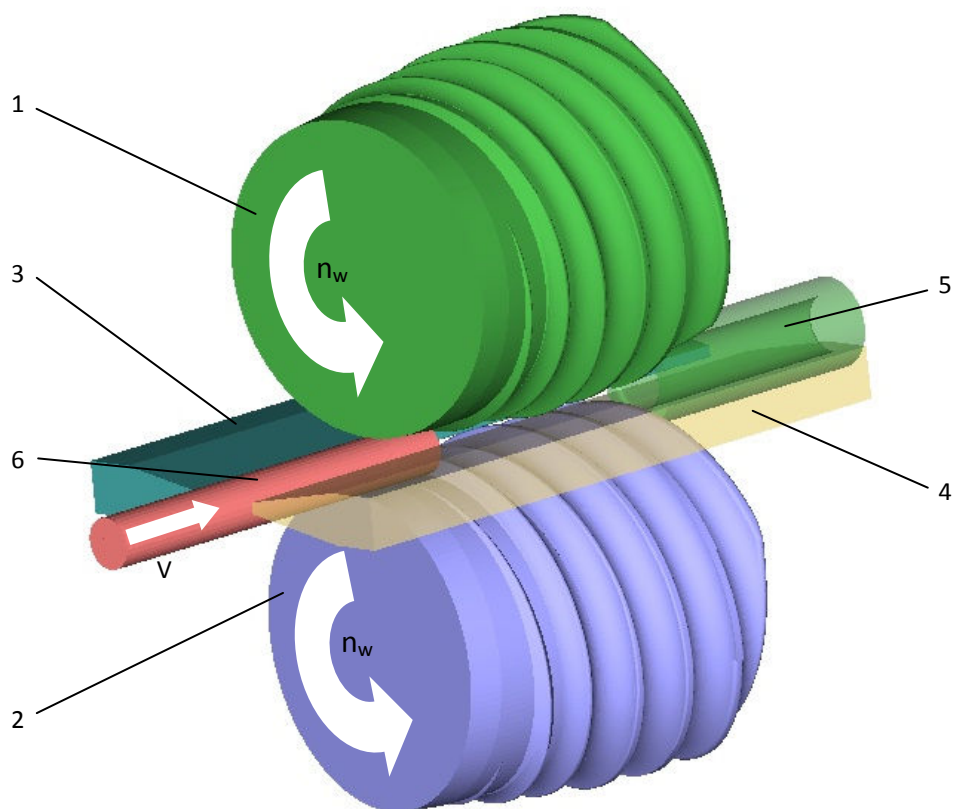
Rys. 4.5. Trójzwojny wałek służący do walcowania kul $S\varnothing 30$ połączonych cylindrycznym mostkiem o średnicy $\varnothing 5$ mm

4.2. Analiza numeryczna

4.2.1. Symulacje numeryczne walcowania kul w trójzwojnym wykroju śrubowym

Wstępnego potwierdzenia poprawności opracowanej metody kształtowania dokonano numeryczne, symulując procesy walcowania kul o wymiarach $S\varnothing 30$ mm w trójzwojnych wykrojach śrubowych. Obliczenia wykonano w programie Simufact Forming w wersji 10.0, który wielokrotnie wykorzystywano w analizie procesów walcowania poprzecznego i skośnego. Opracowany na potrzeby prowadzonej analizy model geome-

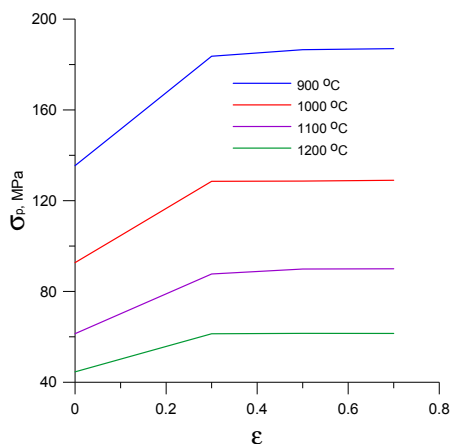
tryczny procesu walcowania kul w trójzwojnych wykrojach śrubowych pokazano na rysunku 4.6. W skład modelu wchodzi dwa identyczne walce - 1 i 2, dwie listwy prowadzące - 3, 4 mające za zadanie ustalenie pozycji półfabrykatu w trakcie walcowania, tuleja pozycjonująca ukształtowane kule - 5 oraz wsad - 4 (pręt okrągły o średnicy $\varnothing 30$ mm), modelowany za pomocą ośmiowęzłowych elementów heksagonalnych pierwszego rzędu. Natomiast narzędzia (walce i listwy) modelowano jako ciała doskonale sztywne opisywane za pomocą elementów powierzchniowych. Na powierzchniach roboczych walców wykonane są śrubowo - klinowe wykroje o płaskich i wklęsłych powierzchniach bocznych, których promień jest równy promieniowi walcowanej kuli. W symulacji wykorzystano model materiałowy stali w gatunku 100Cr6, zaczerpnięty z biblioteki zastosowanego programu.



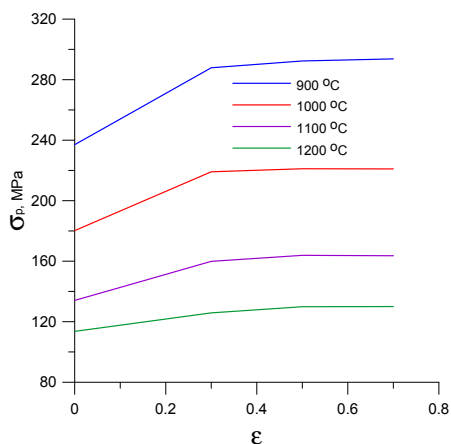
Rys. 4.6. Model geometryczny procesu walcowania skośnego kul $S\varnothing 30$ mm (w wykrojach trójzwojnych), opracowany w programie Simufact: 1, 2 – walce, 3, 4 – prowadnice, 5 – tuleja odbiorcza, 6 – wsad

Przykładowe krzywe płynięcia opisujące właściwości stali 100Cr6 przedstawiono na rysunkach 4.7 i 4.8. Ponadto założono, że: materiał wsadu przed walcowaniem został nagrzany w całej objętości do temperatury 1150°C , zaś narzędzia mają stałą temperaturę 150°C . Walce skręcone są względem osi wsadu o kąt $\theta = 6^{\circ}$ i obracają się w tą samą stro-

nę z jednakową prędkością $n_w = 60$ obr/min. Na powierzchni styku materiał-narzędzie przyjęto model tarcia stałego, który reprezentowany jest przez czynnik tarcia o wartości granicznej $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami założono na poziomie $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, zaś między materiałem a otoczeniem $0,35 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Dodatkowo przyjęto, że podczas symulacji walce wykonają około 2 - 3 obrotów, co pozwala na całkowite ukształtowanie przynajmniej 2 kul. Każdy obrót walców modelowano w 1000 kroków, co w efekcie powodowało wydłużenie czasu obliczeń do kilku dni.



Rys. 4.7. Krzywe płynięcia stali 100Cr6, zaczerpnięte z programu Simufact Forming dla prędkości odkształcenia $1,5 \text{ s}^{-1}$

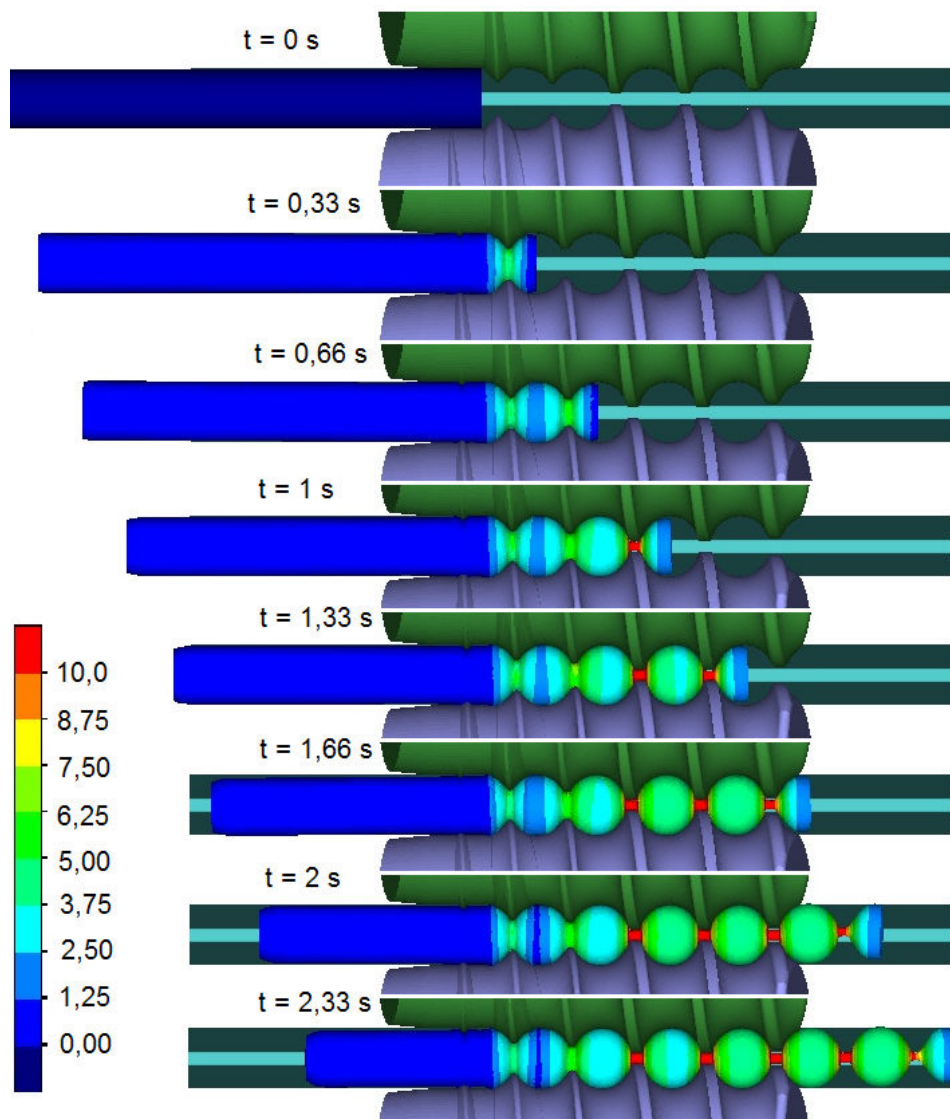


Rys. 4.8. Krzywe płynięcia stali 100Cr6, zaczerpnięte z programu Simufact Forming dla prędkości odkształcenia 100 s^{-1}

W efekcie prowadzonych symulacji potwierdzono możliwość kształtowania kul proponowaną metodą. W trakcie obliczeń analizowano kinematykę płynięcia metalu w poszczególnych etapach walcowania. Wyznaczono rozkłady intensywności odkształceń, naprężeń i temperatur, określono również parametry siłowe procesu. Przeprowadzone symulacje w pełni potwierdziły zasadność stosowania oprogramowania bazującego na metodzie elementów skończonych do modelowania numerycznego rotacyjnych procesów obróbki plastycznej (m.in. walcowania skośnego kul).

Progresję kształtu półwyrobów, wyznaczoną numerycznie w trakcie symulacji procesu walcowania wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia pokazano na rysunku 4.9. Podczas walcowania kul wsad w początkowym etapie wprawiany jest w ruch śrubowy (obrotowy i postępowy) i przemieszczany bez odkształcenia do strefy wcinania, utworzonej przez klinowe kołnierze walców, gdzie przemieszczające się śrubowo kołnierze narzędzi wcinają się okresowo (co 120°) we wsad i zamykają w wykroju materiał o objętości równej objętości kuli i łącznika. W tym czasie na obwodzie półfabrykatu kształtowany jest pierścieniowy rowek klinowy, o stożkowych powierzchniach bocznych, które w kolejnych etapach procesu w wyniku oddziaływania kołnierzy o wklęsłych powierzchniach, zostają przekształcone w czasie kul. W pełni ukształtowany wyrób otrzymuje się po niespełna dwóch obrotach narzędzi. Przy czym w ustalonym procesie walcowania w czasie każdego pełnego obrotu narzędzi kształtuje się trzy kule. W trakcie

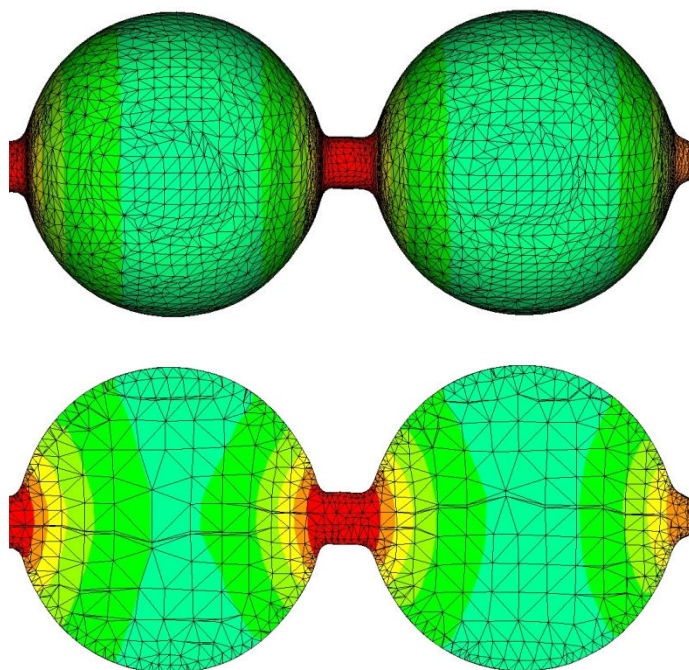
pierwszej fazy procesu, gdy klinowe kołnierze zagłębiają się w materiał, obserwuje się największe odkształcenia plastyczne. Są one efektem osiowego przemieszczania materiału przez rozszerzające się powierzchnie boczne klinów. W kolejnych fazach walcowania odkształcenia, których doznaje półfabrykat są znacznie mniejsze.



Rys. 4.9. Progresja kształtu kuli wyznaczona numerycznie w trakcie symulacji walcowania w trójzwojnych wykrojach śrubowych

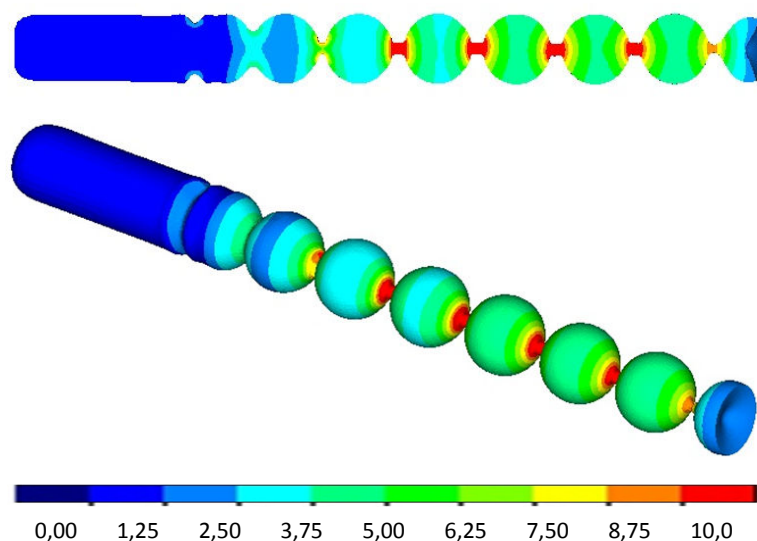
Gniot na materiał wywierany jest jedynie przez stosunkowo wąskie kołnierze narzędzi w obszarach szyjek łączących kształtowane kule. W pozostałych obszarach materiał pły-

nie łagodnie, stopniowo wypełniając wykrój i przybierając kształt kuli. W pełni ukształtowaną kulę otrzymuje się praktycznie już po jednym obrocie narzędzi (po czasie około $t = 1$ s), która w kolejnych wykrojach nie podlega już odkształceniom, a jedynie kalibrowaniu. Wyznaczony numerycznie kształt kul jest poprawny, wolny od wad i deformacji (rys. 4.10). Materiał w każdym punkcie przylega do powierzchni bocznych wykroju. Tym samym można stwierdzić, iż opracowane rozwiązanie z dużym prawdopodobieństwem pozwoli na prawidłowe ukształtowanie kul. Z uwagi na trudności natury numerycznej, w symulacjach nie zrealizowano procesu całkowitego rozdzielenia kul, które pozostawiały połączone ze sobą za pomocą szyjek (mostków).



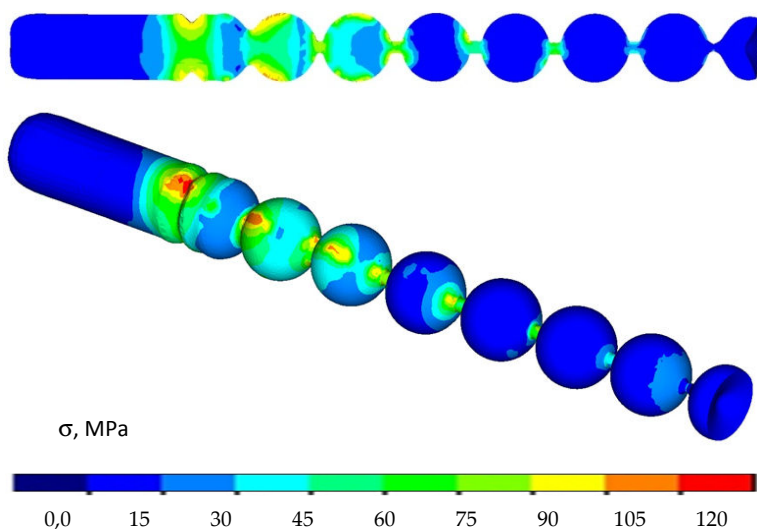
Rys. 4.10. Wyznaczony numerycznie kształt kul walcowanych w trójzwojnych wykrojach śrubowych

Na kolejnym rysunku 4.11 pokazano rozkłady intensywności odkształcenia półfabrykatu podczas jego walcowania. Maksymalne odkształcenia plastyczne zlokalizowane są w obszarach łączników, gdzie występuje największy przerób plastyczny materiału. Jest to charakterystyczne dla procesów walcowania skośnego kul, w których nacisk na półfabrykat wywierany jest przez kołnierze wykrojów. Dlatego też obserwuje się dość dużą niejednorodność odkształceń plastycznych w przekroju odwalcowanych półfabrykatów. Pomijając obszary mostków łączących, które doznają silnych odkształceń, można zaobserwować w warstwach przypowierzchniowych kul większy przerób plastyczny, niż w obszarach centralnych. Jest to efektem obwodowego płynięcia materiału w wyniku oddziaływania sił tarcia, które traktuje się jako odkształcenia zbędne, nie powodujące zmiany kształtu półfabrykatu.



Rys. 4.11. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju i na powierzchni walcowanych kul wyznaczony po czasie $t = 2,33$ s

Kolejny rysunek 4.12 przedstawia rozkłady naprężeń zredukowanych, które wyznaczono w trakcie symulacji walcowania kul w trójzwojnych narzędziach śrubowych.

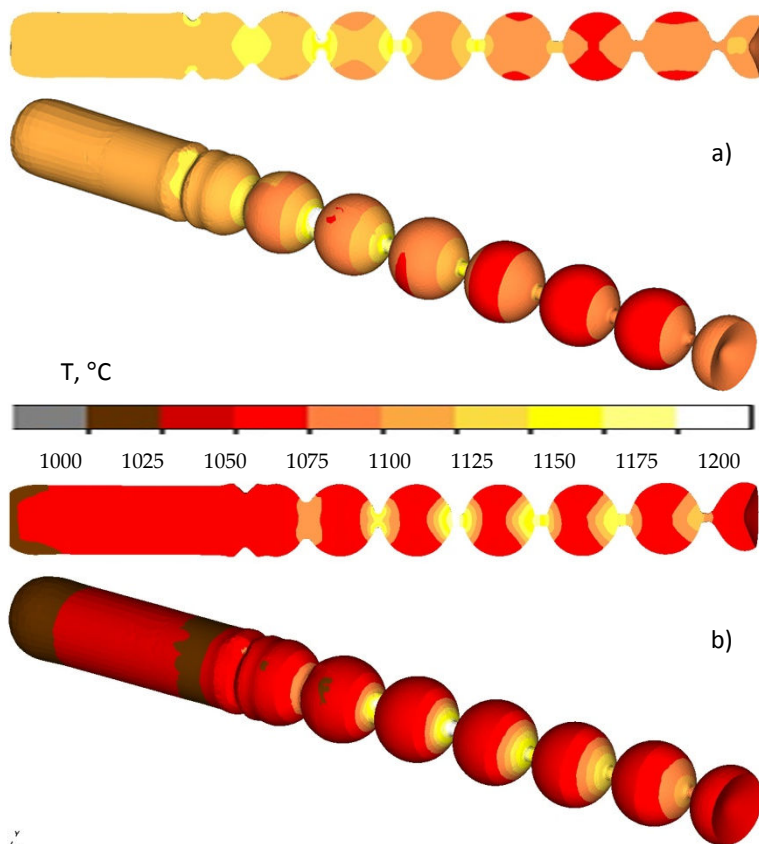


Rys. 4.12. Rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju i na powierzchni walcowanych kul wyznaczony po czasie $t = 2,33$ s

Cechą charakterystyczną wyznaczonych rozkładów jest lokalna koncentracja maksymalnych naprężeń w obszarach styku narzędzi z walcowanym półfabrykatem. Przy czym

największe wartości naprężeń (około 120 MPa) występują w strefach przypowierzchniowych i w miarę zbliżania się do osi wyrobu wartości te ulegają zmniejszeniu. Natomiast w obszarach ukształtowanych kul naprężenia zredukowane spadają do zera. Rotacyjny proces kształtowania powoduje, że strefy największych naprężeń przemieszczają się obrotowo wraz z walcowanym półfabrykatem. Stosunkowo niewielkie wartości naprężeń zredukowanych pozwalają przypuszczać, że w trakcie realizacji procesu nie powinno zachodzić zjawisko przedwczesnego zużycia się narzędzi w wyniku ich nadmiernego obciążenia.

Cechą charakterystyczną procesu walcowania skośnego kul jest stosunkowo długi czas kontaktu nagrzanego półfabrykatu ze znacznie chłodniejszymi narzędziami. W efekcie może dochodzić do nadmiernego studzenia kształtowanego półfabrykatu, co niekorzystnie wpływa na przebieg walcowania. Dlatego też w trakcie symulacji numerycznych analizowano również rozkłady parametrów termicznych, na podstawie których prognozowano temperaturę ukształtowanych wyrobów (rys. 4.13).



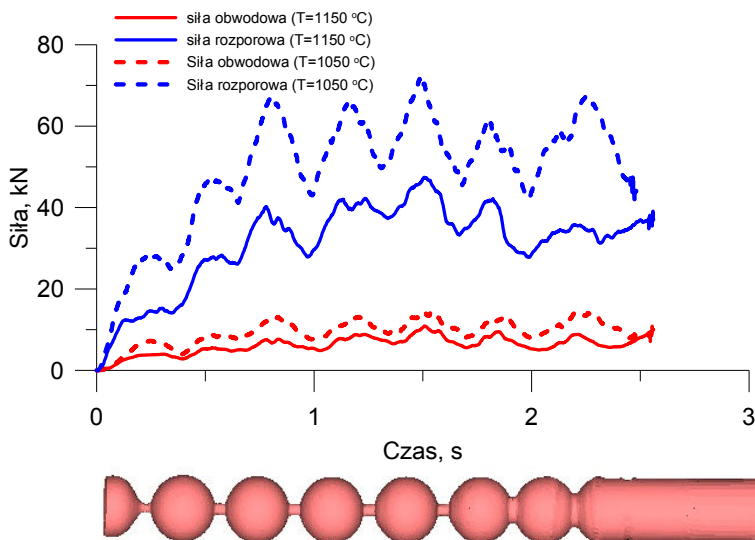
Rys. 4.13. Rozkład temperatury wyznaczony w symulacjach procesu walcowania kul w trójzwojnych wykrojach śrubowych po czasie $t = 2,33$ s: a) dla półfabrykatu nagrzanego do temperatury początkowej $T = 1150$ °C, b) dla $T = 1050$ °C

W rzeczywistym procesie walcowania niezmiernie trudno jest utrzymać stałą i jednakową wartość temperatury początkowej półfabrykatów. Dlatego też symulacje numeryczne procesu prowadzono przy dwóch różnych temperaturach początkowych zastosowanych wsadów (1150 °C oraz 1050 °C). Miało to bezpośredni wpływ na wartość temperatury oraz jej rozkład w ukształtowanych odkuwkach kul. Charakterystyczne jest to, że materiał utrzymuje w swej objętości stosunkowo wysoką wartość temperatury. Natomiast zaobserwowane spadki temperatury są stosunkowo niewielkie (około 75 °C) i mają charakter powierzchniowy. Jest to efektem odprowadzania ciepła z materiału do znacznie chłodniejszych narzędzi. Natomiast w obszarach, które podlegają największym odkształceniom plastycznym można zaobserwować wzrost temperatury ponad wartość początkową (do około 1200 °C). Wysokie wartości temperatury, a nawet jej wzrost (pomimo długiego czasu kontaktu materiału z chłodniejszymi narzędziami) są efektem generowania ciepła w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. Temperatura ukształtowanych kul dla obu analizowanych przypadków jest na tyle wysoka by bezpośrednio po walcowaniu możliwe było przeprowadzenie procesu ich hartowania.

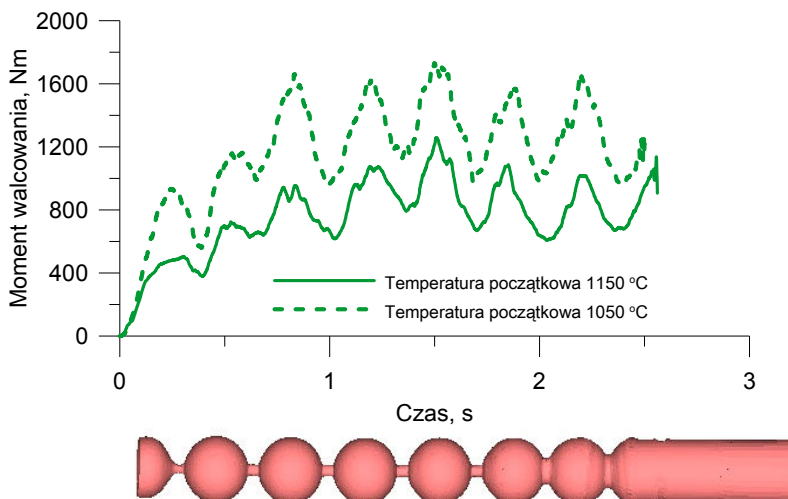
Zastosowanie technik numerycznych w analizie procesów plastycznego kształtowania metali umożliwia stosunkowo trafne oszacowanie parametrów siłowych, których znajomość jest niezbędna w trakcie konstruowania narzędzi oraz opracowywania technologii. Dlatego też podczas obliczeń numerycznych kształtowania kul w wielozwojnych wykrojach śrubowych analizowano przebiegi sił i momentów walcowania, które następnie zestawiono w formie wykresów. Rozkłady siły stycznej (wciskającej narzędzie) i rozporowej (prostopadłej do powierzchni kalibrującej narzędzia), działających na jeden z walców, przedstawiono na rys. 4.14. Parametry siłowe wyznaczono dla procesu walcowania półfabrykatów o początkowych temperaturach 1150 °C oraz 1050 °C. Cechą charakterystyczną zarejestrowanych sił jest ich oscylacyjny przebieg, który wynika bezpośrednio ze specyfiki procesu. Co 1/3 obrotu walców, klinowe kołnierze wykrojów wcinają się we wsad oddzielając od niego objętość materiału równą objętości kuli i łączącej sztyki. Powoduje to cykliczny wzrost sił. Następnie materiał w dalszej części wykroju śrubowego jest przekształcany w kulę, czemu odpowiadają malejące wartości sił. Istotny wpływ na wartość parametrów siłowych ma temperatura początkowa wsadu. Obniżenie temperatury nagrzewania półfabrykatu o 100 °C (z 1150 °C do 1050 °C) powoduje wzrost oporów odkształcenia plastycznego metalu, który przekłada się na wzrost sił walcowania. Przy czym stosunkowo niewielkie obniżenie temperatury wsadu (o blisko 9%) powoduje znaczny wzrost sił, który sięga 50%. Należy tutaj również wspomnieć, że siły styczne są około 4x mniejsze od sił rozporowych. Taką relację wartości sił obserwowano również w trakcie walcowania kul w jednozwojnych wykrojach klinowo – śrubowych.

Charakter rozkładu sił ma swoje odzwierciedlenie w przebiegu momentu walcowania, który przedstawiono na kolejnym rys. 4.15. W początkowym etapie procesu (podczas wcinania się klinowych kołnierzy w półfabrykat), wartości momentu gwałtownie rosną, by po ukształtowaniu pierścieniowego rowka na obwodzie wsadu równie gwałtownie spaść. W ustalonej fazie procesu rozkład momentu jest powtarzalny i nie zwiększa się istotnie. Wartości maksymalne wahają się w zakresie 1200 Nm (dla temperatury początkowej półfabrykatu wynoszącej 1150 °C) oraz 1700 Nm (dla półfabrykatu

nagrzanego do 1050 °C). Stanowi to około 20% momentu nominalnego maszyny, na której planuje się przeprowadzić weryfikację doświadczalną procesu walcowania kul.



Rys. 4.14. Rozkłady sił wyznaczone numerycznie w symulacjach procesu walcowania skośnego narzędziami wielozwojnymi

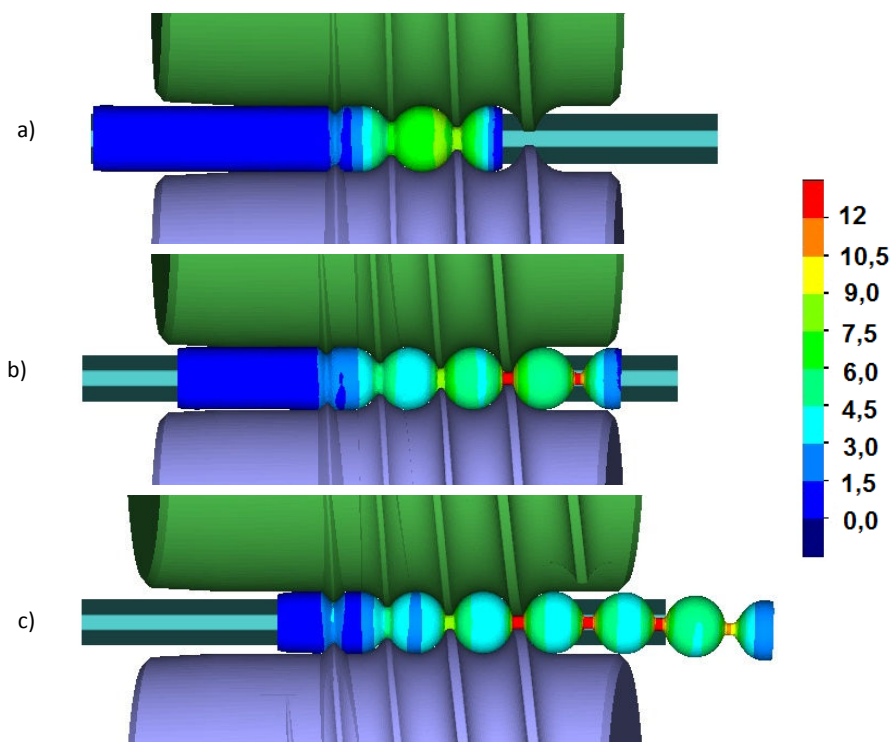


Rys. 4.15. Rozkłady momentu wyznaczone numerycznie w symulacjach procesu walcowania skośnego narzędziami wielozwojnymi

4.2.2. Wpływ liczby zwojów narzędzi śrubowych na przebieg procesu walcowania

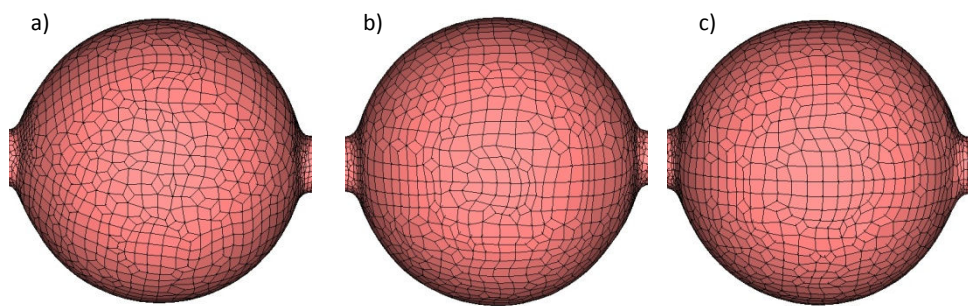
Wraz ze zwiększaniem liczby zwojów narzędzi śrubowych wzrasta proporcjonalnie wydajność procesu. Natomiast zmniejszeniu ulega wkład pracy, jaką trzeba wykonać, aby ukształtować jedną kulę. Dlatego też dzięki zastosowaniu narzędzi wielozwojnych można znacząco obniżyć zużycie energii. Oczywiście liczba kołnierzy śrubowych, które mogą być umieszczone na powierzchni walców, uzależniona będzie od wymiarów gabarytowych narzędzi oraz średnicy kształtowanych wyrobów. Przeprowadzona analiza rynku odnośnie zapotrzebowania na kule jako mielniki dała dość ciekawe rezultaty. Blisko 70% wytwarzanych kul mieści się w przedziale wymiarowym do $\varnothing 50$ mm. W związku z tym już najmniejsze walcarki (średnica walców około 350 mm), produkowane seryjnie umożliwiając zabudowę narzędzi wielozwojnych do kształtowania kul w tym zakresie wymiarowym.

W celu pełnego przeanalizowania wpływu liczby zwojów kołnierzy śrubowych na przebieg procesu walcowania oraz jakość kształtowanych wyrobów, przeprowadzono obliczenia numeryczne, podczas których symulowano proces walcowania kul o średnicy $\varnothing 40$ mm w klinowo-śrubowych wykrojach jednozwojnych, dwuzwojnych oraz trójzwojnych. Na rysunku 4.16 zestawiono zarysy odkuwek kształtowanych w wykrojach wielozwojnych dla zaawansowania procesu wynoszącego $t = 2,25$ s.



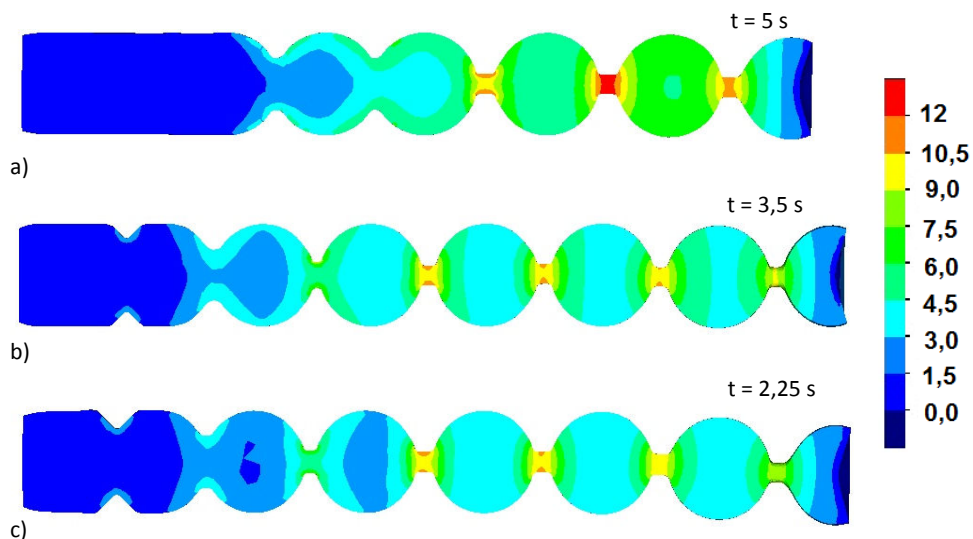
Rys. 4.16. Zarys odkuwek z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, otrzymanych w procesach walcowania skośnego po czasie $t = 2,25$ s dla: a) wykrojów jednozwojnych, b) wykrojów dwuzwojnych, c) wykrojów trójzwojnych

We wszystkich analizowanych przypadkach walce obróciły się o $2\frac{1}{4}$ obrotu, zaś parametry jakie przyjmowano w trakcie symulacji były identyczne jak w procesach opisywanych uprzednio. Widoczne jest, że zastosowanie narzędzi wielozwojnych znacznie podnosi wydajność procesu. Podczas walcowania narzędziami jednozwojnymi, które obracają się z prędkością $n_w = 60$ obr/min, po upływie ponad dwóch sekund, materiał ciągle pozostaje w wykroju, a półfabrykat jeszcze nie jest w pełni ukształtowany. W przypadku zastosowania walców dwuzwojnych, po czasie 2,25 s pierwsza kula opuszcza przestrzeń roboczą narzędzi, zaś dla wykrojów trójzwojnych w tym samym czasie kształtuje się na gotowo trzy półwyroby. Wyznaczony numerycznie kształt kul dla trzech analizowanych wariantów walcowania jest poprawny (rys. 4.17). Zarys kuli został wypełniony przez materiał w zadowalającym stopniu, nie zauważono deformacji kształtu oraz innego rodzaju błędów.



Rys. 4.17. Wyznaczony numerycznie kształt kul walcowanych skośnie w wykrojach: a) jednozwojnych, b) dwuzwojnych, c) trójzwojnych

Rozkłady odkształceń, które wyznaczono dla trzech wariantów walcowania skośnego (w wykrojach jednozwojnych, dwuzwojnych oraz trójzwojnych), przedstawiono na rysunku 4.18. Widoczne jest, że w przypadku kształtowania kul w wykrojach jednozwojnych wartości odkształceń są znacznie większe od zaobserwowanych w trakcie walcowania odkuwek w narzędziach dwu- lub trójzwojnych. Przy czym im większa krotność wykrojów śrubowych, tym odkształcenia są mniejsze i bardziej jednorodne. Taki charakter odkształceń związany jest bezpośrednio z długością drogi, na której dokonuje się ukształtowane odkuwki. W przypadku wykrojów wielozwojnych, droga potrzebna do nadania odkuwce kształtu sferycznego jest znacznie krótsza od tej, na której zostaje ukształtowany wyrób podczas walcowania w narzędziach jednozwojnych. W efekcie praca sił tarcia powodująca odkształcenia obwodowe (zbędne, nie wpływające na zmianę kształtu półfabrykatu) jest znacznie większa dla tych procesów, w których odkuwka kształtowana jest na dłuższej drodze. Charakterystyczny jest również fakt, że dla trzech analizowanych przypadków walcowania, największych odkształceń doznaje obszar szyjek łączących kule, co jest zgodne z wytycznymi odnośnie projektowania narzędzi i potwierdza poprawność opracowanych konstrukcji.

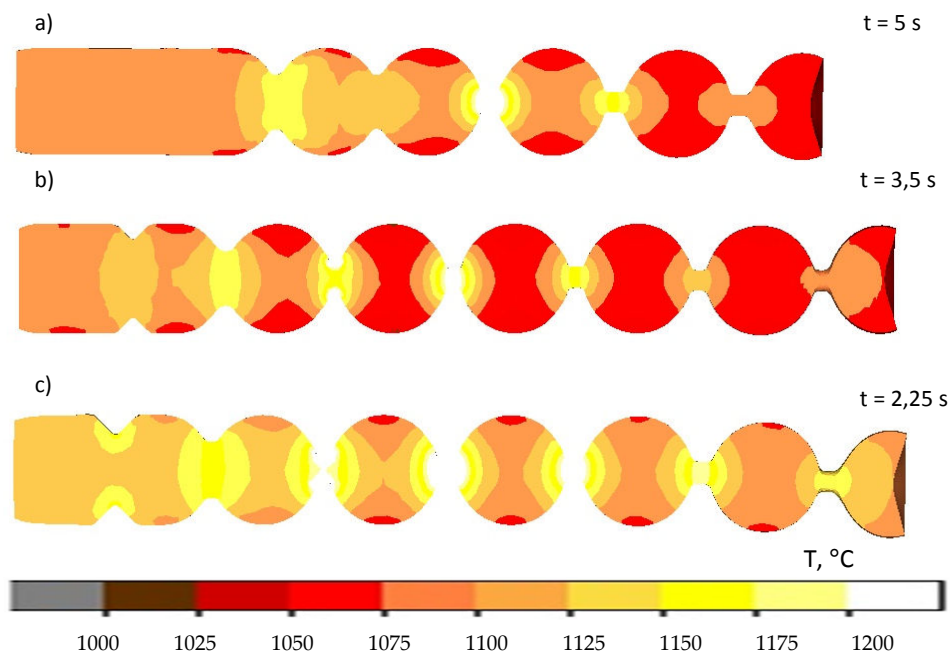


Rys. 4.18. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju wzdłużnym odkuwek kul walcowanych skośnie: a) w wykrojach jednozwojnych, b) w wykrojach dwuzwojnych, c) w wykrojach trójzwojnych

W wyniku kontaktu gorącego materiału ze znacznie chłodniejszymi walcami, część ciepła zostaje przekazana do narzędzi, a część rozproszona do otoczenia. Powoduje to spadek temperatury półfabrykatów. Przy czym mogło by się wydawać, że dla procesu realizowanego w dłuższym czasie, spadek temperatury powinien być znacznie większy. Spostrzeżenie to było by słuszne, gdyby nie ciepło dostarczane do materiału, powstałe w wyniku odkształcenia plastycznego oraz tarcia. Ostatecznie spowalnia to spadek temperatury kształtowanego materiału, a nawet powoduje jej wzrost. Parametry termiczne wyrobów kształtowanych w wykrojach wielozwojnych pokazano na rys. 4.19. Widoczne jest, że we wszystkich przypadkach kule mają wysoką wartość temperatury (powyżej 1000°C), a w okolicach szyjek łączących kule, obserwuje się dość duży wzrost temperatury (do około 1200°C). Przy tym wartości temperatury kształtowanych półfabrykatów w narzędziach jednozwojnych są wyższe w stosunku do zaobserwowanych podczas walcowania kul w wykrojach dwuzwojnych, pomimo znacznie dłuższego czasu trwania procesu. Można to tłumaczyć większą pracą odkształcenia plastycznego oraz dłuższą drogą walcowania kul, w wyniku czego generuje się znacznie większe ilości ciepła. Najmniejsze spadki temperatury występują podczas walcowania kul w trójzwojnych wykrojach śrubowych (rys. 4.19c), co można wyjaśnić znacznie krótszym czasem kształtowania w stosunku do dwóch poprzednich procesów.

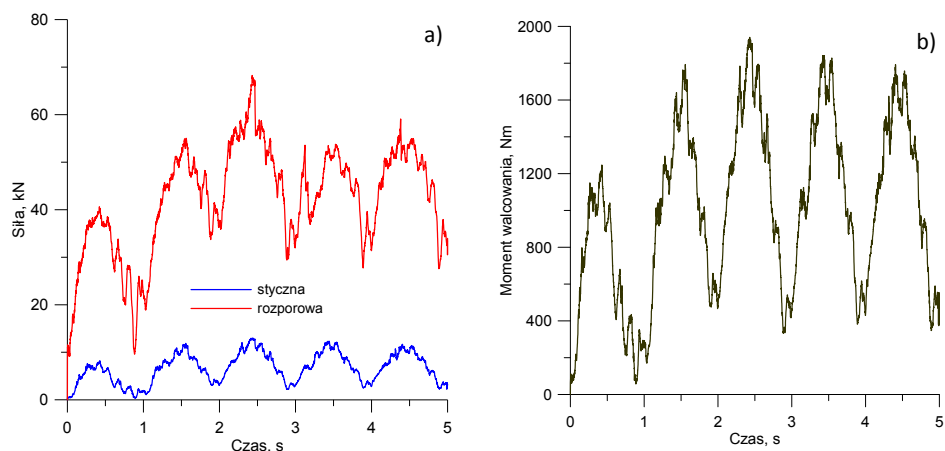
Korzyści płynące z kształtowania odkuwek kul w wykrojach wielozwojnych w pełni można dostrzec analizując zestawienie parametrów siłowych procesu walcowania w narzędziach jedno- i wielozwojnych. Przebiegi sił i momentów walcowania dla trzech rozważanych wariantów walcowania pokazano na rys. 4.20 – 4.22. Podobnie jak to miało miejsce dla procesów rozważanych w poprzednich rozdziałach (walcowanie w śrubowych wykrojach tradycyjnych oraz wykrojach śrubowo-klinowych), cechą charaktery-

styczną wyznaczonych przebiegów są cyklicznie powtarzające się oscylacje wartości sił i momentów. Związane jest to z okresowym zagłębianiem się śrubowych powierzchni klinowych narzędzi we wsad. Widoczne jest, że częstotliwość oscylacji sił i momentów zwiększa się wraz ze wzrostem krotności wykrojów śrubowych, wykonanych na narzędziach (przy takich samych prędkościach obrotowych narzędzi).

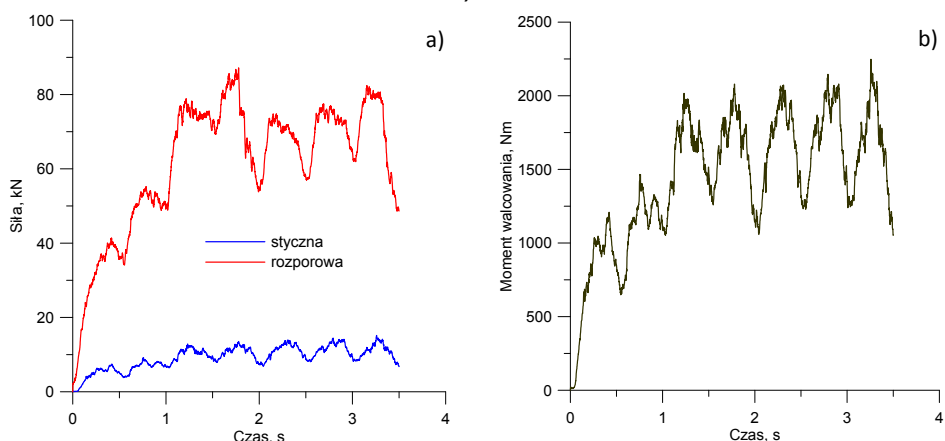


Rys. 4.19. Rozkład temperatury w przekroju wzdłużnym odkuwek kul walcowanych skośnie: a) w wykrojach jednozwojnych, b) w wykrojach dwuzwojnych, c) w wykrojach trójzwojnych

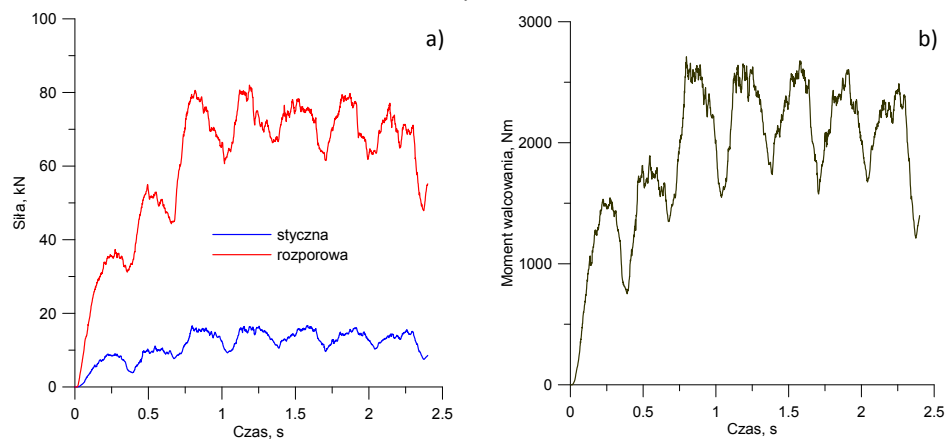
Natomiast amplituda oscylacji wartości sił i momentów zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby wykrojów śrubowych. Wpływa to w istotny sposób na podniesienie stabilności przebiegu procesu kształtowania oraz trwałości narzędzi i urządzenia. Analizując wartości ekstremalne sił, można zauważyć, że zwiększenie wydajności procesu o 100% (walcowanie w wykrojach dwuzwojnych) powoduje 50% wzrost siły stycznej. Podczas walcowania w wykroju trójzwojnym (wydajność zwiększa się o 200%), wzrost siły stycznej sięga 100%. Natomiast siły rozporowe dla trzech analizowanych wariantów walcowania zmieniają się w znacznie mniejszym stopniu (zaobserwowany wzrost sił waha się w granicach 10%). Podobną tendencję obserwuje się dla momentów walcowania. Jednak w tym przypadku wartości maksymalne momentu walcowania wzrastają o około 20% dla wykrojów dwuzwojnych i o 40% dla wykrojów trójzwojnych (w stosunku do kształtowania narzędziami jednokrotnymi). Należy zatem zaznaczyć, że zwiększenie wydajności procesu o 200% powoduje jedynie 40% wzrost momentu obrotowego. Jest to cecha szczególnie korzystna, która pozwala na podniesienie wydajności procesu oraz obniżenie zużycia energii.



Rys. 4.20. Przebieg sił – a) i momentu walcowania –b) kształtowania kul w wykrojach jednozwojnych



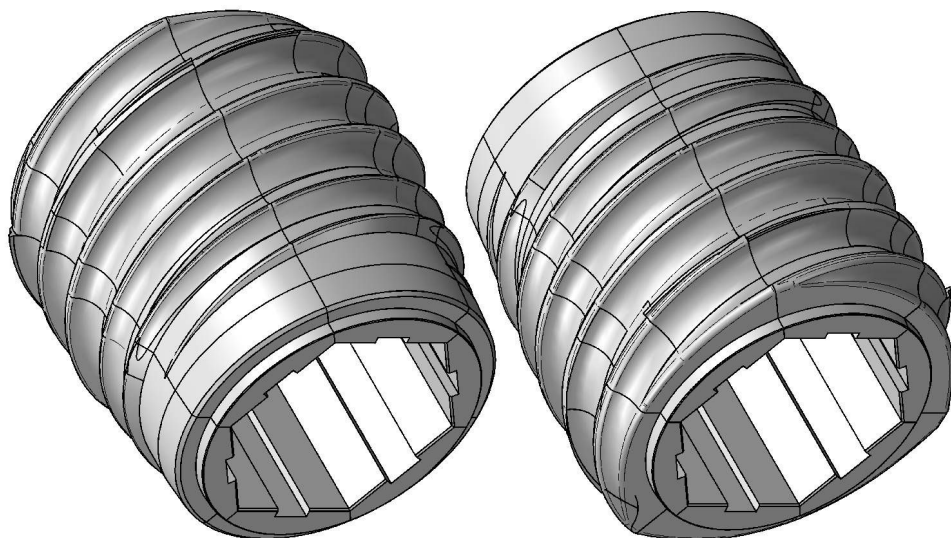
Rys. 4.21. Przebieg sił – a) i momentu walcowania –b) kształtowania kul w wykrojach dwuzwojnych



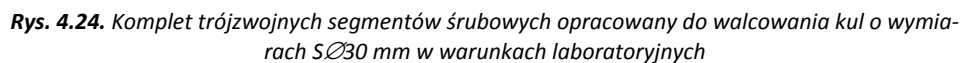
Rys. 4.22. Przebieg sił – a) i momentu walcowania –b) kształtowania kul w wykrojach trójzwojnych

4.3. Próby walcowania

Celem zweryfikowania wyników symulacji numerycznych i ostatecznego potwierdzenia opracowanej metody kształtowania, przeprowadzono próby doświadczalne walcowania skośnego kul o wymiarach $S\varnothing 30$ mm. Do badań wykorzystano dwuwalcową walcarkę skośną, która zainstalowana jest w Katedrze Plastycznej Przeróbki Metali Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie. W oparciu o przedstawioną metodykę projektowania narzędzi opracowano trójzwojne segmenty narzędziowe, umożliwiające realizację procesu walcowania skośnego kul o wymiarach $S\varnothing 30$ mm. Modele 3D narzędzi śrubowych z wykrojami trójzwojnymi pokazano na rys. 4.23. W trakcie projektowania narzędzi uwzględniono warunki konstrukcyjne walcarki, na której planowano przeprowadzić barania, co wiązało się z ograniczeniem wymiarów gabarytowych walców. W rezultacie maksymalna średnica robocza walca mogła wynosić $\varnothing 220$ mm, a długość beczki walca nie mogła przekraczać $L = 260$ mm. Dokumentację konstrukcyjną opracowanych segmentów trójzwojnych narzędzi śrubowych przedstawiono na rys. 4.24. Narzędzia posiadają budowę segmentową. Wykroje robocze każdego z walców tworzy sześć segmentów narzędziowych, wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco. Segmenty mocowane są do wałów walcarki, dzięki czemu w łatwy sposób możliwe jest przebrojenie walcarki w narzędzia o innych parametrach. Na powierzchni segmentów wykonane są kształtowe bruzdy rozdzielone trójzwojnymi kołnierzami śrubowymi. Proces walcowania skośnego kul wymaga zastosowania dodatkowego oprządkowania, którego zadaniem jest pozycjonowanie wsadu w przestrzeni roboczej. W tym celu zaprojektowano dwie prowadnice, które mocowane są do korpusu walcarki.

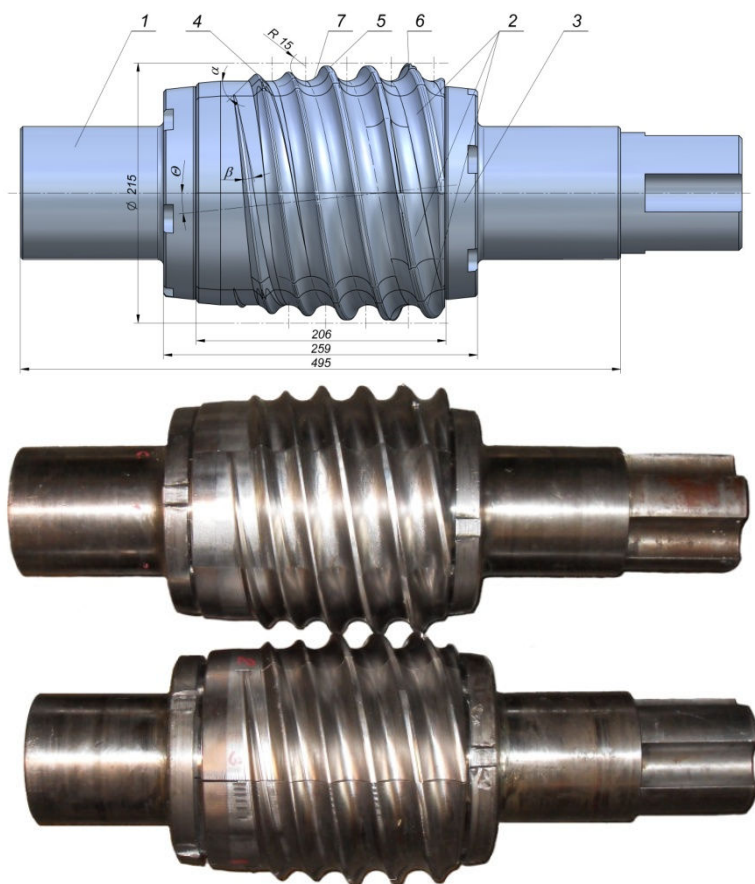


Rys. 4.23. Przestrzenny model trójzwojnych segmentów śrubowych opracowany do walcowania kul o wymiarach $S\varnothing 30$ mm w warunkach laboratoryjnych



4. Walcowanie śrubowo-klinowe w wykrojach wielozwojnych

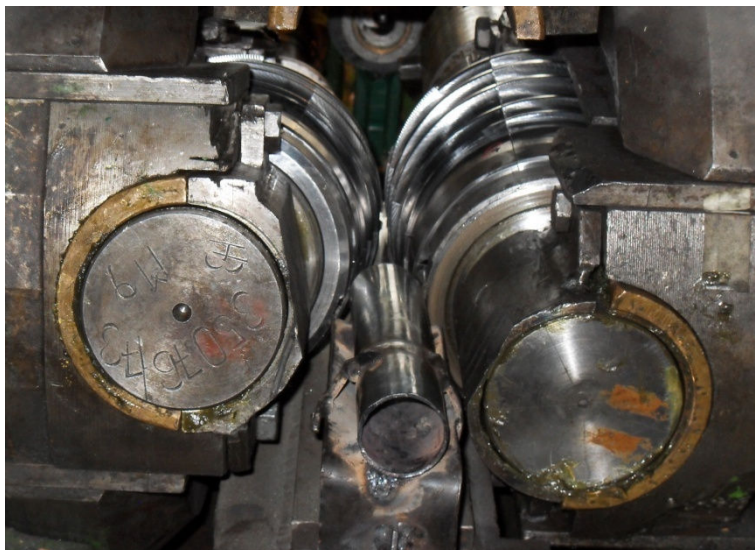
Na podstawie opracowanej dokumentacji konstrukcyjnej, wykonano narzędzia, do weryfikacji doświadczalnej procesu walcowania kul w wielozwojnych wykrojach śrubowych. Kształt narzędzi, wykorzystanych podczas badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 4.25. Wykroje robocze każdego z walców tworzy sześć segmentów narzędziowych - 2, wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco w gatunku 55NiCrMoV7 (WNL wg PN). Segmenty mocowane są do wałów - 1 walcarki za pomocą dwóch czołowych nakrętek - 3. Na powierzchniach segmentów - 2 wykonane są kształtowe bruzdy - 7 rozdzielone kołnierzami - 5 o wklęsłych powierzchniach bocznych. W strefie wcinania wykonane są klinowe występy śrubowe - 4, o kącie rozwarcia klina $\beta = 4^\circ$ i kącie pochylenia ścianek bocznych $\alpha = 45^\circ$. Noże - 6 odcinające szypki od ukształtowanych kul umieszczono na ostatnich kołnierzach narzędzi.



Rys. 4.25. Zestawy trójzwojnych segmentów śrubowo-klinowych, wykonanych do walcowania kul $S\varnothing 30$, zamocowane na wałach walcarki (opis w tekście)

Wykonane narzędzia śrubowe zabudowano w przestrzeni roboczej walcarki (rys. 4.26). Walce zostały skrócone pod kątem $\theta = 6^\circ$ w stosunku do osi walcowania. Wały maszyny, na których mocowano wielozwojne segmenty śrubowe, podparte są

dwustronnie w łożyskach ślizgowych, znajdujących się w uchwytach łożyskowych. Uchwyty łożyskowe osadzone są przesuwnie w korpusie walcarki i mają możliwość obrotu dookoła osi poziomej prostopadłej do osi walcowania w zakresie $\pm 15^\circ$. Dodatkowo każdy z uchwytów wraz z zamocowanym walcem może być dosuwany lub odsuwany od osi walcowania. Przy czym przesuw obu łożysk może odbywać się niezależnie, przy pomocy ustawczych mechanizmów śrubowych, lub jednocześnie w wyniku wzajemnego sprzęgnięcia dwóch śrub ustawczych.

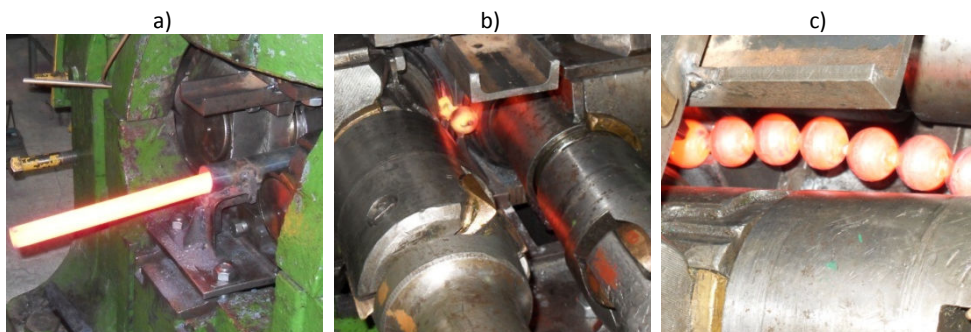


Rys. 4.26. Przestrzeń robocza walcarki skośnej uzbrojona w walce trójzwojne do walcowania kul $\varnothing 30$ (ze zdemontowaną prowadnicą górną)

Wsady wykorzystane w trakcie walcowania stanowiły pręty stalowe w gatunku C45 oraz 100Cr6 (ŁH15 wg PN) o średnicy $\varnothing 30$ mm i długości około 300 mm. Półfabrykaty nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około 1150°C oraz 1050°C , a następnie wprowadzano je za pomocą kleszczy do podajnika pozycjonującego położenie wsadu w przestrzeni roboczej walcarki (rys. 4.27a). Wsad uchwycony przez części stożkowe walców wprawiany był w ruch obrotowy i wciągany samoczynnie między walce, gdzie w wyniku oddziaływania śrubowych kołnierzy następowało kształtowanie kul (rys. 4.27b). Odwalcowane kule odprowadzane były z drugiej strony walcarki do specjalnie przygotowanej wanny (rys. 4.27c). Podczas walcowania materiał był utrzymywany w przestrzeni roboczej za pomocą prowadnic umieszczonych pomiędzy walcami. W trakcie procesu walce obracały się w tym samym kierunku ze stałą prędkością $n_w = 60$ obr/min.

W rezultacie przeprowadzonych badań odwalcowano w trójzwojnych walcach śrubowych kilka zestawów kul o średnicy $\varnothing 30$ mm, których przykładowy kształt pokazano na rysunku 4.28. Ukształtowane kule charakteryzowały się stosunkowo dokładnym zarysem kołowym zarówno w płaszczyźnie prostopadłej do osi walcowania jak i w płaszczyź-

nie przechodzącej przez oś walcowania. Nie zaobserwowano pęknięć, czy wad w postaci deformacji odwalcowanych półfabrykatów.



Rys. 4.27. Przebieg procesu walcowania skośnego kul w trójzwojnych wykrojach śrubowo-klinowych: a) wprowadzanie wsadu do podajnika walcarki; b) walcowanie kul; c) odwalcowane kule, połączone ze sobą sztykami, opuszczają przestrzeń roboczą walcarki



Rys. 4.28. Kule odwalcowane w trakcie badań laboratoryjnych trójzwojnym wykroju śrubowym, opracowanym w Politechnice Lubelskiej

Część odwalcowanych kul charakteryzuje się niewielkim niewypełnieniem zarysu (około 0,2 – 0,3 mm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi odkuwki, przechodzącej przez oś walcowania (rys. 4.29) (kształtem przypominające obwodową rysę). Przyczyną takiego zjawiska było nadmierne rozsuniecie walców od osi walcowania. W efekcie objętość materiału zamknięta w wykroju była zbyt mała aby całkowicie wypełnić zarys półfabrykatu. Nadmierne rozsuniecie narzędzi było również przyczyną niecałkowitego rozdzielenia ukształtowanych kul, które pozostawały połączone ze sobą sztykami obustronnie nadciętymi przy powierzchniach ukształtowanych półfabrykatów. Przy czym odwalcowane kule dawały się w łatwy sposób rozdzielić od siebie. Zaobserwowane niewypełnienie wykroju nie ma jednak istotnego wpływu na dokładność ukształtowanych wyrobów. Zgodnie z Polską Normą PN-H-94057:1998 dokładność wykonania kul przez walcowanie, które stosuje się w młynach kulowych wynosi ± 3 mm. Zaś uzyskana jakość

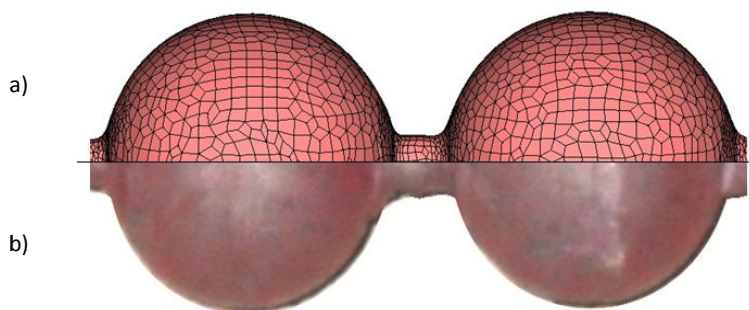
i dokładność jest znacznie wyższa od wymaganej w przypadku wykorzystania kul na mielniki.



Rys. 4.29. Kule ukształtowane w procesie walcowania w wielozwojnych wykrojach śrubowych połączone ze sobą za pomocą szyjek z widocznym niewielkim wypełnieniem zarysu

Dodatkowo, powstałe mankamenty w dużym stopniu ograniczono dzięki poprawnemu ustawieniu narzędzi (zsunięciu walców). Dlatego też uzyskana dokładność pozwala przypuszczać, że tak ukształtowane wyroby mogą być z powodzeniem stosowane jako półfabrykaty elementów tocznych łożysk.

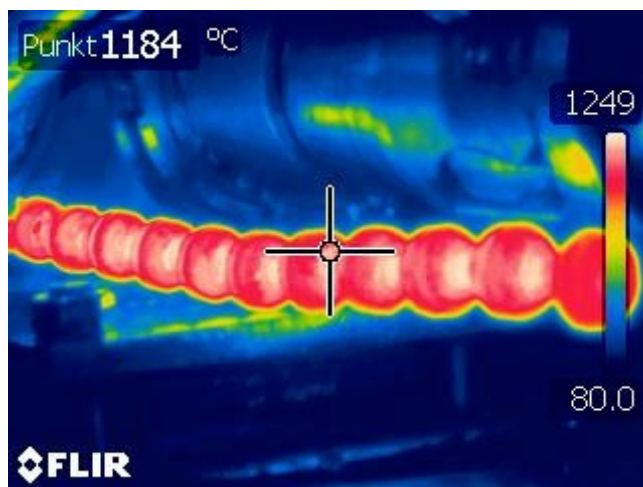
Na kolejnym rysunku 4.30 zestawiono kształt kul wyznaczony numerycznie w trakcie symulacji z zarysem wyrobów ukształtowanych podczas prób doświadczalnych. Cechą charakterystyczną jest duża zgodność wyników teoretycznych z doświadczalnymi. W obu przypadkach kształt uzyskanych kul jest poprawny, a półfabrykaty są ze sobą połączone za pomocą szyjek, które w dość łatwy sposób dają się oddzielić od odwalcowanych kul.



Rys. 4.30. Zarys półfabrykatów kul $S\varnothing 30$: a) wyznaczony numerycznie, b) otrzymany podczas prób doświadczalnych

Duże znaczenie na prawidłowy przebieg procesu walcowania ma wartość temperatury wsadu oraz wyrobu w końcowym etapie kształtowania. Jest to szczególnie istotne z uwagi na stosunkowo długi czas kontaktu gorącego materiału z chłodnymi narzędziami (kilka sekund). Zbyt duży spadek temperatury może powodować wzrost oporów pla-

stycznego płynięcia metalu, co wiąże się z nadmiernym obciążeniem narzędzi oraz utrudnionym wypełnianiem wykroju przez metal. Natomiast zbyt duża temperatura początkowa (nagrzewania półfabrykatu), przyspiesza utlenianie się wsadu oraz powoduje rozrost ziaren. Również często bezpośrednio po procesie walcowania poddaje się ukształtowane kule obróbce cieplnej (hartowaniu), wykorzystując temperaturę końcową odwalcowanych półfabrykatów. Dlatego też ważnym zagadnieniem jest możliwość określenia a następnie kontrolowania parametrów termicznych procesu. W trakcie procesu walcowania rejestrowano rozkład temperatury na powierzchni ukształtowanych kul przy pomocy kamery termowizyjnej (rys. 4.31). Cechą charakterystyczną otrzymanych rozkładów termicznych ukształtowanych kul jest duża zbieżność z wynikami uzyskanymi z symulacji numerycznych. Pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania (wynoszącego blisko 10 sekund) materiał w trakcie walcowania utrzymywał stosunkowo wysoką wartość temperatury, a nawet temperatura odwalcowanych kul była wyższa od temperatury początkowej wsadu. Przyczyna tego faktu tkwiła w rekompensowaniu strat ciepłych (wynikających z odprowadzenia ciepła do narzędzi i otoczenia) przez ciepło generowane w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia.

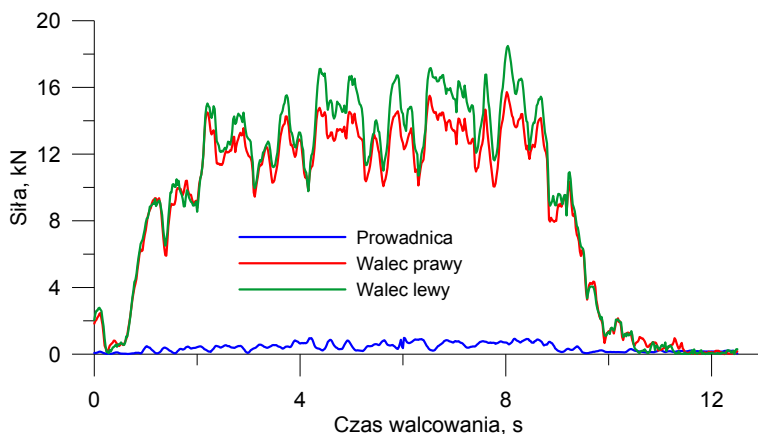


Rys. 4.31. Pomiar temperatury odwalcowanych kul opuszczających przestrzeń roboczą walcarki

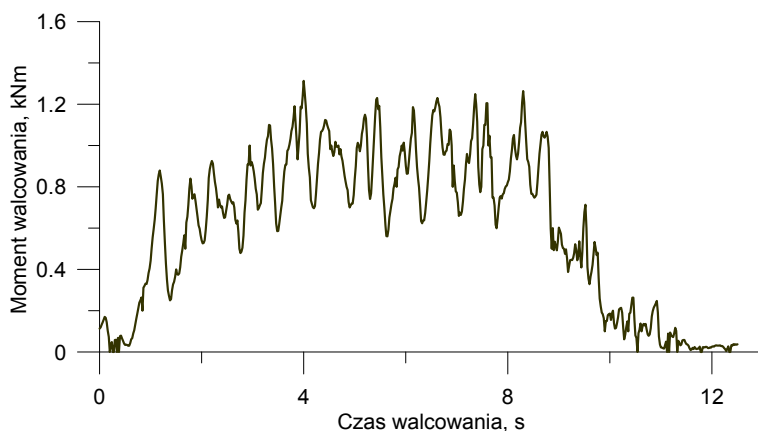
Należy tutaj zaznaczyć, że temperatura wyrobów (ponad 1100 °C) jest zbyt wysoka do bezpośredniego ich hartowania i podczas przemysłowej realizacji procesu walcowania, wymagane jest zastosowanie powolnego chłodzenia ukształtowanych kul do temperatury hartowania (około 850 – 900 °C). W przeciwnym przypadku może dochodzić do pękania ukształtowanych wyrobów.

W trakcie prowadzonych badań monitorowano również parametry siłowe procesu, a uzyskane wyniki zestawiono w formie wykresów, które przedstawiono na kolejnych rysunkach 4.32 – 4.35. Cechą charakterystyczną zarejestrowanych sił (rys. 4.32 i 4.34) oraz momentów (rys. 4.33 i 4.35) jest ich oscylacyjny przebieg, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi podczas symulacji numerycznych. Cyklicznie powtarzające się skoki wartości parametrów siłowych mają swoje odzwierciedlenie w specyfice procesu. Zagłębianie się

początkowych zwojów kołnierzy w materiał powoduje gwałtowny wzrost sił i momentów, które następnie szybko spadają po ukształtowaniu na obwodzie półfabrykatu pierścieniowego rowka. Dla wykrojów trójzwojnych, w czasie jednego pełnego obrotu wałców, cykl powtarza się trzy razy.



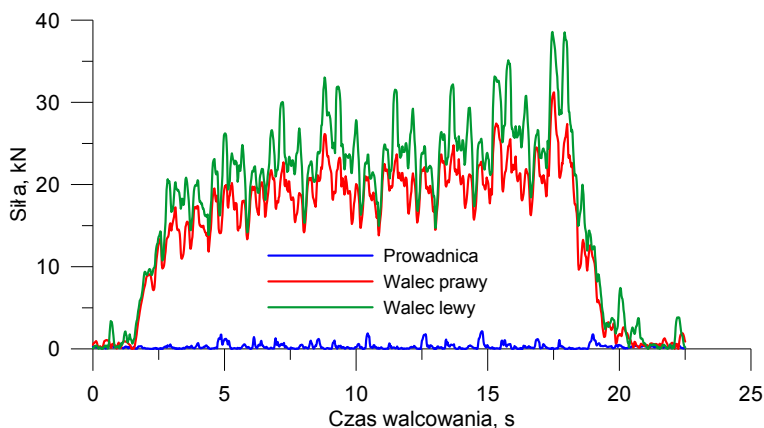
Rys. 4.32. Rozkłady sił działających na narzędzia w procesie walcowania półwyrobów kul ze stali w gatunku 100Cr6, trójzwojnymi wałcami śrubowymi (temperatura początkowa 1150 °C)



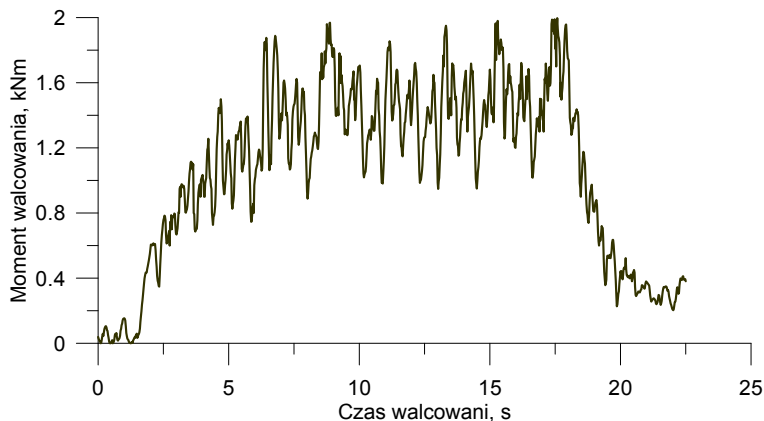
Rys. 4.33. Rozkłady momentu walcowania w procesie kształtowania półwyrobów kul ze stali w gatunku 100Cr6, trójzwojnymi wałcami śrubowymi (temperatura początkowa 1150 °C)

Duży wpływ na wartości sił i momentów walcowania ma temperatura początkowa półfabrykatu, do której nagrzewano wsad. Podobnie jak to miało miejsce podczas symulacji numerycznych, również w trakcie prób laboratoryjnych nawet stosunkowo niewielkie obniżenie temperatury wsadu (o 100 °C) powoduje ponad dwukrotny wzrost siły kształtowania (siły rozporowej). Tak dużej różnicy wartości nie obserwuje się w przypadku momentu obrotowego, którego wartość wzrasta o niespełna 20%. Wartości maksymalne sił działających na narzędzia są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają 18 kN

(dla temperatury początkowej półfabrykatu wynoszącej 1150 °C) oraz 35 kN (dla temperatury początkowej półfabrykatu wynoszącej 1050 °C). Również maksymalne wartości momentu obrotowego są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają 1,4 kNm (dla temperatury początkowej półfabrykatu wynoszącej 1150 °C) oraz 2 kNm (dla temperatury początkowej półfabrykatu wynoszącej 1050 °C). Zgodnie z oczekiwaniami również amplituda oscylacji sił i momentów wzrasta wraz ze spadkiem temperatury początkowej wsa-
du. Duże znaczenie na wartości parametrów siłowych ma również ilość materiału zamkniętego w wykroju. Nawet niewielkie przepełnienie wykroju prowadzi do gwałtownego wzrostu sił i momentów. Natomiast niecałkowite wypełnienie wykroju powoduje znaczny spadek tych parametrów. Dlatego też monitorując parametry siłowe w trakcie walcowania można prognozować zjawiska zakłócające proces.



Rys. 4.34. Rozkłady sił działających na narzędzia w procesie walcowania półwyrobów kul ze stali w gatunku 100Cr6, trójzwojnymi walcami śrubowymi (temperatura początkowa 1050 °C)



Rys. 4.35. Rozkłady momentu walcowania w procesie kształtowania półwyrobów kul ze stali w gatunku 100Cr6, trójzwojnymi walcami śrubowymi (temperatura początkowa 1050 °C)

5. Nowe innowacyjne procesy walcowania śrubowego kul

Cechą charakterystyczną przemysłu wykorzystującego kule jest produkcja wielkoseryjna i masowa, co powoduje, że zapotrzebowanie na tego typu elementy jest bardzo duże. Również wymagania odnośnie jakości i wytrzymałości są coraz większe. Dlatego też powszechną tendencją jest udoskonalanie obecnie stosowanych technologii oraz poszukiwanie nowych metod wytwarzania kul, gwarantujących poprawę jakości wyrobów przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji. Spośród wielu technik wytwarzania półfabrykatów kul (skrawanie, odlewanie, kucie matrycowe oraz walcowanie), na szczególną uwagę zasługują procesy walcowania, które umożliwiają kształtowanie wyrobów bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie pręta. Dodatkowo w większości przypadków mogą one przebiegać w sposób ciągły, bez konieczności zatrzymywania narzędzi w celu umieszczenia wsadu w przestrzeni roboczej oraz usuwania ukształtowanych wyrobów. Nie występuje również ruch jałowy narzędzi, który ma miejsce przy innych metodach kształtowania. W efekcie czynniki te wpływają na wysoką sprawność procesu, zaś w połączeniu z innymi zaletami, takimi jak niewielkie straty materiałowe, duża dokładność kształtowanych wyrobów, korzystny układ struktury oraz stosunkowo łatwa automatyzacja, procesy walcowania stają się atrakcyjnymi metodami wytwarzania. W związku z powyższym celowym jest dalsze rozwijanie technik walcowniczych w procesach kształtowania wyrobów i półfabrykatów, które ukierunkowane jest na poprawę jakości oraz podniesienie wydajności procesu.

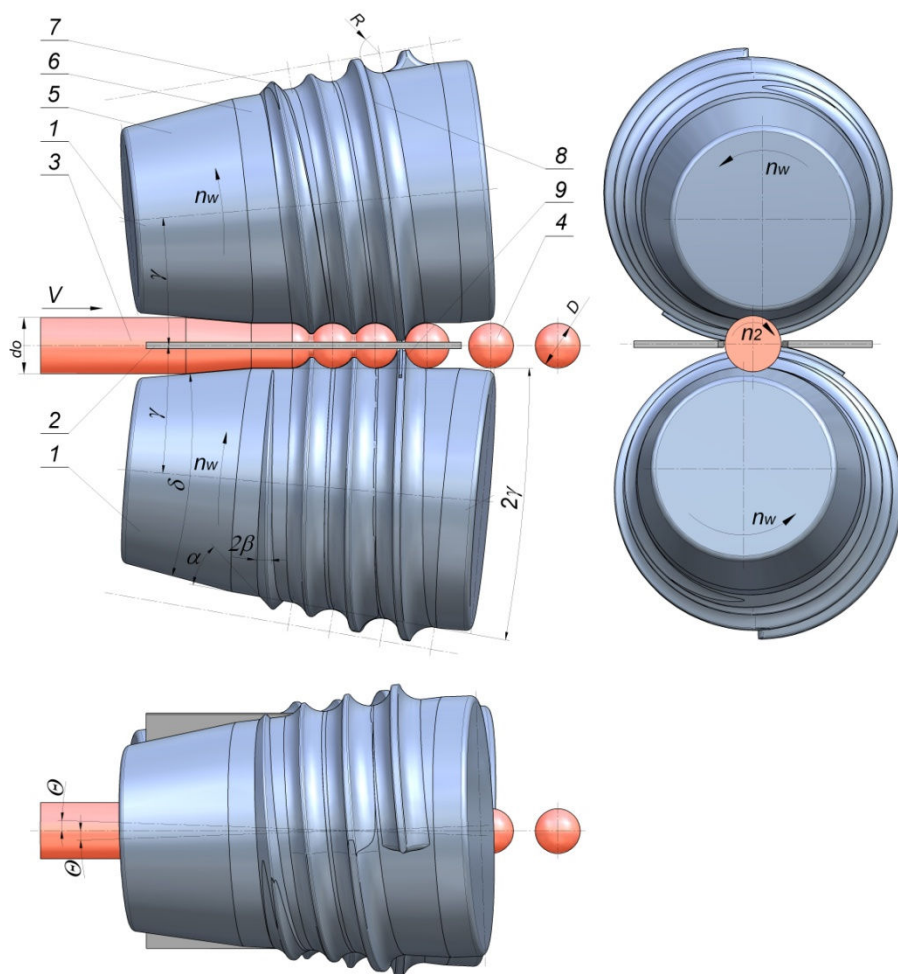
W ramach zrealizowanych prac badawczych nad procesami kształtowania półfabrykatów kul, które prowadzono w Politechnice Lubelskiej, opracowano szereg nowatorskich metod wytwarzania odkuwek kul. W większości przypadków są to technologie walcownicze, bazujące na procesach walcowania poprzeczno-klinowego, skośnego, oraz śrubowo-klinowego (opisane szczegółowo w rozdziałach 2 i 3).

5.1. Walcowanie kul w wykrojach śrubowo-spiralnych

Dotychczas wykorzystywane procesy walcowania kul w walcarkach skośnych wymagają stosowania stosunkowo dokładnego wsadu, którego średnica powinna być zbliżona do wymiaru kształtowanej kuli. Najlepsze wyniki walcowania otrzymuje się, gdy średnica wsadu wynosi około 0,97 średnicy gotowych kul [5]. W związku z tym, przy dużym asortymencie wymiarowym walcowanych kul pojawia się konieczność dysponowania znacznymi zapasami magazynowymi półfabrykatów o dużej rozpiętości wymiarowej, których średnice będą zbliżone do wymiarów kształtowanych odkuwek. Często istnieje również możliwość walcowania kul z materiałów odpadowych (zwłaszcza w przypadku kul stosowanych na mielniki), który jest znacznie tańszy od handlowych wyrobów hutniczych. Zastosowanie takich półfabrykatów ograniczone jest jednak ich wymiarami lub wiąże się

z koniecznością zastosowania dodatkowej obróbki, w trakcie której wsad zostanie wstępnie ukształtowany na średnicę zbliżoną do wymiaru kuli. Powoduje to niejednokrotnie ograniczenie w możliwości wykorzystania tańszych i pełnowartościowych materiałów. Dlatego też w celu rozszerzenia możliwości technologicznych procesu kształtowania kul w walcarkach skośnych, opracowano nowatorską metodę walcowania kul w wykrojach śrubowo – spiralnych [39]. Zaproponowana metoda pozwala na walcowanie kul z półfabrykatów, których średnice mogą być większe od wymiaru kształtowanej kuli, a dokładność znacznie mniejsza w stosunku do wymaganej w tradycyjnych procesach walcowania skośnego.

Walcowanie kul w wykrojach śrubowo-spiralnych stanowi połączenie procesów walcowania wałcami stożkowymi i walcowania skośnego w wykrojach śrubowych [50]. Narzędzia, które wykorzystuje się w tym procesie mają kształt stożków, na powierzchniach których znajdują się śrubowo-spiralne kołnierze o klinowych i wklęsłych powierzchniach bocznych [42]. Schemat procesu walcowania kul w wykrojach śrubowo-spiralnych przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat procesu walcowania kul w wykrojach śrubowo-spiralnych (opis w tekście)

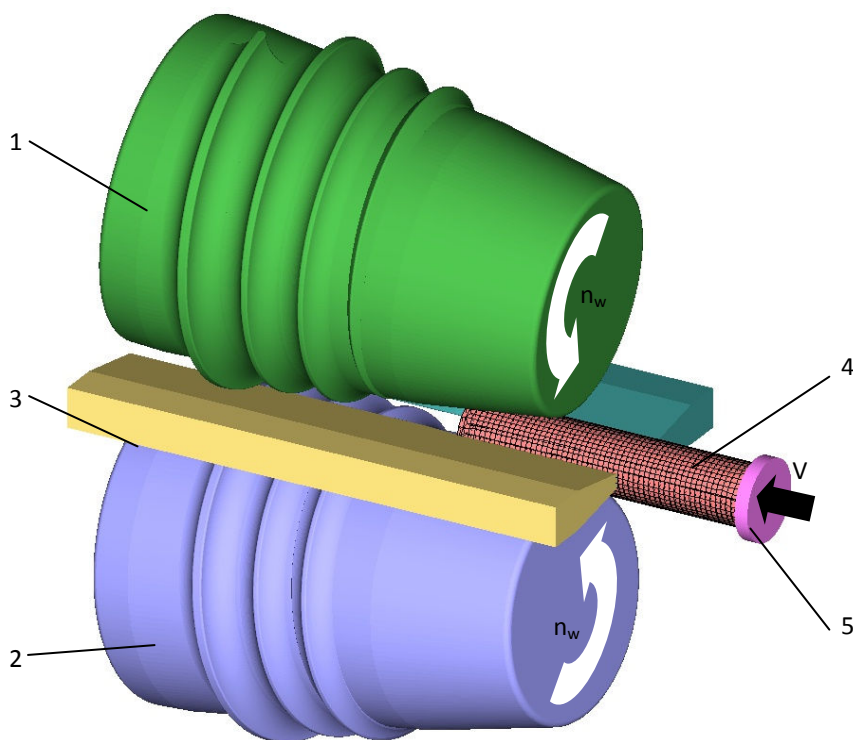
Proces realizowany jest w klatkach walcowniczych stożkowo-skośnych z wsadu w kształcie pręta – 2, pomiędzy dwoma jednakowymi walcami – 1. Narzędzia w kształcie walców zbudowane są z dwóch ściętych stożków: zgniatającego – 5 i roboczego – 6. Na powierzchni stożka roboczego w strefie wejściowej umieszczone są spiralne kołnierze wcinające – 7, o klinowych powierzchniach bocznych, które następnie w strefie kształtowania płynnie przechodzą w kołnierze robocze – 8, o wklęsłych powierzchniach bocznych, tworzące bruzdy o promieniu R , równym promieniowi walcowanych kul. Na ostatnich kołnierzach roboczych w strefie kalibrowania umieszczone są noże rozcinające – 9, które oddzielają ukształtowane kule – 4 od łączących je mostków. Kształt zarysu bruzdy oraz skok jej linii śrubowej dobiera się w ten sposób, aby w każdym położeniu kątowym narzędzi zachować stałą objętość metalu uchwyconego przez kołnierze. Osie walców nachylone są pod jednakowymi kątami γ w stosunku do osi półfabrykatu i jednocześnie skręcone w przeciwnych do siebie kierunkach pod kątem Θ w stosunku do osi walcowania (wsadu). Podczas walcowania narzędzia obracają się w tym samym kierunku ze stałą prędkością, wprowadzając materiał w przeciwbieźny ruch obrotowy. Stożkowe powierzchnie zgniatające – 5 redukują średnicę wsadu do wymiaru kształtowanej kuli, jednocześnie przemieszczając półfabrykat w kierunku stożka roboczego, gdzie w wyniku oddziaływania spiralnych kołnierzy następuje kształtowanie kul. W trakcie procesu walcowania półfabrykat – 3 utrzymywany jest w przestrzeni roboczej przy pomocy dwóch prowadnic – 2.

5.1.1. Analiza numeryczna procesu walcowania kul w wykrojach śrubowo-spiralnych

Celem potwierdzenia poprawności przyjętych założeń, opracowaną metodę kształtowania przeanalizowano numerycznie, symulując procesy walcowania kul o wymiarach $\varnothing 40$ mm. Obliczenia wykonano w programie Simufact Forming w wersji 10.0, który wielokrotnie wykorzystywano w analizie procesów walcowania poprzecznego i skośnego, a uzyskane wyniki z powodzeniem zostały zweryfikowane doświadczalnie. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla dwóch wariantów kształtowania kul w wykrojach śrubowo - spiralnych. W pierwszym założono, że średnica wsadu równa jest średnicy kuli ($\varnothing 40$ mm), natomiast w drugim przypadku przyjęto, że półfabrykat ma średnicę o 25% większą od wymiaru walcowanej kuli ($\varnothing 50$ mm). Z uwagi na skomplikowany charakter płynięcia materiału, obliczenia prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia z uwzględnieniem zjawisk termicznych.

Opracowany na potrzeby prowadzonej analizy model geometryczny procesu walcowania kul pokazano na rysunku 5.2. W skład modelu wchodzi dwa stożkowe walce – 1 i 2, dwie prowadnice – 3, które utrzymują położenie półfabrykatu w trakcie walcowania, wsad – 4 oraz popychacz – 5. Na powierzchniach stożków roboczych walców wykonane są śrubowe wykroje o klinowo - wklęsłych powierzchniach bocznych, których promień jest równy promieniowi walcowanej kuli. Wsad stanowią stalowe pręty o przekroju kołowym w gatunku 100Cr6 i średnicach $\varnothing 40$ mm oraz $\varnothing 50$ mm, modelowane za pomocą ośmiowęzłowych elementów heksagonalnych. Ze względu na duże zmiany kształtu odkuwek, podczas symulacji stosowano częste przebudowy siatki elementów. Dodatkowo w obszarach szyjek łączących kształtowane półfabrykaty, siatka elementów została zagęszczona w celu dokładniejszego odwzorowania kształtu walcowanych kul. Model materiałowy stali w gatunku 100Cr6, zaczerpnięto z biblioteki zastosowanego programu. Ponadto założono, że: materiał wsadu przed walcowaniem został nagrany w całej obję-

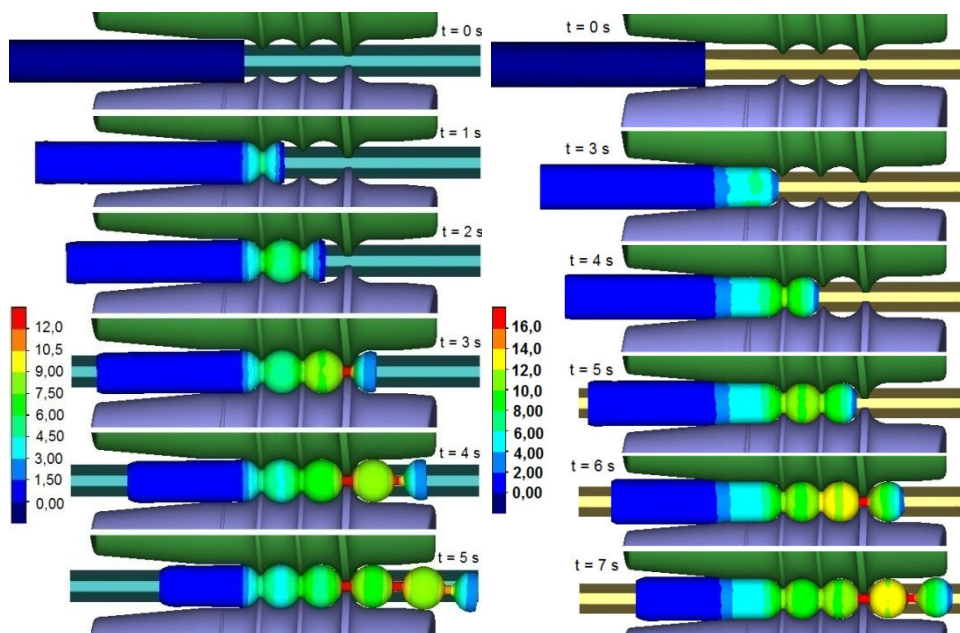
tości do temperatury 1150°C, zaś narzędzia mają stałą wartość temperatury, która wynosi – 150 °C. Walce w czasie walcowania obracają się w tym samym kierunku z jednakową prędkością $n_w = 60$ obr/min. W początkowym etapie procesu wsad podawany jest do przestrzeni roboczej między dwoma prowadnicami przy pomocy popychacza ze stałą prędkością $v = 15$ mm/s. Po upływie jednej sekundy ruch postępowy popychacza zostaje wyłączony, a półfabrykat jest samoczynnie przemieszczany przez obracające się walce w kierunku kołnierzy kształtujących. Na powierzchniach styku materiał – narzędzia (walce) przyjęto model tarcia stałego, reprezentowany przez czynnik tarcia o wartości granicznej $m = 1$, natomiast na powierzchni kontaktu półfabrykatu z prowadnicami, wartość czynnika tarcia wynosiła $m = 0,7$. Współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami założono na poziomie 10 kW/m²K, zaś między materiałem a otoczeniem 0,35 kW/m²K.



Rys. 5.2. Model geometryczny procesu walcowania kul w wykrojach śrubowo – spiralnych (opis w tekście)

W efekcie prowadzonych symulacji potwierdzono możliwość kształtowania kul opracowaną metodą. W trakcie obliczeń analizowano kinematykę płynięcia metalu w poszczególnych etapach walcowania. Wyznaczono rozkłady intensywności odkształceń, temperatur, określono również parametry siłowe procesu.

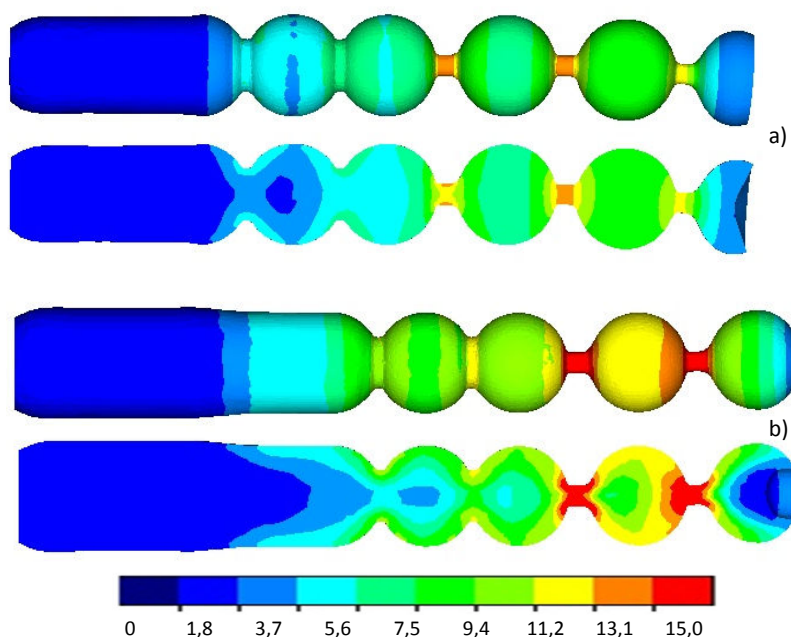
Progresję kształtu półwyrobów, wyznaczoną numerycznie w trakcie symulacji procesu walcowania wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia pokazano na rys. 5.3. Podczas walcowania kul z półfabrykatu, którego średnica jest równa wymiarowi kształtowanej kuli (rys. 5.3a), wsad w początkowym etapie procesu, w wyniku oddziaływania stożkowych powierzchni walców, wprawiany jest w ruch śrubowy (obrotowy i postępowy) i przemieszczany bez odkształcenia do strefy wcinającej, utworzonej przez klinowe kołnierze segmentów. Następnie przemieszczające się śrubowo kołnierze narzędzi wcinają się okresowo (co jeden obrót) w półfabrykat i zamykają w wykroju materiał o objętości równej objętości kuli oraz łączącej szyjki. W tym czasie na obwodzie półfabrykatu kształtowany jest pierścieniowy rowek klinowy, o stożkowych powierzchniach bocznych, które w kolejnych etapach procesu w wyniku oddziaływania kołnierzy o wklęsłych powierzchniach, zostają przekształcone w czasie kul. W przypadku procesu realizowanego z półfabrykatu o większych wymiarach, stożkowe powierzchnie zgniatające narzędzi redukują w początkowym etapie przekrój poprzeczny pręta do średnicy kuli, jednocześnie wprawiając wsad w ruch śrubowy. Kolejne fazy walcowania przebiegają w identyczny sposób jak dla procesu realizowanego z wsadu o mniejszej średnicy. W pełni ukształtowany wyrób otrzymuje się po trzech obrotach narzędzi – w przypadku walcowania kul z półfabrykatu o średnicy $\varnothing 40$ mm lub po pięciu obrotach dla wsadu o średnicy $\varnothing 50$ mm. Wyznaczony numerycznie kształt kul dla obu wariantów walcowania jest poprawny, wolny od wad i deformacji. Materiał w każdym punkcie przylega do powierzchni bocznych wykroju.



Rys. 5.3. Wyznaczona numerycznie progresja kształtu wyrobów w procesie walcowania, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia: a) dla walcowania z wsadu o średnicy $\varnothing 40$ mm oraz b) dla wsadu o średnicy $\varnothing 50$ mm

Tym samym można stwierdzić, iż opracowane rozwiązanie z dużym prawdopodobieństwem pozwoli na prawidłowe ukształtowanie kul. Z uwagi na trudności natury numerycznej, w symulacjach nie zrealizowano procesu całkowitego rozdzielania kul, które pozostawały połączone ze sobą za pomocą mostków. W procesie realizowanym w warunkach przemysłowych, narzędzia będą wyposażone w noże rozcinające, za pomocą których będzie następowało rozdzielanie ukształtowanych półfabrykatów.

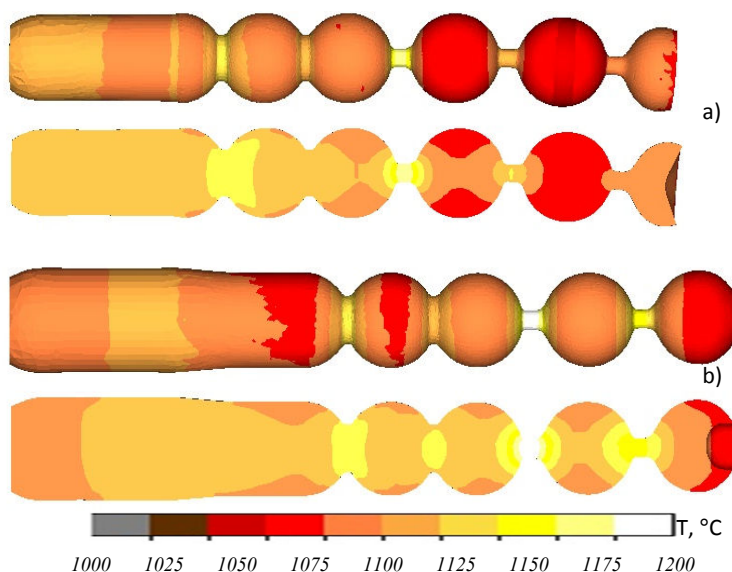
Na rys. 5.4 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia na powierzchni i w przekroju wzdłużnym walcowanych półfabrykatów. Podobnie jak to ma miejsce w tradycyjnych procesach walcowania skośnego kul, największe odkształcenia plastyczne zlokalizowane są w obszarach łączników, gdzie dochodzi do bardzo dużej redukcji przekroju poprzecznego. Jak można było przypuszczać znacznie większe wartości odkształceń zaobserwowano w procesie walcowania kul z półfabrykatu o większej średnicy. Jest to efektem redukcji przekroju poprzecznego wsadu w początkowej fazie procesu przez stożkowe powierzchnie zgniatające narzędzi. Cechą charakterystyczną wyznaczonych rozkładów dla obu rozważanych wariantów walcowania jest plastyczne przerobienie materiału w całej objętości ukształtowanych kul, przy czym odkształcenia nie są jednorodne w przekroju odwalcowanych odkuwek. W obszarach przypowierzchniowych materiał podlega większym odkształceniom w stosunku do stref centralnych.



Rys. 5.4. Rozkład intensywności odkształcenia wyznaczony w symulacjach procesu walcowania kul: a) z wsadu o średnicy $\varnothing 40$ mm, b) z wsadu o średnicy $\varnothing 50$ mm

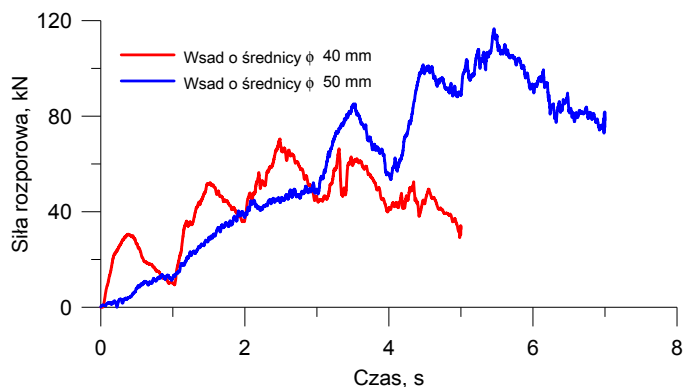
W trakcie symulacji numerycznych analizowano również parametry termiczne procesu, które mają istotne znaczenie na prawidłowy przebieg walcowania, wielkość oporów odkształcenia plastycznego oraz jakość uzyskanych wyrobów. Rozkłady temperatury wy-

znaczone w trakcie symulacji dla zaawansowania procesu wynoszącego 5 s oraz 7 s pokazano na kolejnym rys. 5.6. Charakterystyczne jest to, że materiał utrzymuje w swej objętości wysoką wartość temperatury. Natomiast zaobserwowane spadki temperatury są stosunkowo niewielkie i mają charakter powierzchniowy. W obszarach, które podlegają największym odkształceniom plastycznym można zaobserwować wzrost temperatury ponad wartość początkową (do około 1200 °C). Zjawisko to jest również widoczne w przypadku walcowania odkuwek kul z półfabrykatu o większej średnicy ($\varnothing 50$ mm), gdzie pomimo dłuższego czasu, wzrost temperatury obejmuje większe obszary (rys. 5.6b), w stosunku do procesu realizowanego według pierwszego wariantu (średnica wsadu $\varnothing 40$ mm). Wysokie wartości temperatury, a nawet jej wzrost (pomimo długiego czasu trwania procesu) są efektem generowania ciepła w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia. Temperatura ukształtowanych kul jest na tyle wysoka by bezpośrednio po walcowaniu możliwe było przeprowadzenie procesu ich hartowania.



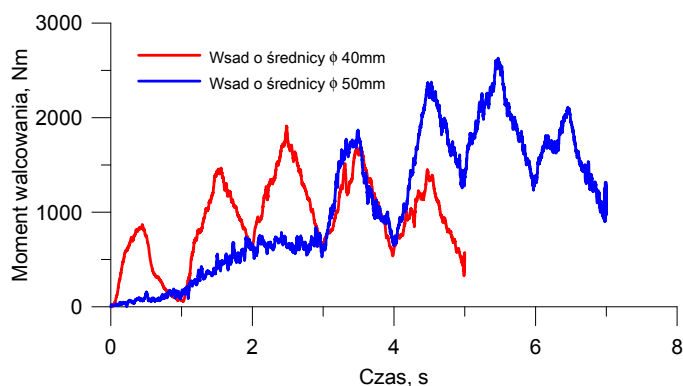
Rys. 5.6. Rozkład temperatury wyznaczony w symulacjach procesu walcowania kul: a) z wsadu o średnicy $\varnothing 40$ mm, b) z wsadu o średnicy $\varnothing 50$ mm

Charakter odkształceń plastycznych materiału ma duży wpływ na wielkość i przebieg parametrów siłowych procesu walcowania kul w wykrojach śrubowo-spiralnych. Dlatego też podczas obliczeń numerycznych analizowano przebiegi sił i momentów walcowania, które następnie zestawiono na kolejnych rysunkach 5.7 i 5.8. Cechą charakterystyczną otrzymanych parametrów siłowych jest ich oscylacyjny przebieg (w ustalonej fazie procesu), związany z cyklicznym zagłębianiem się narzędzi w półfabrykat po każdym pełnym ich obrocie. Przy czym w trakcie walcowania kul z wsadu o średnicy $\varnothing 50$ mm obserwuje się w początkowym etapie stopniowy wzrost siły i momentu, który jest spowodowany redukcją przekroju poprzecznego wsadu przez powierzchnie stożkowe narzędzi.



Rys. 5.7. Rozkład sił rozporowych wyznaczony w trakcie symulacji numerycznych walcowania kul

Prawie liniowy wzrost parametrów siłowych trwa do chwili zagłębienia się klinowych kołnierzy śrubowych w półfabrykat, co skutkuje pojawieniem się typowych oscylacji wartości siły i momentu. Natomiast w przypadku walcowania kul z półfabrykatu, którego średnica jest zbliżona do wymiaru wyrobu, już w początkowej fazie procesu można zaobserwować oscylacje wartości siły i momentu. Istotny jest również fakt, że maksymalne wartości siły (około 120 kN) i momentu (około 3000 Nm) dla ustalonego procesu walcowania kul z półfabrykatu o średnicy $\varnothing 50$ mm są blisko 50% większe w stosunku do procesu realizowanego z półfabrykatu o średnicy $\varnothing 40$ mm (siła osiąga wartości rzędu 80 kN, zaś moment 2000 Nm). Jest to efektem redukcji średnicy wsadu do wymiaru kształtowanej kuli w strefie zgniatającej narzędzi. Natomiast zgodnie z oczekiwaniami amplitudy oscylacji sił i momentów dla obu wariantów kształtowania są do siebie zbliżone (w obu przypadkach walcowano kule o średnicy $\varnothing 40$ mm).

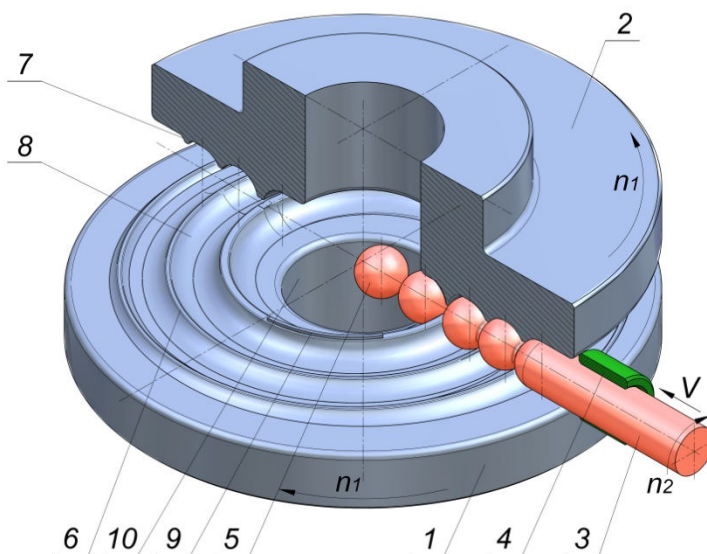


Rys. 5.8. Rozkład momentów walcowania wyznaczony w trakcie symulacji numerycznych kształtowania kul

5.2. Walcowanie kul dwoma tarczami płaskimi w wykrojach spiralnych

Poszukiwanie bardziej ekonomicznych i wydajnych metod wytwarzania odkuwek kul skutkowało opracowaniem nowej technologii walcowania półfabrykatów kul pomiędzy dwoma dyskami. Na powierzchniach roboczych narzędzi (dysków) wykonane są spiralne bruzdy, rozdzielone kołnierzami, które tworzą wykroje, kształtem zbliżone do zarysu walcowanych kul [40, 41, 52].

Proces kształtowania kul w wykrojach spiralnych realizowany jest bezpośrednio z pręta pomiędzy dwoma jednakowymi dyskami – 1 i 2, na powierzchniach których nacięte są spiralnie bruzdy (wykroje) (rys. 5.9). Bruzdy rozdzielone są od siebie kołnierzami - 6, które stopniowo zwiększają swoją szerokość i wysokość. Na ostatnich kołnierzach umieszcza się noże - 9, które oddzielają ukształtowane kule - 5 od łączących je mostków. Podczas walcowania narzędzia obracają się w przeciwnych kierunkach, wprawiając materiał w ruch obrotowy. Kształt i skok spiralnych bruzd umieszczonych na powierzchniach dysków są tak dobrane, aby w każdym położeniu kątowym narzędzi zachowana była stała objętość materiału zamkniętego w wykroju. Półfabrykat - 3 podawany jest do przestrzeni roboczej w tulei prowadzącej - 4 prostopadłe do osi dysków.

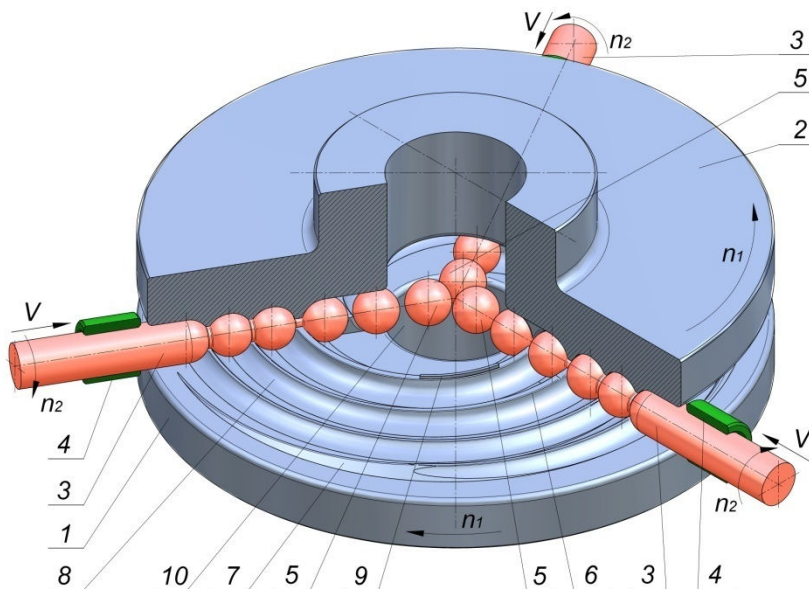


Rys. 5.9. Walcowanie kul dwoma dyskami (tarczami) z wykrojem spiralnym (opis w tekście)

Ruch postępowy półfabrykatu wywołany jest naciskiem płyty popychacza na swobodny koniec pręta. Podobnie jak w procesach walcowania śrubowego oraz śrubowo-klinowego, najlepsze wyniki walcowania otrzymuje się, gdy średnica wsadu jest nieco mniejsza od średnicy gotowych kul (0,95 – 0,97 średnicy kuli). Wynika to z konieczności ograniczenia gniotu tylko do obszaru kształtowanych szyjek, zaś obwodowe powierzchnie półwyrobu nie powinny podlegać gniotowi. Ukształtowane kule - 5 po procesie walcowania staczają się ze strefy roboczej narzędzi przez otwór – 10 wykonany w osi dys-

ków do zbiornika z wodą, gdzie są hartowane. Początkowe zwoje spiralnych występow mają klinowy kształt - 7, który stopniowo przechodzi we wklęsłą powierzchnię kształtującą - 8, tworząc wykrój o promieniu R równym promieniowi kształtowanej kuli. Zastosowanie spiralnych powierzchni klinowych w strefie wcinania, ułatwia zagłębianie się narzędzi w materiał w początkowym etapie walcowania oraz umożliwia dokładniejszy podział materiału na równe objętości.

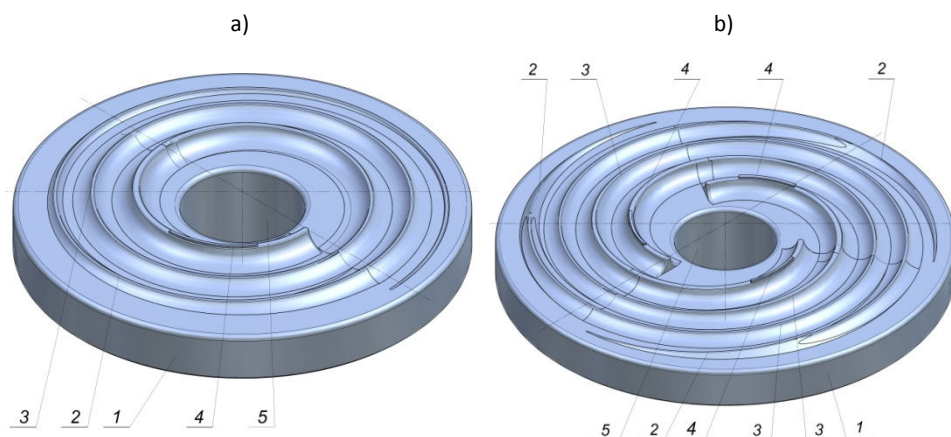
Walcowanie kul według proponowanej metody charakteryzuje się szeregiem zalet, do których można zaliczyć między innymi prostą konstrukcję obrabiarki, dużą wydajność procesu, niewielkie straty materiałowe, większą dokładność, łatwą automatyzację oraz korzystny układ struktury kształtowanych wyrobów, co wpływa na poprawę własności wytrzymałościowych odkuwek. Kształt narzędzi (tarcze) oraz kinematyka ich ruchu umożliwiają jednoczesne walcowanie odkuwek z dwóch półfabrykatów rozmieszczonych naprzeciwko siebie (dla spiralnych wykrojów jednozwojnych). W efekcie zwiększa się dwukrotnie wydajność procesu. Natomiast w przypadku zastosowania wielozwojnych narzędzi spiralnych możliwe jest również wielokrotne zwiększenie wydajności procesu, co przy produkcji wielkoseryjnej i masowej ma istotne znaczenie ekonomiczne. Schemat procesu walcowania odkuwek kul w wykrojach spiralnych w układzie potrójnym przedstawiono na rys. 5.10. Dzięki zastosowaniu narzędzi, na powierzchni których wykonane są trójzwojne wykroje spiralne, wydajność procesu zwiększa się trzykrotnie – w przypadku kształtowania kul z jednego półfabrykatu. Zaś kształtowanie kul jednocześnie z trzech półfabrykatów, podawanych w tulejach prowadzących, rozmieszczonych co 120° na obwodzie dysków (rys. 5.10), pozwala zwiększyć wydajność procesu aż dziewięć razy.



Rys. 5.10. *Walcowanie kul dwoma dyskami (tarczami) z potrójnym wykrejem spiralnym (opis w tekście)*

Kalibrowanie narzędzi spiralnych do walcowania kul odbywa się w identyczny sposób, jak w przypadku walców do WŚK, z tą różnicą, że w narzędziach śrubowych wykroje

umieszczone są na powierzchni walca, wzdłuż linii śrubowej. Natomiast w narzędziach spiralnych wykroje umieszczone są na powierzchni tarczy, wzdłuż linii spiralnej. Skok oraz wysokość spiralnych kołnierzy określa się na podstawie objętości walcowanej kuli i łącznika, która powinna być stała w trakcie całego procesu walcowania. Analogicznie do konstrukcji narzędzi śrubowo-klinowych, w strefie wcinania segmentów spiralnych umieszczone są klinowe kołnierze o płaskich powierzchniach bocznych. W strefie kształtowania i kalibrowania klinowe kołnierze zmieniają kształt na wklęsły o promieniu równym połowie średnicy walcowanej kuli. Odwalcowane kule oddziela się od łączących szyjek za pomocą noży rozcinających, które umieszczone są na ostatnich kołnierzach w strefie kalibrowania. Modele przestrzenne narzędzi spiralnych (jednozwojnych i trójzwojnych), które opracowano na potrzeby prowadzonej analizy przedstawiono na rys. 5.11.

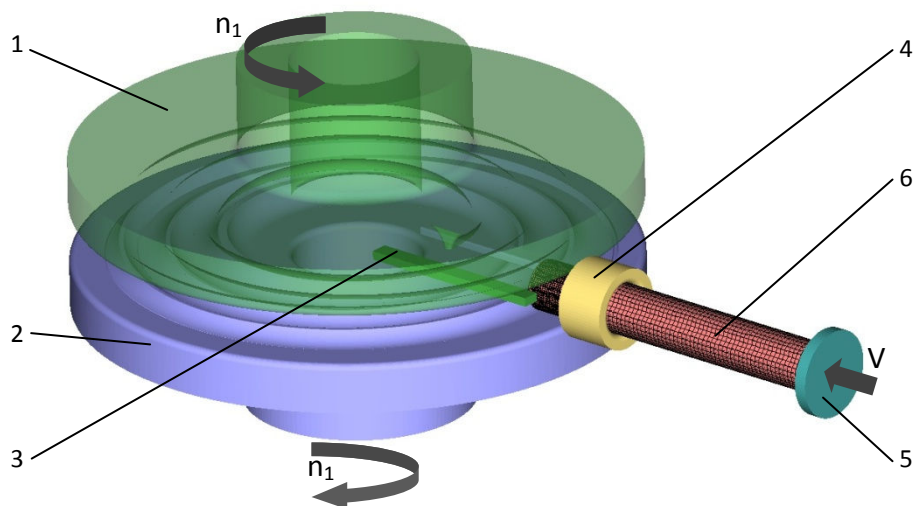


Rys. 5.11. Modele 3D narzędzi spiralnych: a) jednozwojnych. b) trójzwojnych; 1 – tarcza, 2 – kołnierze klinowe, 3 – kołnierze o powierzchniach wklęsłych, 4 – noże rozcinające, 5 – otwór odprowadzający ukształtowane półfabrykaty

5.2.1. Analiza numeryczna procesu walcowania kul w wykrojach spiralnych

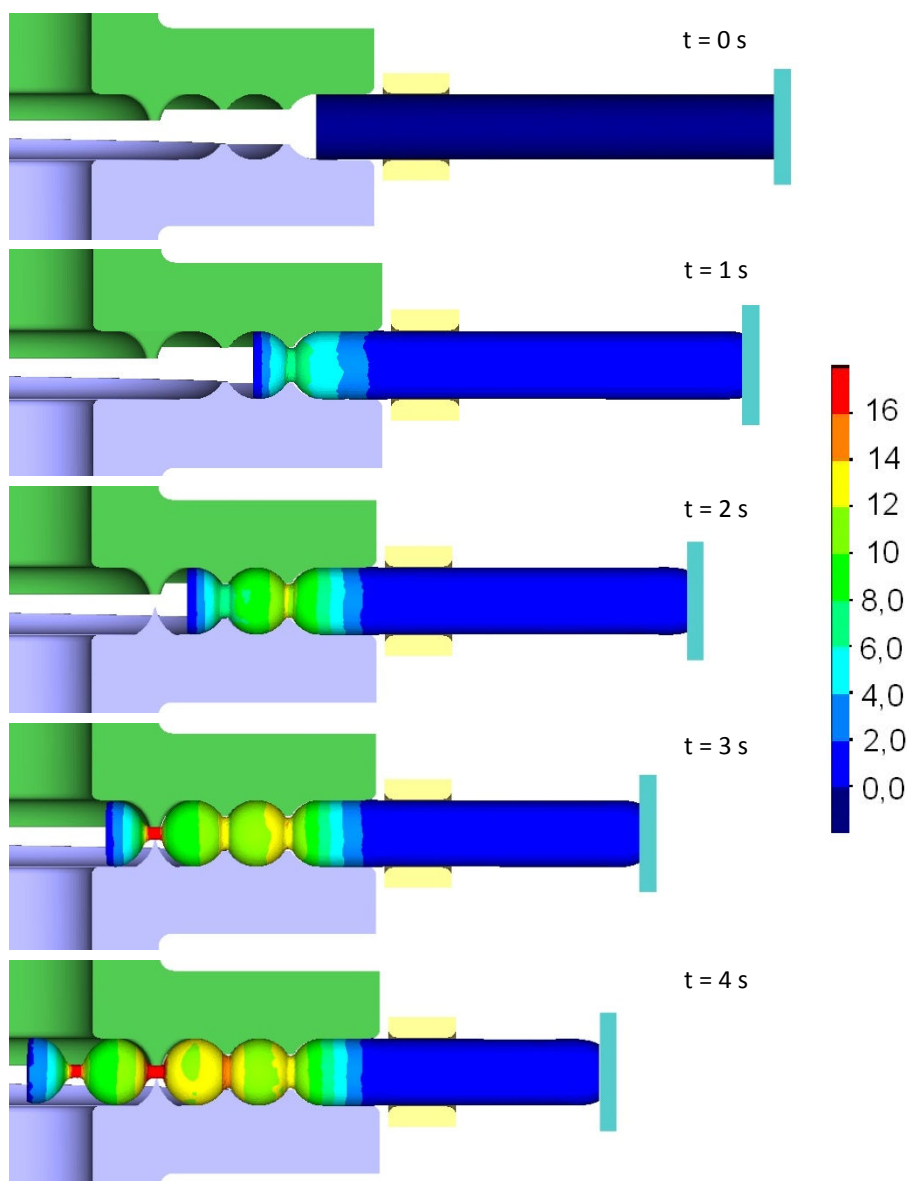
W celu weryfikacji opracowanej metody kształtowania przeprowadzono symulacje numeryczne procesu walcowania kul o średnicy $\varnothing 40$ mm w wykrojach spiralnych. Obliczenia wykonano w programie Simufact Forming w wersji 10.0. Opracowany na potrzeby prowadzonej analizy model geometryczny procesu walcowania kul w wykrojach spiralnych pokazano na rysunku 5.12. W skład modelu wchodzi dwa identyczne dyski, górny - 1 i dolny - 2, dwie prowadnice - 3 utrzymujące półfabrykat w przestrzeni roboczej, tuleja prowadząca - 4, która ustala położenie półfabrykatu w trakcie walcowania, popychacz - 5 oraz wsad - 6 (pręt okrągły o średnicy $\varnothing 40$ mm), modelowany za pomocą ośmiowęzłowych elementów heksagonalnych. Na powierzchniach roboczych dysków wykonane są spiralne wykroje o klinowych i wklęsłych powierzchniach bocznych, których promień jest równy promieniowi walcowanej kuli. Model materiałowy stali w gatunku 100Cr6 został zaczerpnięty z biblioteki zastosowanego programu. Ponadto założono, że: materiał wsadu przed walcowaniem został nagrzwany w całej objętości do temperatury 1150 °C, zaś narzędzia mają stałą wartość temperatury, która dla dysków wy-

nosiła 150 °C, a dla tulei prowadzącej, prowadnic i popychacza 300 °C. Dyski w czasie walcowania obracają się w przeciwnych kierunkach z jednakową prędkością $n_1 = 60$ obr/min. Wsad w trakcie procesu podawany jest do przestrzeni roboczej ze stałą prędkością $v = 27,5$ mm/s. Na powierzchniach styku materiał - dyski przyjęto wartość graniczną czynnika tarcia $m = 1$, natomiast na powierzchniach kontaktu półfabrykatu z tuleją prowadzącą i popychaczem założono minimalną wartość czynnika tarcia $m = 0,01$. Współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami założono na poziomie 10 kW/m²K, zaś między materiałem a otoczeniem 0,35 kW/m²K.



Rys. 5.12. Model geometryczny procesu walcowania kul tarczami wykonany w programie Simufact Forming v. 10.0 (opis w tekście)

W efekcie prowadzonych symulacji możliwe stało się prześledzenie kinematyki płynięcia metalu w poszczególnych etapach walcowania. Określono również rozkłady intensywności odkształcenia, naprężenia, temperatury oraz przebiegi parametrów siłowych, a przede wszystkim potwierdzono możliwość kształtowania kul proponowaną metodą. Progresję kształtu półwyrobu w trakcie walcowania kul w jednozwojnych wykrojach spiralnych wraz z rozkładem intensywności odkształcenia pokazano na rys. 5.13. Przemieszczające się spiralnie występy dysków wcinają się okresowo (co jeden obrót) w przesuwający się wsad i zamykają w wykroju materiał o objętości równej objętości kuli. W materiale wsadu kształtowany jest pierścieniowy rowek klinowy o płaskich powierzchniach, które w kolejnych etapach procesu w wyniku oddziaływania spiralnych kołnierzy o wklęsłych powierzchniach bocznych, zostają przekształcone w powierzchnie sferyczne kształtowanych kul.

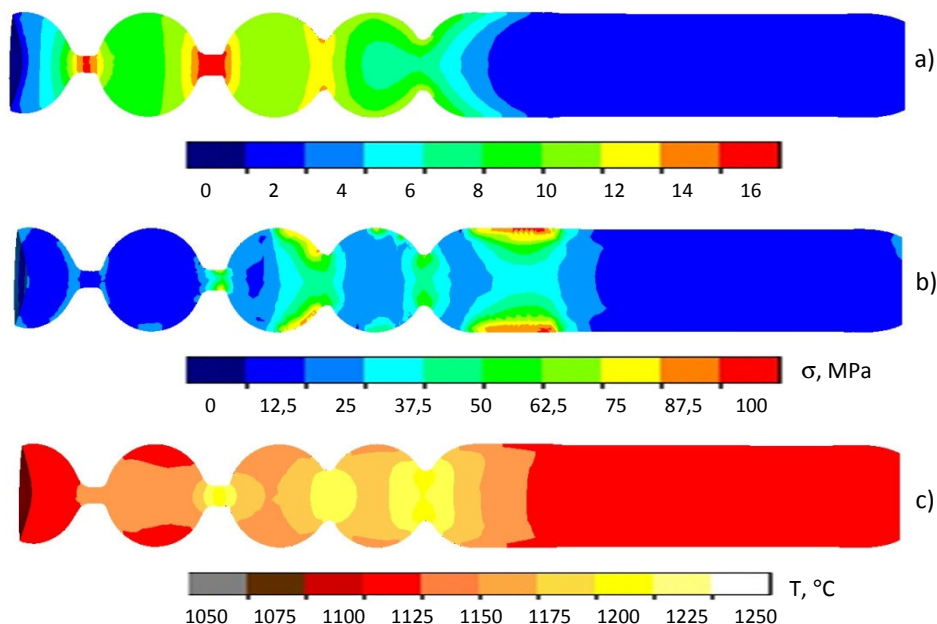


Rys. 5.13. Progresa kształtu półwyrobu, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, w procesie walcowania kul tarczami w wykrojach spiralnych

W pełni ukształtowany wyrób otrzymuje się po trzech obrotach narzędzi. Odwalcowane w procesie kule mają prawidłowy kształt, wolny od wad i deformacji. Materiał w trakcie walcowania przylega do powierzchni bocznych wykroju. Pozwala to wnioskować, iż opracowane rozwiązanie z dużym prawdopodobieństwem pozwoli na ukształtowanie kul o wymaganych parametrach. Podobnie jak w poprzednio analizowanych numerycznie procesach, podczas symulacji nie zrealizowano całkowitego rozdzielenia kul, które

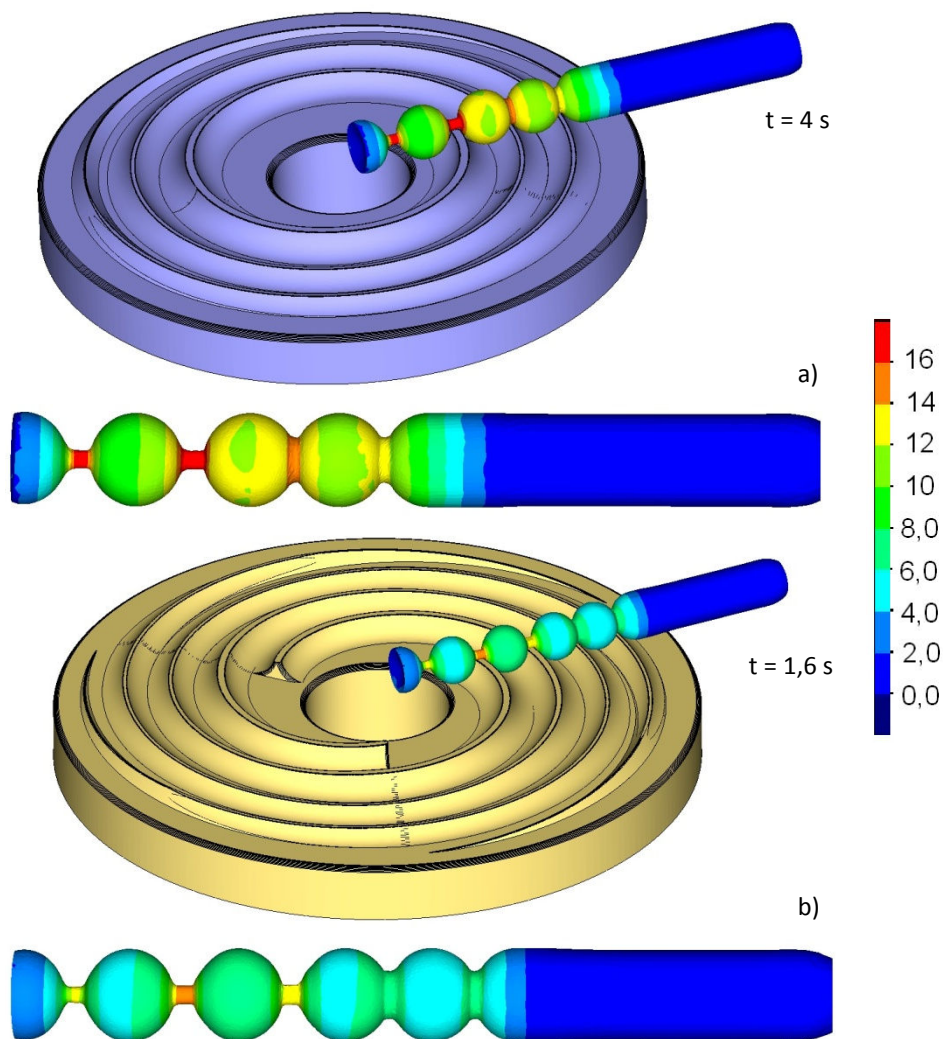
pozostawały połączone ze sobą za pomocą mostków. Rysunek 5.13 przedstawia również rozkłady intensywności odkształcenia na powierzchni walcowanych półfabrykatów. Największe odkształcenia plastyczne zlokalizowane są w obszarach łączników, gdzie następuje zgniatanie materiału przez przemieszczające się kołnierze narzędzi.

Na kolejnym rysunku 5.14 zestawiono rozkłady intensywności odkształcenia, temperatury oraz intensywności naprężenia w przekroju wzdłużnym walcowanych półfabrykatów. Przedstawione rozkłady są ze sobą ściśle związane. W trakcie walcowania materiał zostaje przerobiony plastycznie w całej objętości, przy czym największe odkształcenia koncentrują się w obszarach łączników. W efekcie temperatura ukształtowanych wyrobów w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło utrzymuje się na stosunkowo wysokim poziomie (około 1100 °C), a w strefach łączników znacznie wzrasta ponad wartość początkową (ponad 1200 °C). Fakt ten jest szczególnie istotny ze względu na stosunkowo długi czas kontaktu metalu z narzędziami i pozwala przypuszczać, że materiał w końcowej fazie walcowania powinien posiadać dobre własności plastyczne, zaś ukształtowane kule będzie można poddać procesowi hartowania bezpośrednio po walcowaniu. Również otrzymany rozkład intensywności naprężenia związany jest ze stopniem przerobu plastycznego materiału. Największe naprężenia koncentrują się w obszarze kontaktu materiału z narzędziami. W pozostałych obszarach naprężenia są znacznie mniejsze. Przy czym wartości maksymalne naprężeń zredukowanych są niewielkie i nie przekraczają 100 MPa.



Rys. 5.14. Rozkłady intensywności odkształcenia - a, temperatury - b i intensywności naprężenia - c w przekroju osiowym kształtowanego półwyrobu (dla $t=4$ s)

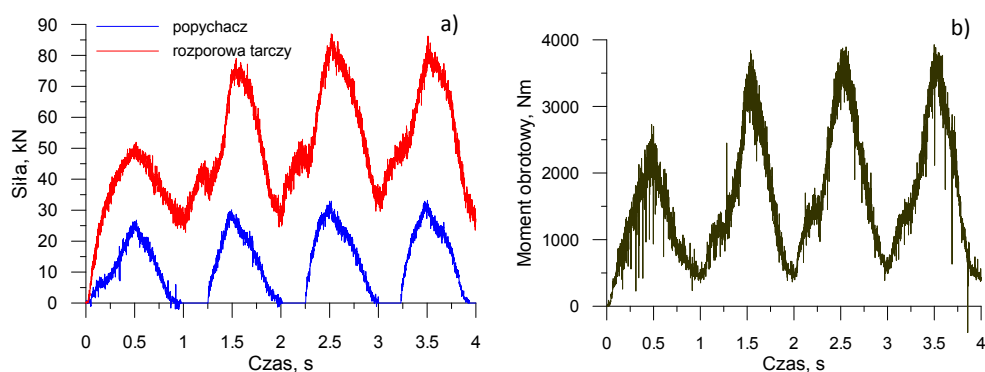
Wydajność procesu można znacznie zwiększyć, stosując narzędzia wielozwojne, które umożliwiają jednoczesne kształtowanie kilku kul w czasie jednego obrotu dysków. W stosunku do poprzednio omawianego sposobu, zasadnicza różnica polega w kształcie zastosowanych narzędzi. Na powierzchniach roboczych dysków wykonane są trójzwojne wykroje spiralne, które umożliwiają kształtowanie kul jednocześnie z trzech półfabrykatów, podawanych w tulejach prowadzących, rozmieszczonych co 120° na obwodzie dysków. Pełny zarys wyrobu uzyskuje się w czasie 1,33 obrotu dysków (poprzednio były to 3 obroty). W rezultacie znacznie zwiększa się wydajność procesu. Wyznaczoną numerycznie progresję kształtu z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia dla procesu walcowania dyskami z jednozwojnymi i trójzwojnymi wykrojami spiralnymi pokazano na rysunku 5.15.



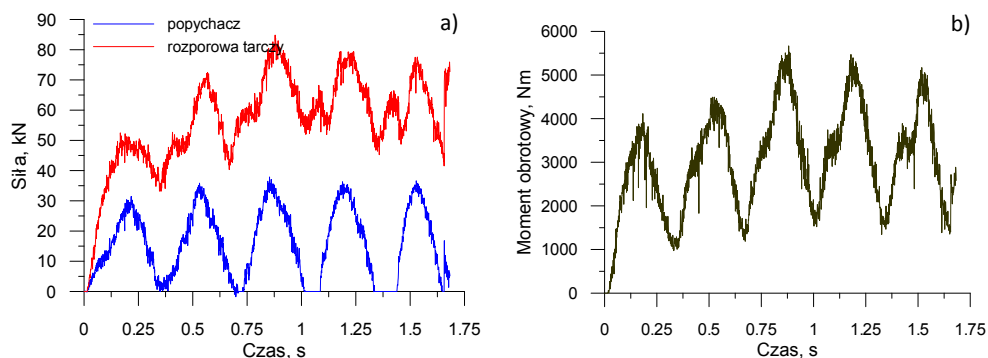
Rys. 5.15. Rozkłady intensywności odkształcenia w procesie walcowania kul tarczami: a) w wykrojach jednozwojnych, b) w wykrojach trójzwojnych

Otrzymany rozkład jest jakościowo identyczny z rozkładem otrzymanym w procesie walcowania kul w pojedynczym wykroju spiralnym. Największe odkształcenia występują w obszarze łączników, jednak ilościowo są one znacznie mniejsze w stosunku do poprzednio analizowanego procesu. Jest to efektem znacznie krótszej drogi kształtowania, a tym samym mniejszych odkształceń zbędnych w walcowanym materiale, które są skutkiem intensywnego płynięcia materiału w kierunku stycznym.

W trakcie symulacji numerycznych analizowano również parametry siłowe procesu, które zestawiono w formie wykresów na kolejnych rysunkach 5.16 i 5.17. Przebieg siły rozporowej działającej na narzędzie oraz siły z jaką działa popychacz na wsad, dla procesu walcowania w narzędziach jednozwojnych, przedstawiono na rysunku 5.16a. Cechą charakterystyczną pokazanych przebiegów sił jest ich cykliczność. Siły zwiększają swoją wartość w początkowej fazie każdego obrotu, by następnie ulec zmniejszeniu. Związane jest to z okresowym zagłębianiem się powierzchni klinowych narzędzi we wsad, które oddzielają objętość materiału równą objętości kuli i łącznika. Następnie materiał w dalszej części wykroju spiralnego zostaje ukształtowany w kulę, czemu odpowiada malejąca wartość siły.



Rys. 5.16. Przebieg sił – a) i momentu walcowania –b) kształtowania kul w jednozwojnych wykrojach spiralnych



Rys. 5.17. Przebieg sił – a) i momentu walcowania –b) kształtowania kul w trójzwojnych wykrojach spiralnych

Charakter rozkładu sił determinuje rozkład momentu walcowania pokazany na rys. 5.16b, który również ma cykliczny przebieg. Rozkład siły i momentu w ustalonej fazie walcowania (po wypełnieniu przez materiał wszystkich wykrojów spiralnych) jest powtarzalny i oscyluje wokół stałych wartości ekstremalnych. Maksymalna siła rozporowa w tym etapie waha się w granicach 85 kN, zaś siła oddziaływania popychacza na półfabrykat nie przekracza 30 kN. Natomiast moment maksymalny oscyluje w granicach 4000 Nm.

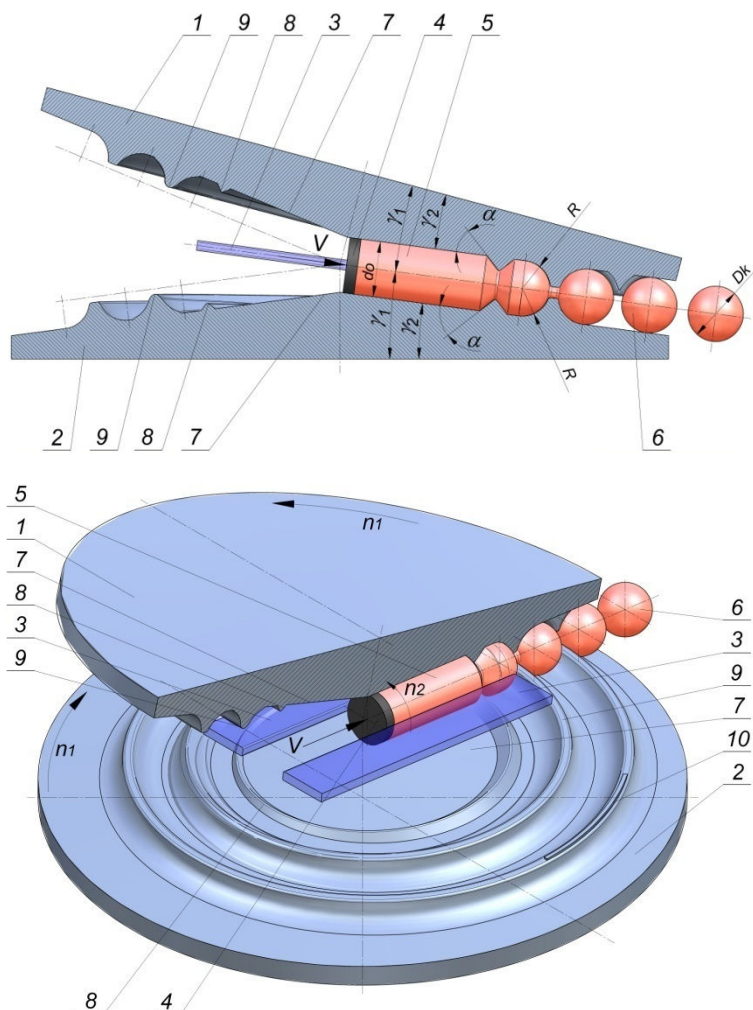
Ciekawych informacji dostarczają przebiegi parametrów siłowych (sił i momentów) wyznaczone dla procesu walcowania narzędziami wielozwojnymi. Maksymalne wartości sił (rys. 5.17a) zbliżone są do tych, które otrzymano podczas symulacji w wykrojach jednozwojnych, przy czym częstotliwość oscylacji sił jest trzykrotnie większa, a amplituda siły rozporowej znacznie mniejsza. Jest to efektem kilkukrotnego zagłębienia się spiralnych występow w półfabrykat podczas jednego obrotu narzędzi. Również przebieg momentu obrotowego (rys. 5.17b) ma zbliżony charakter do wyznaczonego poprzednio. Jednak w tym przypadku wartości maksymalne są o blisko 40% większe (moment maksymalny osiąga wartość około 5500 Nm). Należy przy tym zaznaczyć, że zwiększenie wydajności procesu o 200% powoduje jedynie niespełna 40% wzrost momentu obrotowego. Jest to cecha szczególnie korzystna, która pozwala na podniesienie wydajności procesu oraz obniżenie zużycia energii.

5.3. Walcowanie kul dwoma tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych

Kolejną metodą kształtowania kul, którą opracowano w ramach prowadzonych badań jest proces walcowania odkuwek narzędziami w kształcie stożkowych tarcz, na powierzchniach których znajdują się spiralne wykroje o zarysie zbliżonym do kształtu walcowanych kul [53].

Proces walcowania kul dwoma tarczami stożkowymi bazuje na poprzednio opisywanej metodzie (walcowanie kul pomiędzy tarczami płaskimi). Kule kształtowane są bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie pręta – 5 pomiędzy dwiema stożkowymi tarczami – 1 i 2. Przy czym proces walcowania kuli odbywa się przy ruchu półfabrykatu od osi narzędzi w kierunku ich średnicy zewnętrznej. Oś narzędzi ustawione są skośnie w stosunku do osi walcowania i jednocześnie przecinają oś półfabrykatu w jednym punkcie. Na powierzchniach stożkowych - 7 dwóch tarcz wykonane są spiralne kołnierze, które w strefie wcinania mają kształt klinów – 8, płynnie przechodzących w powierzchnie wklęsłe - 9 w strefie kształtowania i kalibrowania. W trakcie walcowania półfabrykat - 5 w kształcie odcinka pręta o średnicy d_o mniejszej od średnicy D_k kształtowanej kuli – 6, wprowadzany jest do przestrzeni roboczej, utworzonej przez stożkowe powierzchnie obracających się narzędzi – 7 oraz dwie prowadnice – 3, utrzymujące położenie wsadu i półwyrobów w strefie kształtowania. Podczas walcowania narzędzia obracają się ze stałą prędkością n_1 w przeciwnych do siebie kierunkach względem własnych osi. Jednocześnie popychacz – 4 przemieszcza półfabrykat pomiędzy narzędziami w kierunku spiralnych kołnierzy. Przy czym prędkość v ruchu postępowego popychacza równa jest skokowi kołnierzy spiralnych umieszczonych na powierzchniach roboczych narzędzi. Następnie w wyniku od-

działania stożkowych powierzchni obracających się narzędzi, przemieszczany pręt zostaje wprowadzony w ruch obrotowy z prędkością n_2 . Jednocześnie klinowe kołnierze wcinają się w przemieszczany wsad, kształtując na obwodzie pierścieniowy rowek i oddzielając od półfabrykatu objętość materiału równą objętości kuli i łącznika. Po czym w wyniku oddziaływania kołnierzy – 9, o wklęsłych powierzchniach bocznych, kształtowana jest kula, połączona z półfabrykatem szyjką. Całkowite oddzielenie odkuwki następuje w strefie rozcinania, w wyniku oddziaływania noży umieszczonych na ostatnich zwojach spiralnych kołnierzy.

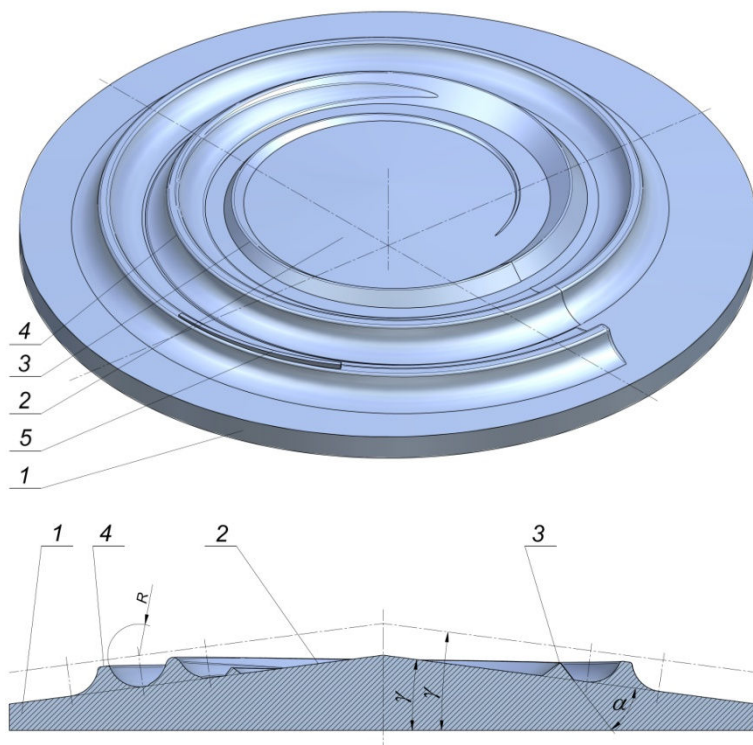


Rys. 5.18. Schemat procesu walcowania kul dwoma tarczami stożkowymi z wykrojami spiralnymi (opis w tekście)

Zaletą opracowanej metody jest duża wydajność procesu, którą można jeszcze znacznie zwiększyć, stosując narzędzia wielozwojne. Nie bez znaczenia jest również sto-

sunkowo prosta konstrukcja narzędzi i agregatu kuźniczego. W efekcie możliwe jest kształtowanie kul przy stosunkowo niewielkich nakładach wdrożeniowych.

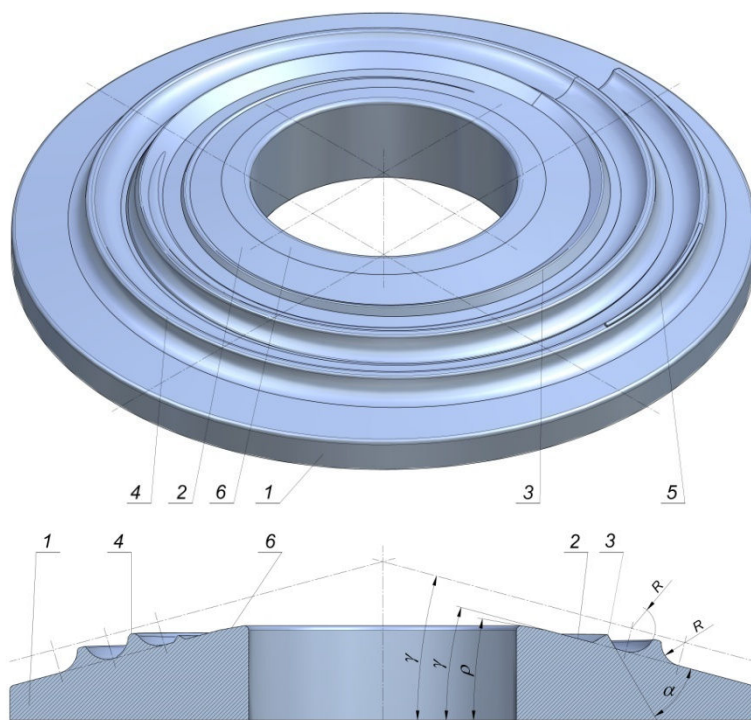
Powierzchnie robocze stożkowych narzędzi - 1 składają się z czterech podstawowych stref (rys. 5.19) [43]. W pierwszej strefie, wejściowej – 2 narzędzia mają kształt gładkich stożków, o tworzących pochyłonych pod kątem γ ; równym kątowi zukosowania tarcz. Zadaniem powierzchni stożkowej jest usunięcie niewielkich nierówności średnicy wsadu oraz wprawienie półfabrykatu w ruch obrotowy. W drugiej strefie – wcinania, na powierzchni stożkowej umieszczone są klinowe kołnierze spiralne – 3, które wcinając się w półfabrykat, oddzielają stałe objętości materiału. W dwóch kolejnych strefach kształtowania i rozdzielania, klinowe kołnierze zmieniają kształt na wklęsły o promieniu R równym promieniowi walcowanej kuli.



Rys. 5.19. Konstrukcja tarczowego narzędzia do walcowania kul z wykrojami spiralnymi umieszczonymi na powierzchni stożkowej (opis w tekście)

Przy czym nadanie odkuwce kształtu sferycznego odbywa się w strefie kształtowania, zaś w strefie kalibrowania następuje usunięcie nierówności kształtu oraz całkowite rozdzielanie kul przy pomocy noży umieszczonych na ostatnich kołnierzach. Sposób projektowania wykrojów na powierzchniach stożkowych narzędzi nie różni się zasadniczo od metody kalibrowania wałców śrubowo-klinowych, (opisanej szczegółowo w rozdziale 3). Podstawą wyznaczenia zarysu powierzchni roboczej narzędzi jest konieczność utrzymania stałej objętości materiału zamkniętego w wykroju, która powinna być równa objętości walcowanej kuli oraz łącznika.

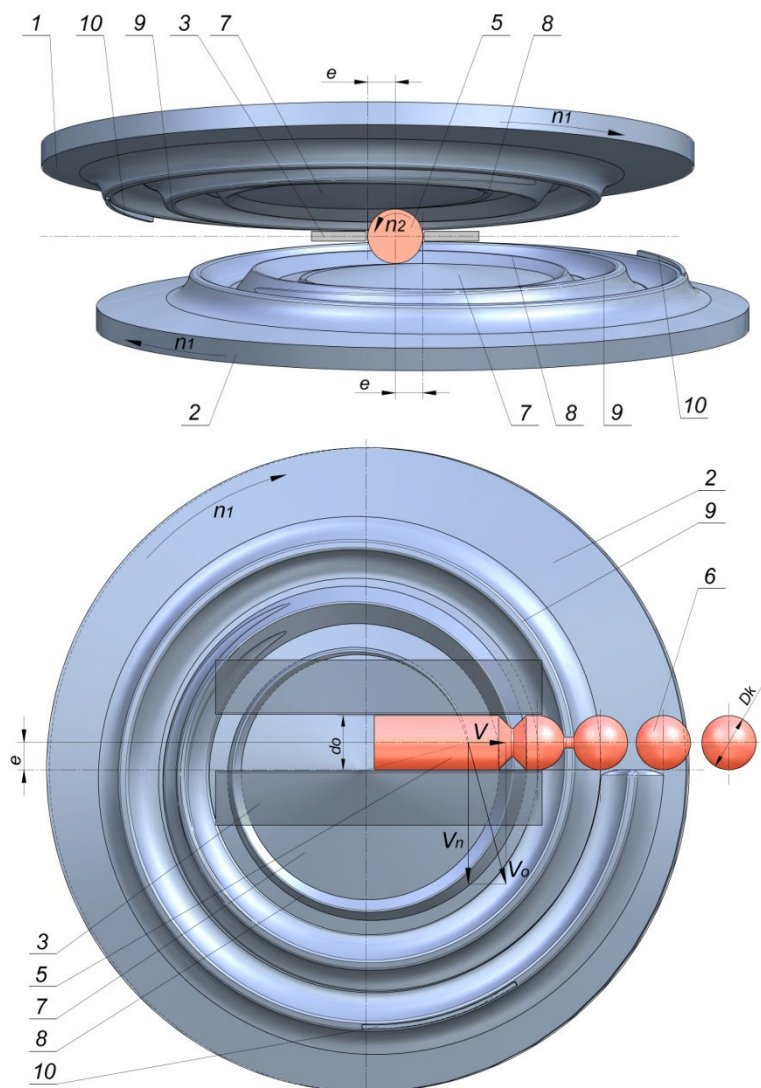
Proces walcowania kul z wykorzystaniem narzędzi tarczowych o jednej powierzchni stożkowej (rys. 5.19), wymaga stosowania półfabrykatów o stosunkowo dokładnych wymiarach i kształcie. Stożkowe powierzchnie wprowadzające tych narzędzi są równoległe do osi walcowania, w związku z tym półfabrykat tylko w niewielkim stopniu może być skalibrowany przed wejściem do strefy wcinania. Dlatego też w celu rozszerzenia możliwości technologicznych procesu walcowania w wykrojach spiralnych (zastosowanie mniej dokładnych półfabrykatów o większych średnicach), opracowano konstrukcję narzędzi z dwiema powierzchniami stożkowymi (rys. 5.20) [44]. Zasadnicza różnica konstrukcyjna w stosunku do uprzednio omawianych narzędzi polega na wprowadzeniu dodatkowej stożkowej powierzchni zgniatającej – 6, której tworząca jest pochylona pod kątem ρ . Przy czym kąt pochylenia tworzącej stożka zgniatającego – 6 jest mniejszy od kąta γ , pochylenia tworzącej stożka roboczego – 2. W efekcie półfabrykat przed wejściem do strefy kształtowania zostaje skalibrowany przez stożkowe powierzchnie zgniatające. Pozostałe strefy narzędzi są identyczne jak w narzędziach omawianych poprzednio.



Rys. 5.20. Konstrukcja tarczowego narzędzia do walcowania kul z wykrojami spiralnymi umieszczonymi na powierzchni stożkowej, z dodatkową powierzchnią zgniatającą (opis w tekście)

W trakcie walcowania kul w wykrojach spiralnych siła osiowa, działająca na wsad wzdłuż osi walcowania, jest zbyt mała by wywołać samoczynne przemieszczanie półfabrykatu. Dlatego też, aby proces mógł być zrealizowany, konieczne jest ciągłe podawanie wsadu do przestrzeni roboczej. W tym celu wykorzystuje się popychacz, który przez cały czas trwania procesu wywiera nacisk wzdłuż osi wsadu, powodując jego przemieszcz-

czanie w przestrzeni roboczej narzędzi. Zastosowanie dodatkowego urządzenia podającego wsad nie zawsze jest możliwe, a dodatkowo komplikuje konstrukcję agregatu. W związku z powyższym opracowano metodę walcowania kul w mimośrodowych wykrojach spiralnych, dwoma dyskami stożkowymi (rys. 5.21) [54]. Dzięki mimośrodowemu ustawieniu narzędzi, półfabrykat jest samoczynnie wciągany do przestrzeni roboczej, co pozwala na wyeliminowanie popychacza.



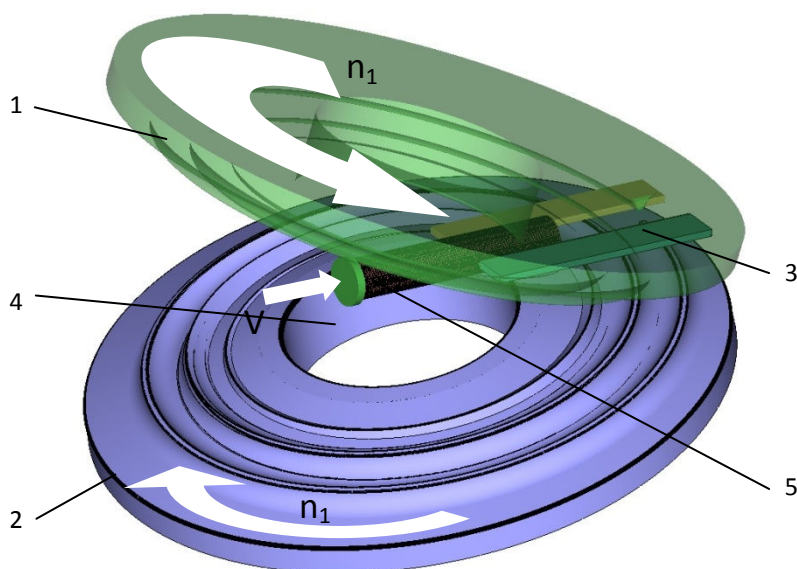
Rys. 5.21. Schemat procesu walcowania kul w mimośrodowych wykrojach spiralnych, dwoma dyskami stożkowymi: 1 – tarcza górna, 2 – tarcza dolna, 3 – prowadnica, 5 – półfabrykat, 6 – ukształtowana kula, 7 – powierzchnia stożkowa, 8 – kołnierze klinowe, 9 – kołnierze wklęsłe, 10 – nóż odcinający

Opracowany proces bazuje na metodzie walcowania odkuwek kul w wykrojach spiralnych, z tą różnicą, że narzędzia rozsunięto mimośrodowo, w przeciwnych do siebie kierunkach o stałą wartość e w stosunku do osi półfabrykatu. Kierunki przesunięcia narzędzi spiralnych są zgodne ze zwrotami wektorów składowych prędkości V_n prostopadłych do osi półfabrykatu – 5. W efekcie takiego ustawienia narzędzi, podczas ich obrotu pojawiają się dwie składowe prędkości półfabrykatu: styczna V_n , prostopadła do osi walcowania, która wywołuje ruch obrotowy wsadu oraz normalna V , równoległa do osi walcowania i powodująca osiowe przemieszczanie półfabrykatu.

5.3.1. Analiza numeryczna procesu walcowania kul tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych

Zastosowanie wirtualnego modelowania w analizie procesów obróbki plastycznej pozwala na prowadzenie już na etapie projektowania technologii weryfikacji poprawności przyjętych założeń. W wyniku czego w znacznym stopniu zmniejsza się koszty wdrożeniowe oraz poprawia jakość kształtowanych wyrobów. Dlatego też nowo opracowane metody walcowania kul zostały przeanalizowane wirtualnie z wykorzystaniem technik numerycznych.

Symulacje numeryczne procesu walcowania odkuwek kul tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych, wykonano metodą elementów skończonych (MES) w programie Simufact Forming w wersji 10.0. Opracowany na potrzeby prowadzonej analizy model geometryczny procesu walcowania pokazano na rysunku 5.22.

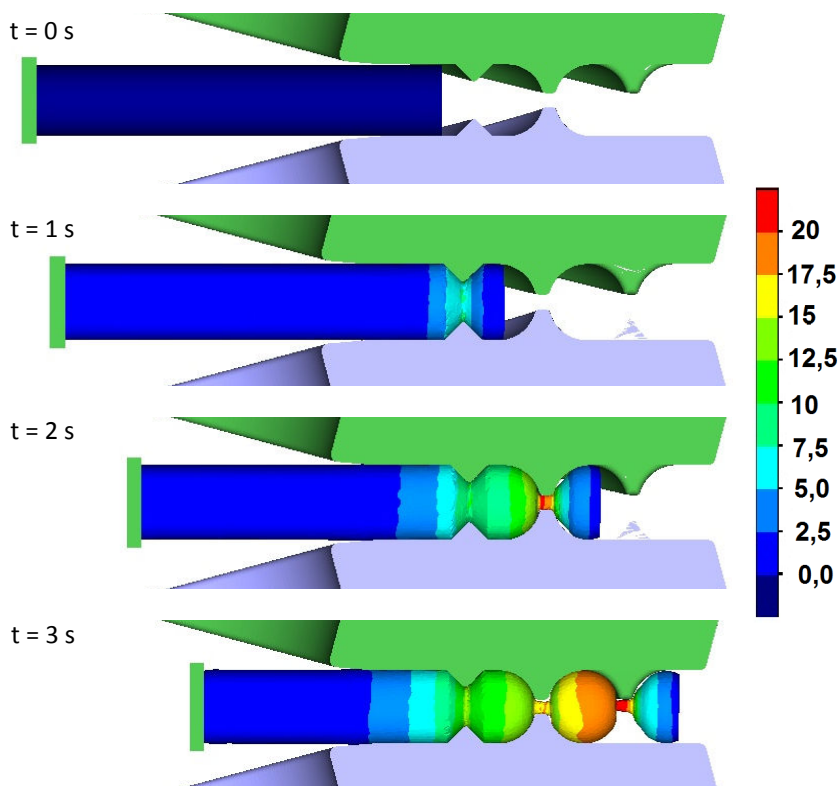


Rys. 5.22. Model geometryczny procesu walcowania kul dwoma dyskami stożkowymi w wykrojach spiralnych

W skład modelu wchodzi dwie identyczne tarcze stożkowe – 1 i 2, dwie listwy prowadzące – 3, mające za zadania ustalenie położenia półfabrykatu w trakcie walcowania,

popychacz - 4 oraz wsad – 5, (pręt okrągły o średnicy $\varnothing 40$ mm), modelowany za pomocą ośmiowęzłowych elementów heksagonalnych. Na stożkowych powierzchniach roboczych dysków wykonane są śrubowe wykroje o klinowo-wklęsłych powierzchniach bocznych. W symulacjach wykorzystano model materiałowy stali w gatunku 100Cr6, zaczerpnięty z biblioteki programu Simufact. Ponadto założono, że: materiał wsadu przed walcowaniem został nagrzwany w całej objętości do temperatury 1150°C , zaś narzędzia mają stałą temperaturę 150°C . Tarcze obracają się w przeciwnych kierunkach z jednakową prędkością $n_1 = 60$ obr/min. Na powierzchni styku materiał-narzędzie przyjęto wartość graniczną czynnika tarcia $m = 1$. Współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami założono na poziomie $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, zaś między materiałem a otoczeniem $0,35 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Przyjęto również, że podczas symulacji tarcze wykonają co najmniej 4 obrotów. Jest to wystarczające do opuszczenia przez materiał wykrojów spiralnych.

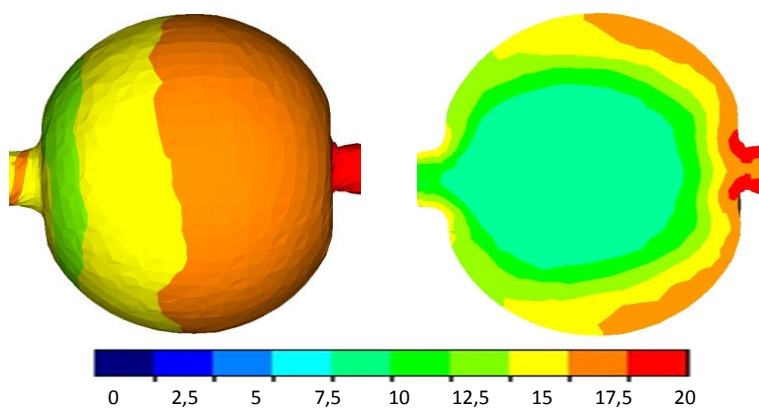
W efekcie przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano możliwość prześledzenia jak zmienia się kształt wyrobu w trakcie procesu walcowania, co pokazano na rys. 5.23. Kinematyka płynięcia materiału jest podobna do tej, jaką obserwowano podczas kształtowania skośnego kul w wykrojach śrubowo-klinowych.



Rys. 5.23. Progresa kształtu półwyrobu, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, w procesie walcowania kul tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych

Zasadnicza różnica w stosunku do walcowania skośnego polega na tym, że przesuw wsadu wywołany jest siłą zewnętrzną, pochodzącą od popychacza. W początkowych fazach walcowania klinowe kołnierze zagłębiają się w przemieszczany półfabrykat i kształtują na jego obwodzie pierścieniowy rowek. W kolejnych fazach procesu następuje kształtowanie powierzchni sferycznych wyrobów. Odbywa się to w wyniku oddziaływania wklęsłych kołnierzy wykrojów, które redukują przekrój poprzeczny szyjki, co powoduje osiowe płynięcie materiału i wypełnianie wykroju. Widoczne jest, że podczas walcowania kul w wykroju spiralnym, odkształcenia osiągają bardzo duże wartości, a ich rozkład jest nierównomierny. Jest to związane z kinematyką procesu, w którym występują duże różnice prędkości (ze względu na zwiększający się promień narzędzi). Prędkość obwodowa narzędzi na wejściu do wykroju jest znacznie mniejsza od prędkości obwodowej na wyjściu z wykroju. W efekcie dochodzi do dużych poślizgów pomiędzy kształtowanym materiałem a narzędziami i generowania znacznych odkształceń w kierunku obwodowym (przez siły tarcia). Dochodzi tutaj również zjawisko skręcania kształtowanych półfabrykatów, co dodatkowo zwiększa przerób plastyczny materiału. Taki charakter odkształceń powoduje deformację walcowanych odkuwek (rys. 5.24), która przejawia się spłaszczeniem kul w obszarach szyjek. Należy tutaj zaznaczyć, że zaobserwowane deformacje kształtu kul nie mają istotnego znaczenia w przypadku ich zastosowania w młynach kulowych. Zgodnie z Polską Normą PN-H-94057:1998 dokładność wykonania kul przez walcowanie (przeznaczonych na mielniki) wynosi $\pm 3\text{ mm}$ [65]. Osiowe spłaszczenie zarysu kul ma również swoje zalety, a mianowicie: ułatwiony jest proces odcinania ukształtowanych odkuwek od szyjek łączących kule, dodatkowo ostre krawędzie, które często pozostają po odciętych mostkach nie wystają poza zarys odkuwek.

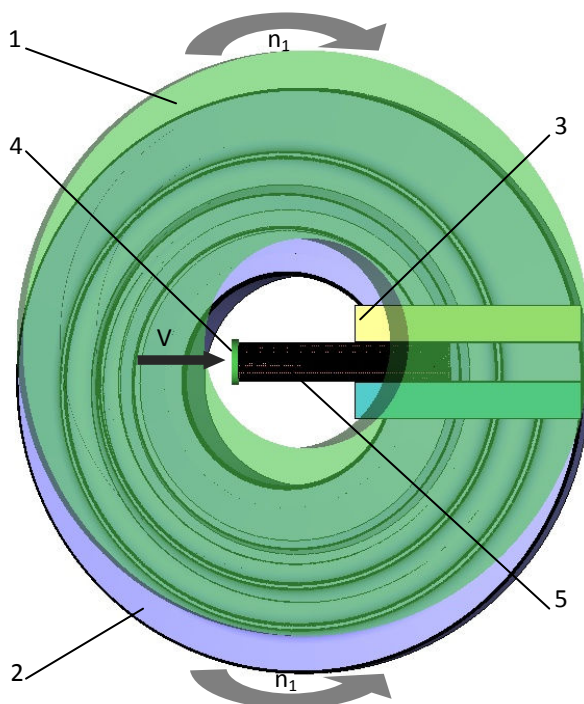
Reasumując można stwierdzić, że opracowany proces walcowania kul tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych, pozwala kształtować odkuwki z dokładnością wystarczającą w przypadku ich przeznaczenia na mielniki.



Rys. 5.24. Wyznaczony numerycznie kształt kuli wraz z rozkładem intensywności odkształcenia w procesie walcowania kul tarczami stożkowymi w wykrojach spiralnych

5.3.2. Symulacje numeryczne procesu walcowania kul w mimośrodowych wykrojach spiralnych

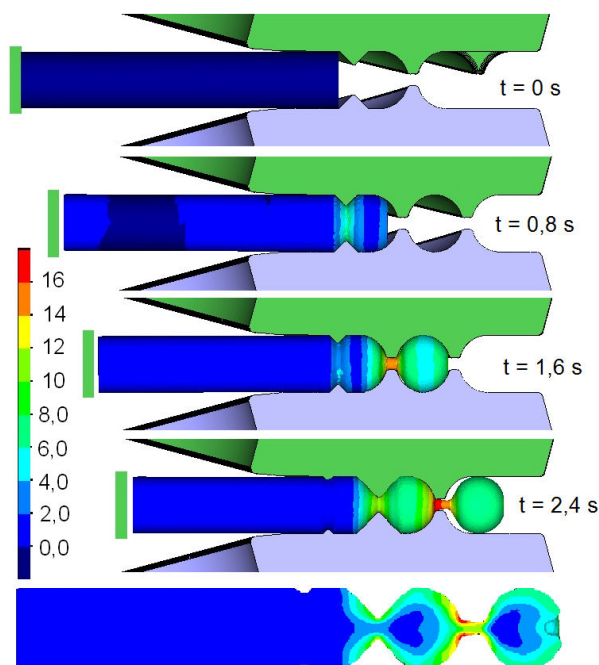
Wykorzystując techniki numeryczne przeanalizowano również proces walcowania kul narzędziami stożkowymi, ustawionymi mimośrodowo w stosunku do osi walcowania. W trakcie symulacji numerycznych kształtowania odkuwek kul, przyjęto identyczne parametry jak w procesie opisanym uprzednio. Przy czym narzędzia rozsunięto w przeciwnych do siebie kierunkach od osi półfabrykatu o wartość wynoszącą połowę średnicy wsadu (20 mm) (rys. 5.25). Dodatkowo uwzględniono, że popychacz oddziałuje na wsad tylko w początkowym etapie walcowania, do chwili uchwycenia materiału przez klinowe kołnierze narzędzi.



Rys. 5.25. Model geometryczny procesu walcowania kul w mimośrodowych wykrojach spiralnych:
1 – tarcza dolna, 2 – tarcza górna, 3 – prowadnica, 4 – popychacz, 5 – wsad

Również w tym przypadku przeprowadzone symulacje potwierdziły możliwość walcowania kul w wykrojach spiralnych przy pomocy tarczowo-stożkowych narzędzi, usytuowanych mimośrodowo względem wsadu. W efekcie możliwe jest wyeliminowanie popychacza, a tym samym uproszczenie procesu. Analizując progresję kształtu pokazaną na rys. 5.26, widoczne jest, że w początkowym etapie procesu popychacz styka się z półfabrykatem, przemieszczając go w kierunku przestrzeni roboczej. Po uchwyceniu materiału przez obracające się kołnierze, wsad zostaje samoczynnie wciągnięty do przestrzeni roboczej, gdzie następuje kształtowanie odkuwek kul. Podobnie jak w poprzednio analizowanym procesie, obserwuje się dużą niejednorodność odkształceń, które osiągają

największe wartości w obszarach szyjek łączących walcowane kule, co jest efektem redukcji przekroju poprzecznego. Równie duże wartości odkształceń odnotowano w warstwach przypowierzchniowych, położonych od strony wyjściowej wykroju, które są związane z dużymi poślizgami między materiałem i narzędziami, generującymi odkształcenia w kierunku obwodowym (zbędne). Duże odkształcenia łącznika, związane z jego skręcaniem i zginaniem były przyczyną przerwania symulacji po niespełna 2,5 obrotach narzędzi. Jednak już na tym etapie obliczeń widoczne jest, że opracowana metoda może być stosowana do walcowania odkuwek kul, z dokładnością wystarczającą w przypadku ich wykorzystania jako mielniki w młynach kulowych.

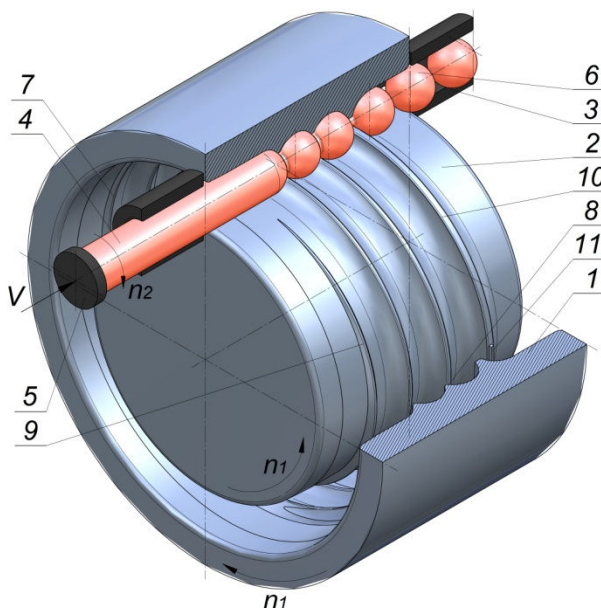


Rys. 5.26. *Progresja kształtu półwyrobu, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia, w procesie walcowania kul tarczami stożkowymi ustawionymi mimośrodowo*

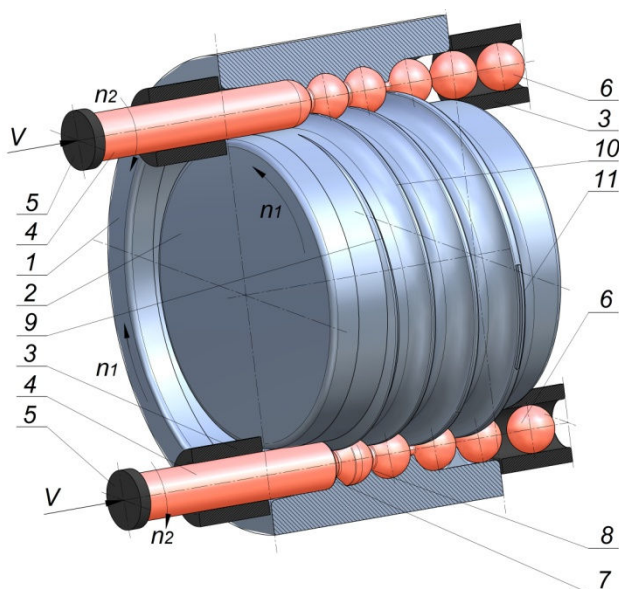
5.4. Walcowanie kul w śrubowym wykroju wewnętrznym

Rozwijając procesy walcowania odkuwek kul, opracowano metodę kształtowania półfabrykatów w wewnętrznych wykrojach śrubowych. W procesie wykorzystuje się narzędzia w kształcie tulei oraz walca [55]. Przy czym wewnątrz tulei znajdują się śrubowo-klinowe kołnierze, które współpracują z identycznymi kołnierzami umieszczonymi na powierzchni walca. Osie narzędzi są do siebie równoległe, a odległość między nimi jest tak dobrana, aby bruzdy utworzone przez wklęsłe powierzchnie kołnierze tworzyły wykroj o zarysie walcowanych kul. Schemat procesu walcowania kul w wykrojach wewnętrznych pokazano na rys. 5.27 i 5.28. Podczas walcowania półfabrykat – 4 umieszczany jest w prowadnicy – 3, która znajduje się w przestrzeni roboczej, utworzonej przez narzędzie z wykrojem wewnętrznym - 1 oraz narzędzie z wykrojem zewnętrznym - 2.

Narzędzia obracają się ze stałą prędkością n_1 w przeciwnych kierunkach. Natomiast półfabrykat w tym czasie przemieszczany jest przez popychacz – 5 w kierunku przestrzeni roboczej.



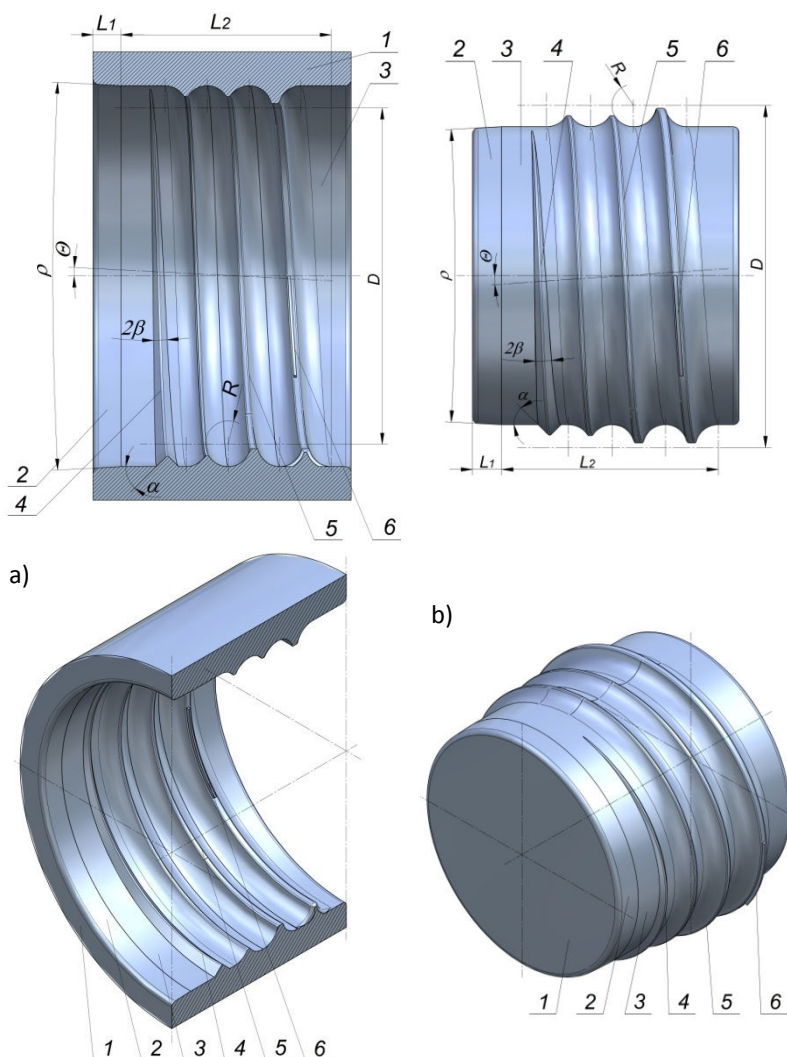
Rys. 5.27. Schemat procesu walcowania kul w śrubowych wykrojach wewnętrznych (opis w tekście)



Rys. 5.28. Schemat procesu walcowania kul w śrubowych wykrojach wewnętrznych w układzie podwójnym (opis w tekście)

W początkowym etapie procesu przemieszczający się półfabrykat zostaje uchwycony przez stożkowe powierzchnie, umieszczone w strefie wejściowej narzędzi i wprowadzony w ruch obrotowy, w tym czasie następuje również skalibrowanie kształtu wsadu. Następnie śrubowo-klinowe kołnierze – 7 i 9 zagłębiają się w półfabrykat, kształtując na jego obwodzie pierścieniowy rowek o stożkowych powierzchniach bocznych, które w kolejnych etapach walcowania, w wyniku oddziaływania śrubowych kołnierzy o powierzchniach wklęsłych – 8 i 10, zostają przekształcone w powierzchnie sferyczne półfabrykatów. W ostatnim etapie walcowania oddziela się od ukształtowanych kul - 6 łączniki. Proces rozcinania realizowany jest za pomocą noży - 11 umieszczonych na ostatnich kołnierzach śrubowych w strefie kalibrowania obu narzędzi. Walcowanie w wykrojach wewnętrznych charakteryzuje się dużą wydajnością, którą można dodatkowo zwiększyć kształtując kule w układzie podwójnym (rys. 5.28). W takim przypadku wsad podawany jest do przestrzeni roboczej w dwóch tulejach prowadzących, położonych naprzeciwko siebie w jednej płaszczyźnie. Możliwe jest również wielokrotne zwiększenie wydajności procesu, dzięki zastosowaniu narzędzi wielozwojnych (wielokrotnych). Zaletą tej metody jest również zmniejszenie niebezpieczeństwa tworzenia się pęknięć wewnętrznych, dzięki kształtowaniu materiału w wykrojach wklęsłych (podobnie jak w procesach kucia w kowadłach kształtowych). Natomiast wadą procesu jest konieczność ciągłego podawania półfabrykatu do przestrzeni roboczej. Dochodzą tutaj również większe trudności z wykonaniem wewnętrznych kołnierzy śrubowo-klinowych, co podnosi koszty narzędzi.

Na kolejnym rys. 5.29 pokazano kształt narzędzi z wewnętrznymi kołnierzami śrubowo-klinowymi, które wykorzystuje się w procesie walcowania. Analogicznie do konstrukcji narzędzi śrubowych stosowanych w procesach walcowania skośnego, powierzchnie robocze podzielone są na kilka podstawowych stref, w zależności od tego jaką pełnią rolę podczas kształtowania [47]. W strefie wejściowej - 2 narzędzia mają stożkowy kształt. Następnie na powierzchni cylindrycznej – 3 umieszczone są śrubowe kołnierze. Przy czym w strefie wcinania, kołnierze mają kształt klinów – 4, nawiniętych na wewnętrznej powierzchni cylindrycznej. Natomiast w strefie kształtowania i kalibrowania powierzchnie klinowe kołnierzy zmieniają kształt na wklęsły - 5 o promieniu R walcowanych kul. Dodatkowo w strefie kalibrowania, na ostatnich zwojach kołnierzy umieszczone są noże, oddzielające szyjki od ukształtowanych kul. Analogicznie, takie same strefy można wyróżnić na walcu śrubowym (rys. 5.29b), który współpracuje z narzędziem z wewnętrznymi kołnierzami śrubowo-klinowymi (rys. 5.29a). Podstawą projektowania zarysu powierzchni roboczych segmentów jest konieczność zachowania stałej objętości materiału zamkniętego między kołnierzami wykrojów. Nie mniej ważne są również warunki określające wartość skoku wykrojów śrubowych oraz szerokość kołnierzy, które wpływają na dokładność walcowanych kul. Szczegółowo zasady kalibrowania narzędzi opisano w rozdziale drugim i trzecim, dlatego też nie będą one tutaj szerzej omawiane.

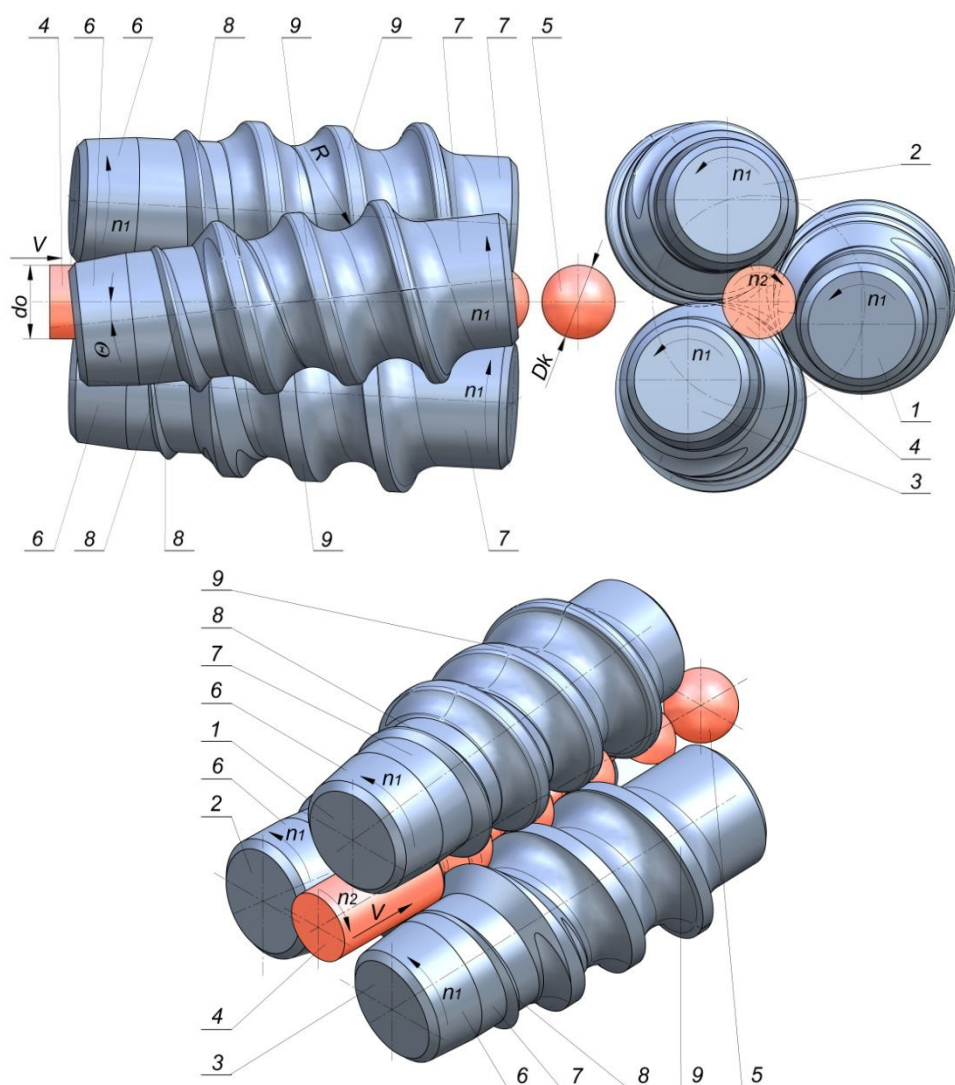


Rys. 5.29. Konstrukcja narzędzi do walcowania kul w śrubowych wykrojach wewnętrznych: a) segment z kołnierzami wewnętrznymi, b) walce z kołnierzami śrubowymi zewnętrznymi (opis w tekście)

5.5. Walcowanie skośne kul trzema walcami śrubowymi

Większość omawianych dotychczas procesów walcowania kul w wykrojach śrubowych, śrubowo-spiralnych i spiralnych wymaga stosowania dodatkowego oprzyrządowania - prowadnic, które utrzymują kształtowany półfabrykat w przestrzeni roboczej. Urządzenia tego typu w trakcie walcowania są narażone na stosunkowo duże obciążenia, co powoduje szybkie ich zużywanie. Dodatkowo komplikują one konstrukcję walcarki, zwiększając jej koszty. Dlatego też aby wyeliminować elementy ustalające położenie półfabrykatów, opracowano proces walcowania skośnego kul w wykrojach śrubowych po-

między trzema walcami [51]. Metoda oparta jest na procesie walcowania skośnego rur trzema walcami stożkowymi. Przy czym w miejsce gładkich lub stopniowanych narzędzi stożkowych stosuje się walce cylindryczne, na powierzchniach których wykonane są śrubowo-klinowe kołnierze kształtujące. Walce rozmieszczone są symetrycznie co 120° dookoła osi walcowania (pokrywającej się z osią półfabrykatu) oraz skrócone względem osi walcowania pod jednakowym kątem Θ . Odstęp osi walców od osi walcowania jest stały, a płaszczyzny poprowadzone przez te osie są do siebie równoległe. Schemat procesu walcowania skośnego kul trzema walcami śrubowo-klinowymi przedstawiono na rys. 5.30.



Rys. 5.30. Schemat procesu walcowania skośnego kul trzema walcami śrubowymi (opis w tekście)

W trakcie procesu półfabrykat w kształcie pręta – 4 podawany jest do przestrzeni roboczej, utworzonej przez trzy walce – 1, 2, 3, które obracają się ze stałą prędkością n_1 w tym samym kierunku. W początkowej fazie procesu stożkowe powierzchnie walców – 6 chwytają wsad – 4 i redukują jego średnicę do wymiaru walcowanych kul, jednocześnie wprowadzając go w ruch obrotowy i przemieszczając w kierunku wykrojów śrubowych – 8 i 9, umieszczonych na cylindrycznych powierzchniach narzędzi – 7. Następnie klinowe kołnierze wykrojów – 8 wcinają się we wsad, oddzielając od półfabrykatu objętość materiału równą objętości kuli i łącznika, która następnie w wyniku oddziaływania kołnierzy o wklęsłych powierzchniach bocznych – 9, jest przekształcana w kulę – 5. Całkowite odzielenie odwalcowanych kul odbywa się w strefie kalibrowania.

Zaletą opracowanej metody jest zmniejszenie tendencji do powstawania pęknięć wewnętrznych kształtowanych odkuwek oraz wyeliminowanie prowadnic. Zmniejsza się również niebezpieczeństwo pojawienia się niekontrolowanych poślizgów, co wpływa na poprawę jakości walcowanych wyrobów. Możliwe jest także walcowanie kul z półfabrykatów o średnicach większych od wymiaru kształtowanych kul. Natomiast do ograniczeń procesu można zaliczyć między innymi stosunkowo niewielką średnicę narzędzi, która nie powinna przekraczać 2,6 średnicy walcowanych odkuwek, co wpływa niekorzystnie na sztywność i wytrzymałość walców. Wadą jest również większy koszt wykonania walcarki i narzędzi (trzy walce śrubowe).

W procesie walcowania skośnego kul trzema narzędziami wykorzystywane są walce z wykrojami śrubowo-klinowymi, które projektuje się według tych samych zasad, co narzędzia śrubowe, stosowane podczas walcowania skośnego odkuwek w kłatkach dwuwalcowych. Zasadnicza różnica w stosunku do konstrukcji narzędzi pracujących w układzie dwuwalcowym związana jest ze znacznie mniejszą relacją średnicy narzędzi do średnicy kuli (tradycyjnie przyjmuje się średnicę walców $5 \div 6$ razy większą od średnicy odkuwek). Wynika to z konieczności zamknięcia materiału o stosunkowo niewielkiej średnicy w wykroju utworzonym przez bruzdy trzech narzędzi oraz redukcji przekroju przekraczającej 90% w obszarach szyjek, której efektem jest rozdzielenie walcowanych kul. Dlatego też aby możliwa była realizacja procesu, przyjmuje się mniejszą średnicę kołnierzy na dwóch walcach w strefie kształtowania i kalibrowania, zaś w trzecim narzędziu kołnierze w tych strefach powinny mieć większą wysokość, zbliżoną do połowy średnicy walcowanych kul.

6. Problematyka kształtowania kul ze złomowa- nych szyn kolejowych

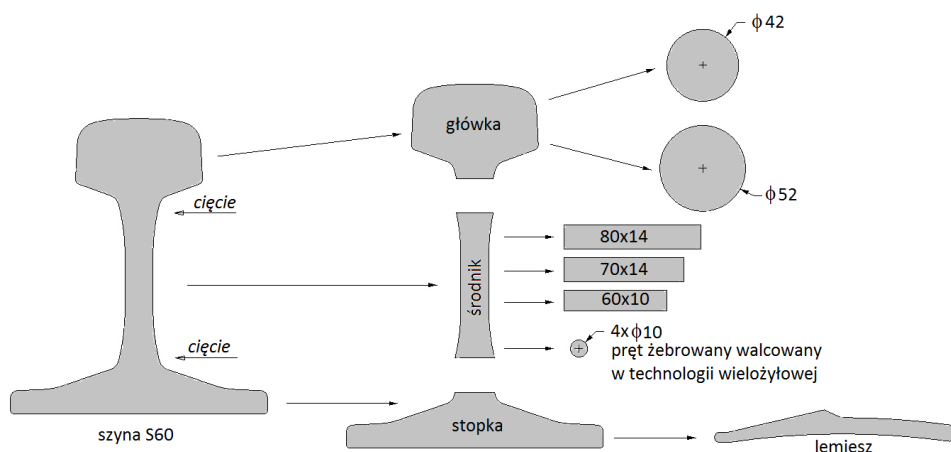
Do wytwarzania kul na mielniki można wykorzystać złom szyn normalnotorowych (o oznaczeniu S60 i S49), w którym można wyróżnić następujące elementy:

- główkę, po której toczą się koła taboru kolejowego;
- stopkę, przystosowaną do przytwierdzenia szyny do podkładki i podkładu;
- środek, łączący ze sobą główkę i stopkę.

Szyny kolejowe muszą się odznaczać dużą wytrzymałością na zginanie i ścieranie, twardością i jednocześnie pewną ciągliwością, a ponadto sprężystością i trwałością. Szyny są wyrabiane ze stali zlewnej – wg PN-EN 13674-1: 2006 – w gatunkach:

- R200: stal C-Mn, $R_m = 680$ MPa, $A=14\%$, 200-240 HBW; C=0,38-0,62%; Si=0,13-0,6%; Mn=0,65-1,15%; zanieczyszczenie: P(max)=0,04%, Cr(max)=0,15%; Al(max)=0,004%;
- R220: stal C-Mn, $R_m = 770$ MPa, $A=12\%$, 220-260 HBW; C=0,5-0,6%; Si=0,2-0,6%; Mn=1,0-1,25%; zanieczyszczenie: j.w.;
- R260: stal C-Mn, $R_m = 880$ MPa, $A=10\%$, 260-300 HBW; C=0,6-0,82%; Si=0,13-0,6%; Mn=0,65-1,25%; zanieczyszczenie: j.w.;
- R260: stal C-Mn, $R_m = 880$ MPa, $A=10\%$, 260-300 HBW; C=0,53-0,77%; Si=0,13-0,62%; Mn=1,25-1,75%; zanieczyszczenie: j.w.

Na rys. 6.1 przedstawiono przykład zagospodarowania złomowanej szyny kolejowej do wyrobu różnych półwyrobów. Z główki szyny można wykonać pręty okrągłe, z których następnie mogą być wytwarzane półwyroby kul.



Rys. 6.1. Przykład wykorzystania złomowanej szyny kolejowej do wyrobu prętów okrągłych, płaskowników i wyrobów kształtowych

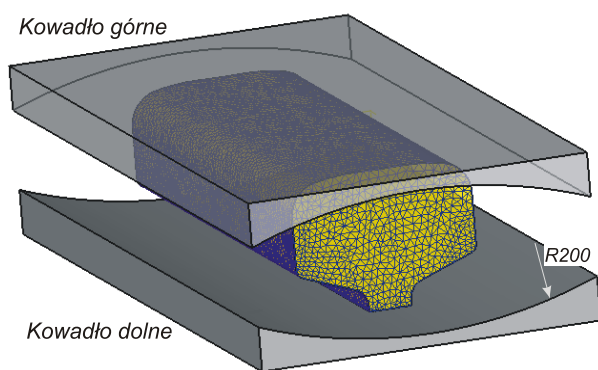
6.1. Kształtowanie pręta okrągłego z główki szyny

6.1.1. Prasowanie

Istotnym zagadnieniem jest określenie miejsca, w którym główka powinna być oddzielona od reszty szyny. Ograniczeniem jest tutaj pozostałość średnika, która podczas kształtowania pręta może stać się przyczyną powstawania wad w postaci zakuć. Dla wyznaczenia maksymalnej wysokości początkowej H_g główki szyny wykonano w programie Deform-3D analizę numeryczną [59]. W obliczeniach przyjęto model przestrzenny, w którym spęczany odcinek szyny był podzielony na ok. 100 tys. elementów tetragonalnych (rys. 6.2). Kształtowanie realizowano przy pomocy dwóch półokrągłych kowadeł, o promieniu zaokrąglenia powierzchni roboczej równym 200 mm. Długość główki szyny wynosiła 200 mm.

W symulacji prasowania główki szyny przyjęto następujące założenia:

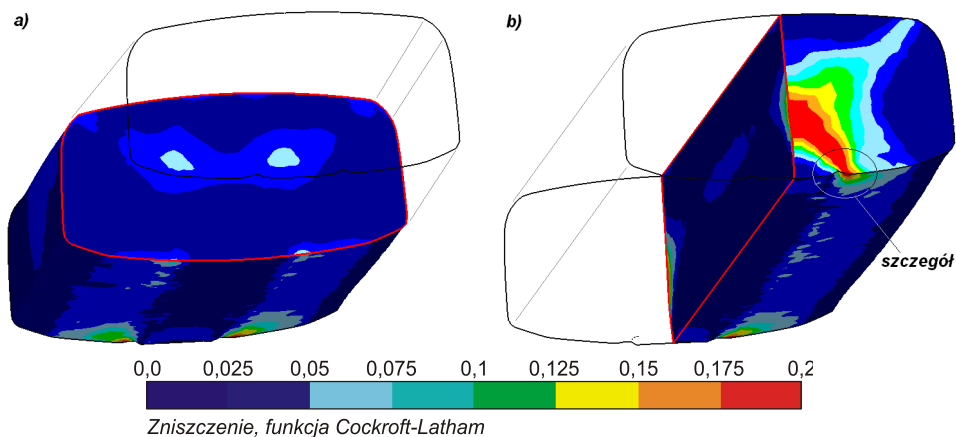
- analiza metodą elementów skończonych jest realizowana w oparciu o model termomechaniczny oraz model pękania Cockrofta-Lathama;
- prędkość narzędzia ruchomego (kowadło górne) wynosi 8 mm/s;
- temperatura narzędzi wynosi 200°C, natomiast początkowa temperatura materiału wsadowego wynosi 1140°C;
- szyna wykonana ze stali węglowej (o zawartości 0,6%C) jest zamodelowana jako materiał sztywno-plastyczny, gdzie dane materiałowe są pobrane z bazy danych programu;
- współczynnik wymiany ciepła pomiędzy szyną a narzędziami wynosi 6 kW/m²K;
- warunki tarcia są modelowane modelem tarcia stałego, gdzie czynnik tarcia wynosi $m = 0,3$ (odpowiada to warunkom kształtowania stali na gorąco z użyciem smarowania).



Rys. 6.2. Model MES procesu prasowania (spęczania) głowy szyny S60

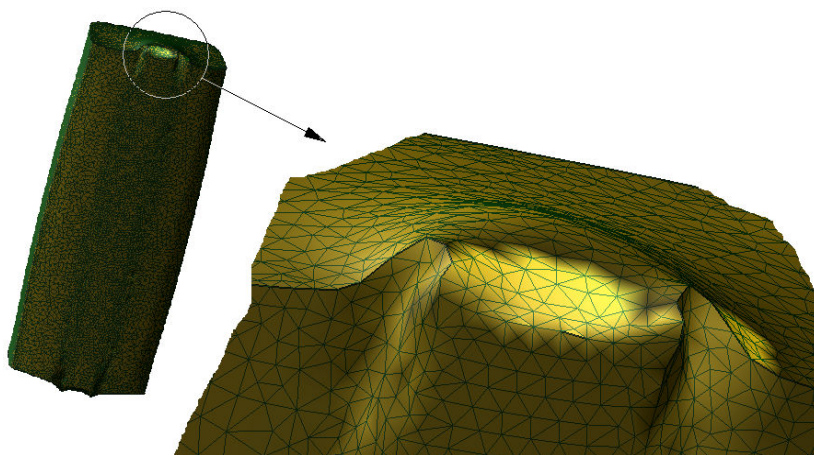
Na rys. 6.3. przedstawiono lokalizację dwóch charakterystycznych przekrojów spęczanej głowy szyny. Pierwszy przekrój poprzeczny (rys. 6.3a) przebiega w połowie długości szyny. Ze względu na wymiary analizowanego fragmentu spęczki można przyjąć, że w przekroju tym panuje płaski stan odkształcenia. Dodatkowo, na rys. 6.3 zamieszczono rozkład obliczonej wartości całki Cockrofta-Lathama. Pełny obraz rozkładu tej wielkości wyjaśnia rys. 6.3b (przekrój wzdłużny szyny). Jak wynika z tego rysunku, jedynie czołowa powierzchnia szyny, która jednocześnie jest powierzchnią swobodną, jest

najbardziej narażona na ewentualne pęknięcia. Jednakże wartość całki Cockrofta-Lathama jest kilka razy mniejsza od wartości granicznej, równej 0,95 dla stali kolejowej w gatunku R200 [41].



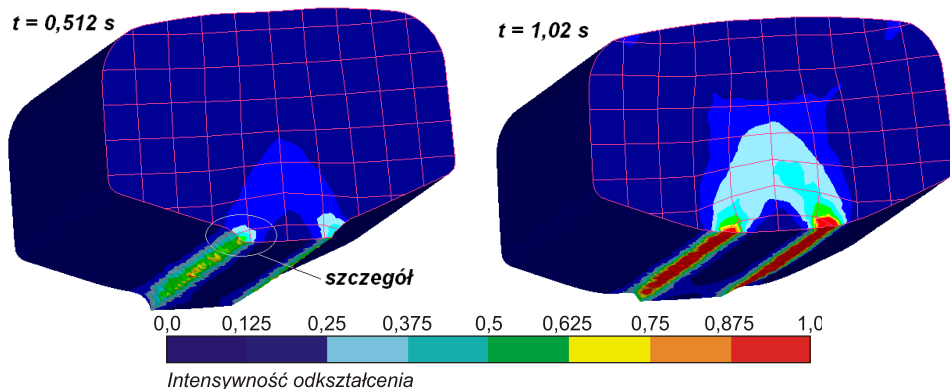
Rys. 6.3. Uzyskany kształt odkształconej główki szyny S60 oraz rozkład funkcji Cockrofta-Lathama z wyszczególnieniem dwóch charakterystycznych przekrojów, gdy czas $t = 1,46$ s (koniec spęczniania) oraz początkowa wysokość $H_G = 53$ mm

Powierzchnia czołowa jest podatna na silne zdeformowanie, a w miejscu wyróżnionego szczegółu na rys. 6.3b powstaje wgłębienie. Wielkość tego wgłębienia zdeterminowana jest między innymi przez wartość wysokości H_G . Na rys. 6.4 przedstawiono uzyskany kształt wspomnianego fragmentu spęczki (dla przypadku, gdy $H_G = 60,5$ mm). Jak wynika z tego rysunku, „wprasowanie” środniczka w głowę szyny powoduje, że na czołowej powierzchni swobodnej spęczki powstaje wada (o wielkości rzędu 4 mm – dotyczy przypadku przedstawionego na rys. 6.4), która może być przyczyną zawalcowania na dalszym etapie przeróbki uzyskanego półwyrobu.

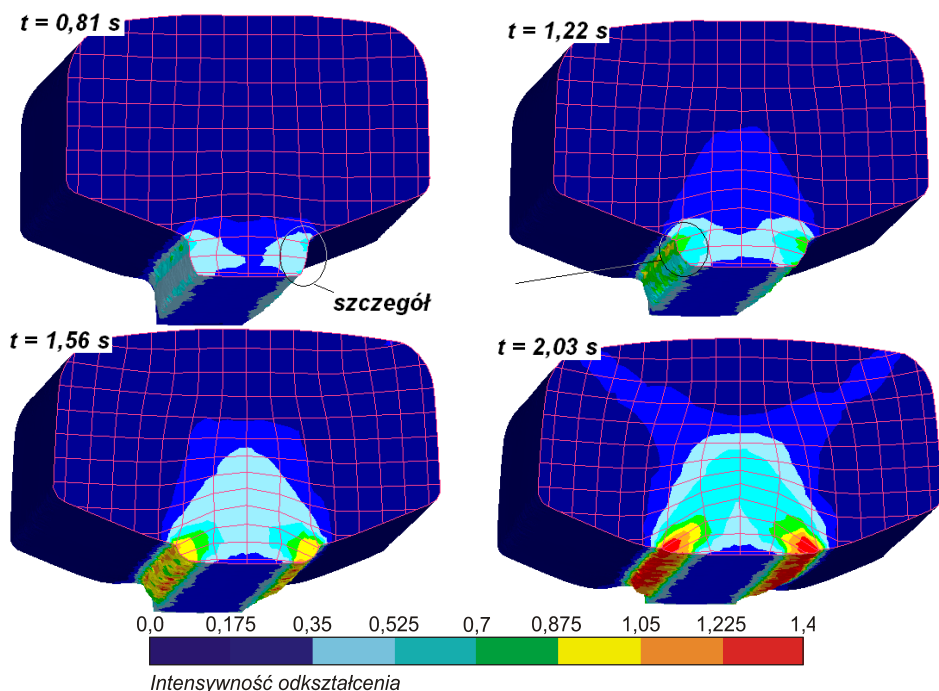


Rys. 6.4. Fragment środniczka wprasowanego do głowy szyny – opis w tekście

Na podstawie symulacji MES określono dopuszczalną wartość parametru H_G . Na kolejnych rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono uzyskany kształt siatki koordynacyjnej naniesionej na przekrój poprzeczny szyny (ten sam, co na rys. 6.3a) oraz rozkład intensywności odkształcenia dla wybranych przypadków i etapów spęczania.



Rys. 6.5. Rozkład intensywności odkształcenia w spęczce oraz kształt siatki koordynacyjnej naniesionej na przekrój środkowy dla spęczanej głowy szyny o początkowej wysokości $H_G = 53$ mm (opis w tekście)



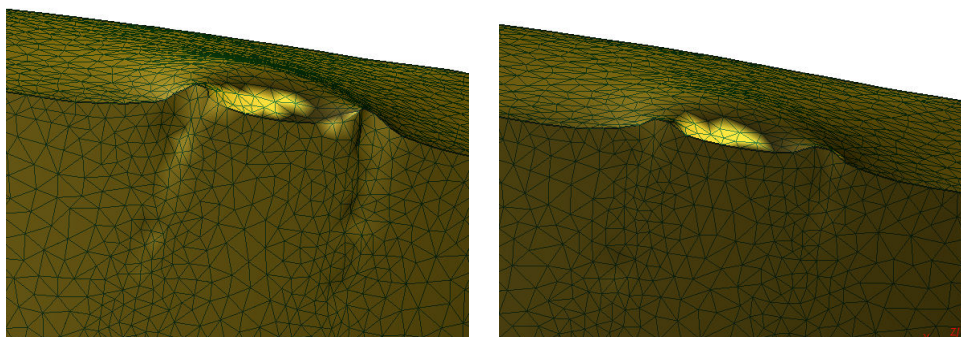
Rys. 6.6. Rozkład intensywności odkształcenia w spęczce oraz kształt siatki koordynacyjnej naniesionej na przekrój środkowy dla spęczanej głowy szyny o początkowej wysokości $H_G = 60,5$ mm (opis w tekście)

Zaznaczony na rysunku 6.5 „szczegół” wskazuje obszar przejścia głowy do „wciśniętego” środnika. Obszar ten jest silnie odkształcony, ale w tym przypadku nie zaobserwowano powstawania zakucia. Natomiast na rys. 6.6, „szczegół” wskazuje na miejsca, w których boczne powierzchnie środnika przyjmują kształt „beczkowaty” – w rezultacie „wciskanie” środnika do głowy doprowadza do powstania niewielkich zakuc. W tabeli 6.1 zestawiono podsumowanie wykonanej analizy pod kątem określenia granicznej wartości parametru H_G .

Tab. 6.1. Podsumowanie i oszacowana ocena analizy prasowania (spęczania) głowy szyny wraz ze środnikiem

H_G [mm]	53,0	55,5	58,0	60,5	63
Opis	++	+	+/-	-	--
++ , + : spęczanie nie powodujące zakuc w części środkowej (w odniesieniu do długości) szyny; +/- : możliwe zakucia; -, -- : spęczanie powoduje silne zakucia.					

Ponadto, na rys. 6.7 przedstawiono wygląd brzegu szyny (w sposób analogiczny, jak to zrobiono na rys. 6.4) dla dwóch przypadków „wprasowania” środnika w głowę szyny, tj. gdy wysokość początkowa $H_G = 55,5$ mm oraz 53 mm. Z porównania danych przedstawionych na rys. 6.4 (tj. dla $H_G = 60,5$ mm) i 6.7 wynika, że zmniejszenie początkowej wysokości H_G pozytywnie wpływa na zmniejszenie zaobserwowanego, niekorzystnego efektu deformacji brzegu szyny.

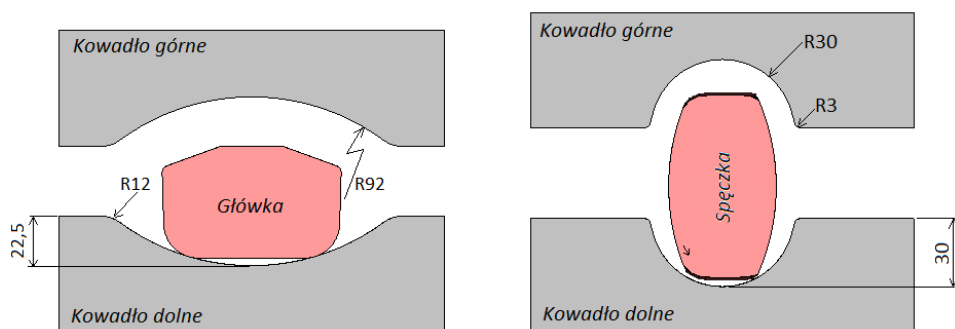


Rys. 6.7. Wygląd brzegu szyny, gdzie następuje wprasowanie środnika do głowy szyny: dla $H_G = 55,5$ mm (po lewej), dla $H_G = 53$ mm (po prawej)

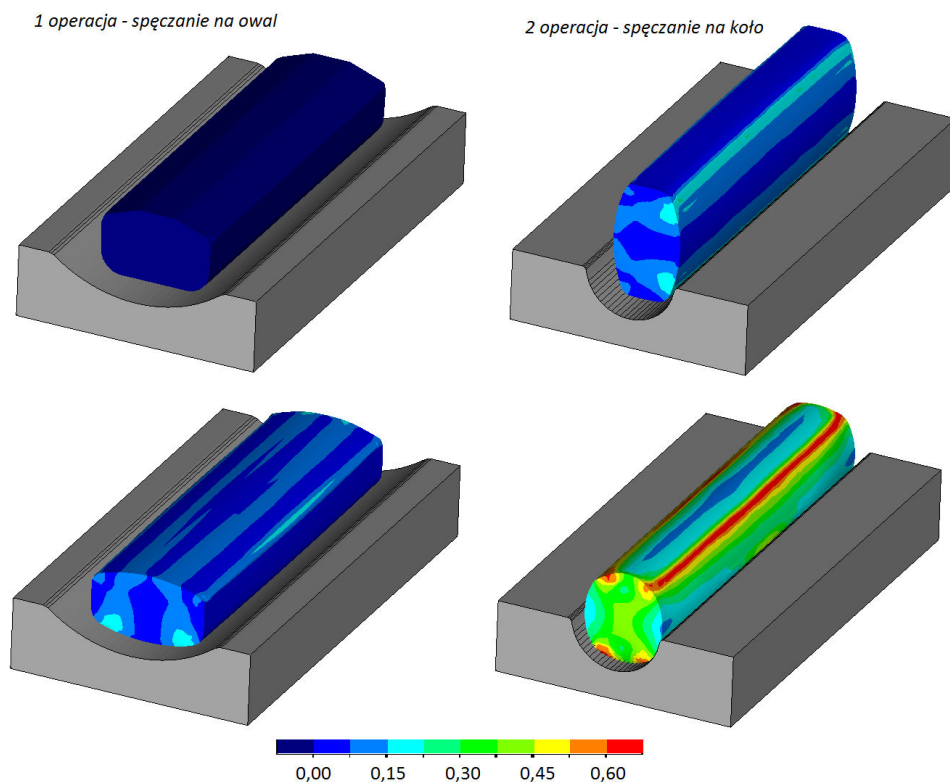
Reasumując wyniki obliczeń numerycznych należy stwierdzić, że w przypadku przeróbki plastycznej główek złomowanych szyn na pręty okrągłe, ich wysokość (w przypadku szyn S60) powinna być mniejsza od 53 mm.

W celu uzyskania z główki szyny pręta okrągłego prasowanie należy przeprowadzić w dwóch operacjach. W pierwszej z nich spęcza się materiał tak, by otrzymać półwyrob o owalnym przekroju poprzecznym, który stanowi wsad (po obrocie o kąt 90°) do kolejnej operacji prasowania w wykoju o przekroju kołowym.

Na rys. 6.8 przedstawiono schemat procesu prasowania główki szyny S60 (o długości 250 mm i wysokości $H_g = 46,5$ mm) na pręt o średnicy $\varnothing 60$ mm.



Rys. 6.8. Schemat dwuoperacyjnego procesu prasowania pręta okrągłego z główki szyny S60: spęszczanie na owal (z lewej), spęszczanie na koło (z prawej)

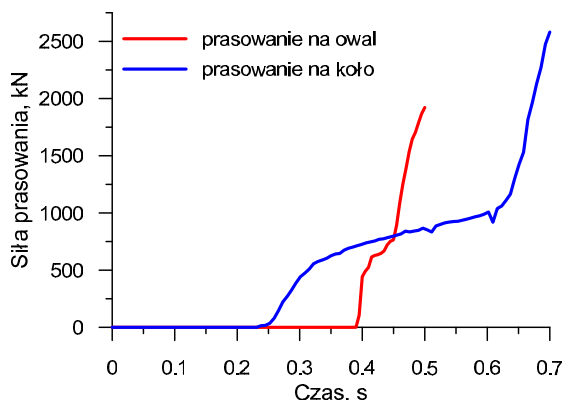


Rys. 6.9. Przebieg procesu prasowania pręta okrągłego (wg schematu z rys. 6.8) z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

Celem sprawdzenia przebiegu kształtowania takiego procesu wykonano symulację numeryczną metodą elementów skończonych w programie Simufact 10. W obliczeniach założono, że prasowanie realizowane jest w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, przy temperaturze wsadu (stali węglowej o zawartości 0,6%C) 1150°C oraz temperaturze

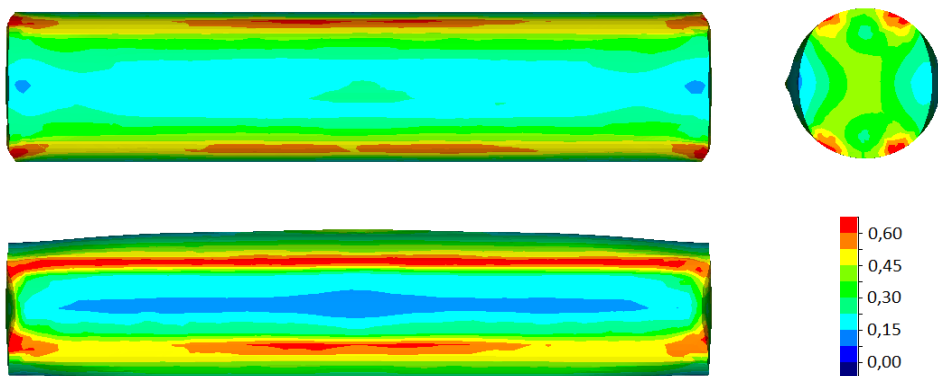
narzędzi (kowadeł) 250°C. Przyjęto, że narzędzie górne przemieszcza się z prędkością 50 mm/s, dolne zaś jest nieruchome. Tarcie na powierzchni kontaktu materiał-narzędzie opisano czynnikiem tarcia $m=0,5$.

Przebieg procesu prasowania pokazano na rys. 6.9. Natomiast, na kolejnym rysunku 6.10 przedstawiono rozkład sił kształtowania w poszczególnych operacjach prasowania. Maksymalne siły kształtowania występowały pod koniec poszczególnych operacji, gdy materiał zapełniał wykrój kowadeł.



Rys. 6.10. Rozkłady sił obliczone dla procesu prasowania pręta okrągłego wg schematu z rys. 6.8

Na rys. 6.11 pokazano pręt uzyskany w wyniku zasymulowanego numerycznie procesu prasowania. Widoczne jest, że otrzymany półwyrob charakteryzuje się zmienną wielkością przekroju poprzecznego, który jest największy w części środkowej i zmniejsza się w kierunku końców pręta. Jest to efektem niepożądanego płynięcia materiału w kierunku osiowym pręta, które jest najbardziej intensywne na jego końcach.



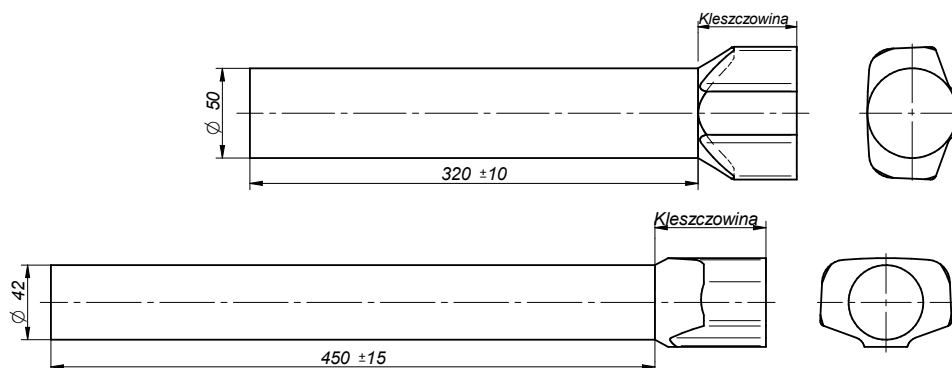
Rys. 6.11. Półwyrob pręta okrągłego otrzymany w procesie prasowania wg schematu z rys. 6.8, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

Uzyskany kształt półwyrobu pręta dyskwalifikuje metodę prasowania przy przygotowywaniu wsadów do procesu walcowania śrubowego kul. Natomiast, można tę metodę wykorzystać do kształtowania przedkuwek, na kule kute, gdy prasuje się krótkie odcinki główek, o określonej masie (w przypadku kucia bezwplywkowego).

6.1.2. Walcowanie wzdłużne

Z główek szyn można skutecznie wytwarzać metodą walcowania wzdłużnego pręty o średnicach w zakresie $40 \div 50$ mm. W przypadku walcowania kuźniczego długość wsadów stosowanych do walcowania jest ograniczona możliwością podawania ich do przestrzeni roboczej walców oraz masą. Najczęściej w takim procesie wsad jest podawany ręcznie i przez cały czas kształtowania utrzymywany jest w kleszczach. Dlatego też masa walcowanego elementu nie może być zbyt duża. Założono zatem, że długość головки wynosi 250 mm, a jej masa nie przekracza 6 kg. Wymienione ograniczenie nie występuje w przypadku walcowania hutniczego.

W ramach prac badawczych rozpatrzono dwa przypadki walcowania kuźniczego (realizowanego z główek prętów o wysokości $H_g=50$ mm) prętów o średnicach $\varnothing 50$ mm i $\varnothing 42$ mm - pokazanych na rys. 6.12. Półfabrykaty otrzymane w procesie walcowania mają nadatek technologiczny w postaci kleszczowiny, odcinanej w kolejnej operacji. Uzysk materiałowy w analizowanych przypadkach kształtowania prętów jest stosunkowo niewielki (80%), ale może być zwiększony poprzez wydłużenie wsadu (główki szyny) do walcowania.



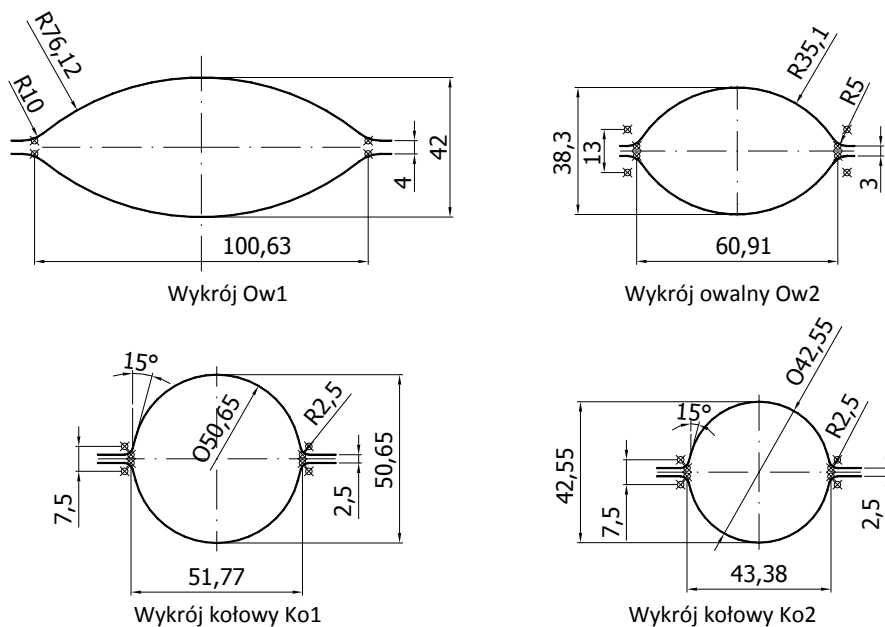
Rys. 6.12. Kształt i wymiary półwyrobów - prętów o średnicach $\varnothing 50$ i $\varnothing 42$ mm - założonych do uzyskania w procesie walcowania kuźniczego

Przyjęto, że головки szyn na pręty okrągłe powinny być walcowane w układzie wykrojów koło - owal - koło (pręt $\varnothing 50$) oraz koło - owal - koło - owal - koło (pręt $\varnothing 42$). Ten system kalibrowania zapewnia dużą elastyczność w zakresie stosowania właściwych ubytków przekroju poprzecznego pasma i dlatego jest używany dla szerokiego asortymentu walcowanych wyrobów. Zaletą jest również to, iż pasmo wychodząc z wykroju owalnego nie ma ostrych krawędzi powodujących znaczne zużycie walców. Stosowany system kalibrowania pozwala na osiągnięcie dobrej powierzchni walcowanych prętów, a zatem i wyrobu końcowego [68].

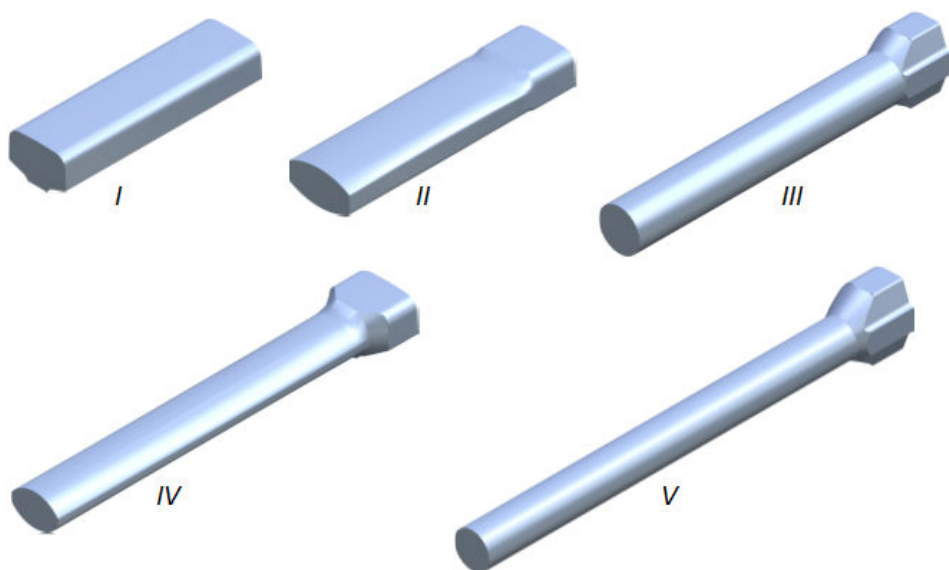
Kształt i wymiary wykroi do walcowania, przyjęte na podstawie opracowań [7, 19], pokazano na kolejnym rysunku 6.13.

Na rysunku 6.14 przedstawiono poglądowo kolejne fazy walcowania prętów, których parametry zebrano w tab. 6.2. Wsad - I walcowany jest w wykroju owalnym na półfabrykat o przekroju owalnym – II, który następnie walcowany jest w wykroju kołowym na

średnicę $\varnothing 50$ – III. W kolejnym etapie walcowany jest profil o przekroju owalnym – IV i ostatecznie wyrób o przekroju kołowym i średnicy $\varnothing 42$ – V. Podczas przenoszenia wsadu między wykrojami, jest on obracany za każdym razem o 90° .

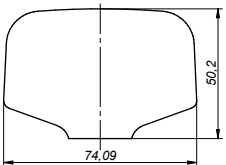
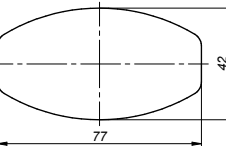
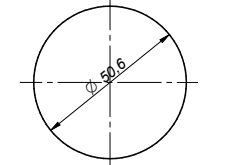
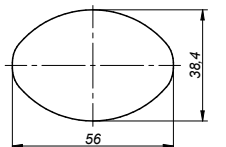
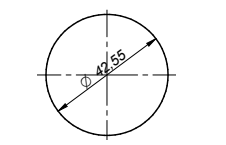


Rys. 6.13. Kształt i wymiary wykroi do walcowania wzdłużnego prętów o średnicach $\varnothing 50$ i $\varnothing 42$ mm z główek złomowanych szyn kolejowych



Rys. 6.14. Kolejne fazy walcowania prętów z główki szyny kolejowej S60 - opis w tekście

Tab. 6.2. Zestawienie parametrów geometrycznych analizowanego procesu walcowania kuźniczego prętów okrągłych

Wykroj	Szkiełko przekroju poprzecznego pasma	Pole przekroju poprzecznego S [mm ²]	Współczynnik wydłużenia λ	Współczynnik gniotu γ	Procentowy ubytek przekroju R [%]	Długość po walcowaniu L [mm]
		3150				
I		2690	1,171	0,168	14,60	235
II		1962,5	1,370	0,343	27,05	322
III		1671	1,174	0,241	14,85	378
IV		1385	1,207	0,241	17,12	456

Założono, że proces walcowania wzdłużnego główek szyn kolejowych będzie realizowany w walcierce kuźniczej WK2, której parametry techniczne zestawiono w tabeli 6.3.

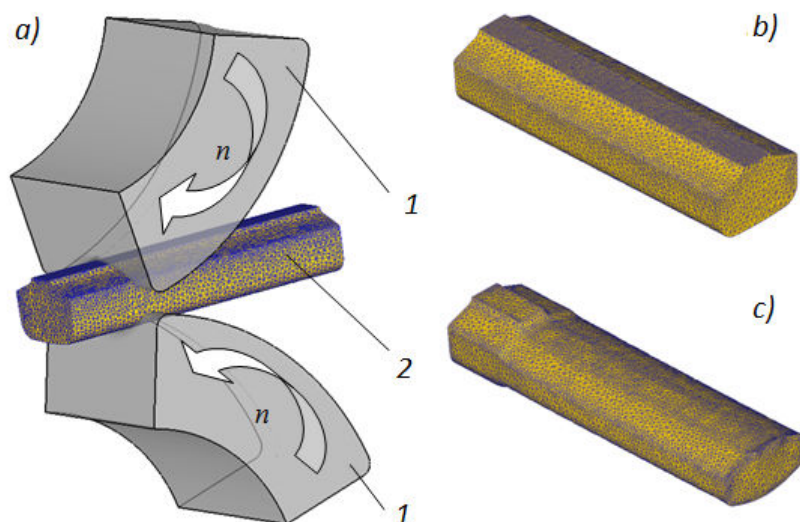
W celu sprawdzenia poprawności przyjętego rozwiązania przeprowadzono analizę numeryczną procesu walcowania prętów o przekroju kołowym z główek złomowych szyn kolejowych S60. Symulacje numeryczne wykonano w oparciu o metodę elementów skończonych (MES) w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia, wykorzystując komercyjny pakiet oprogramowania Deform 3D.

Na potrzeby analizy zbudowano cztery modele geometryczne walcowania, obejmujące wszystkie przepusty. Dla procesu walcowania w pierwszym wykroju - owalnym zastosowano model przedstawiony na rys. 6.15. W skład modelu wchodzi dwa jednakowe segmenty - 1 oraz wsad - 2. Na obwodzie segmentów wykonano owalne wykroje. Na-

tomiast wsad dla pierwszego przepustu stanowiła główka szyny S60 o długości $L = 250$ mm, odcięta na wysokości 50 mm. Segmenty obracają się w przeciwnych kierunkach ze stałą prędkością $n = 65$ obr/min. Wsad modelowano za pomocą czterowęzłowych elementów tetragonalnych. Model materiałowy wsadu – stali R200, z którego wykonane są szyny kolejowe wyznaczono w badaniach plastometrycznych [29]. W symulacjach przyjęto, że wsad nagrany jest do temperatury 1150°C , zaś temperatura narzędzi w trakcie procesu jest stała i wynosi 200°C . Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach to: czynnik tarcia na powierzchni styku metal-narzędzie $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem – $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ oraz między materiałem a otoczeniem – $0,2 \text{ kW/m}^2\text{K}$.

Tab. 6.3. Zestawienie podstawowych parametrów walcarki kuźniczej WK2

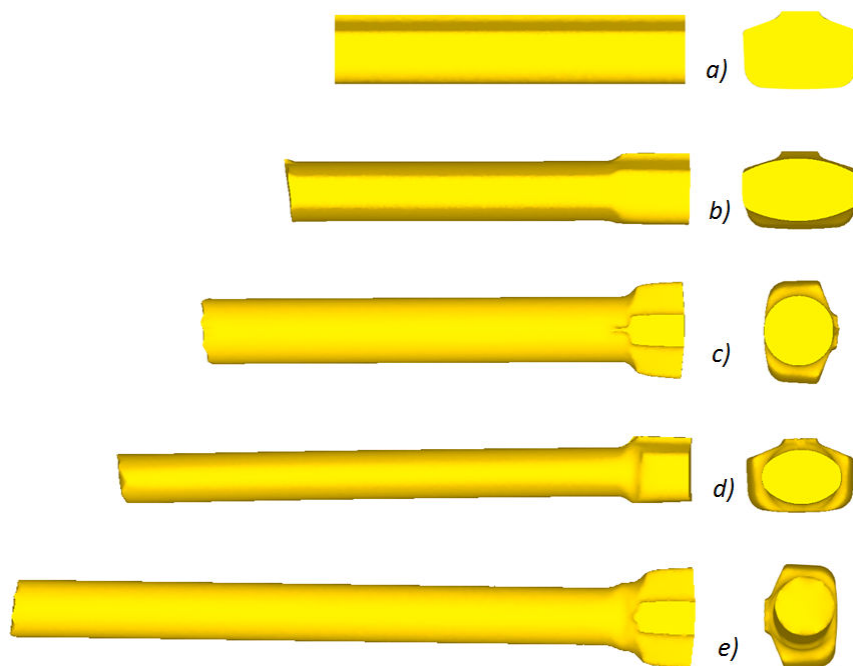
Moc silnika napędowego	N [kW]	22
Prędkość obrotowa silnika napędowego	n_1 [obr/min]	1470
Prędkość obrotowa walców	n_2 [obr/min]	65
Średnica zewnętrzna walców (segmentów)	D [mm]	460
Średnica wałów	d [mm]	280
Długość becзки (sumaryczna szerokość segmentów)	B [mm]	560
Maksymalna długość walcowania	L [mm]	710



Rys. 6.15. Model geometryczny procesu walcowania kuźniczego główki złomowej szyny kolejowej S60 w pierwszym przepuście w wykroju owalnym – a, kształt zastosowanego wsadu – b, odwalcowany w pierwszym przepuście półwyrób o przekroju owalnym – c (opis w tekście)

Zastosowane w kolejnych przepustach modele geometryczne różniły się od przedstawionego na rys. 6.15, kształtem wykroi umieszczonych na segmentach, długością segmentów oraz rodzajem zastosowanego wsadu, który stanowił półwyrób odwalcowany w poprzednim wykroju, importowany wraz z historią temperatury. Umożliwiło to prześledzenie zmian kształtu i temperatury podczas całego procesu walcowania główki zło-

mowej szyny kolejowej na pręty o przekroju kołowym. Wyznaczony numerycznie kształt półfabrykatów uzyskanych w symulacjach walcowania kuźniczego kolejno w każdym z czterech wykroi przedstawiono na rysunku 6.16. Po ukształtowaniu półfabrykatu w danym przepuszczeniu był on przenoszony do następnego z obrotem o kąt 90° . Zasympulowano w ten sposób pełny cykl procesu walcowania prętów w kuźniczej walcarni wzdłużnej.

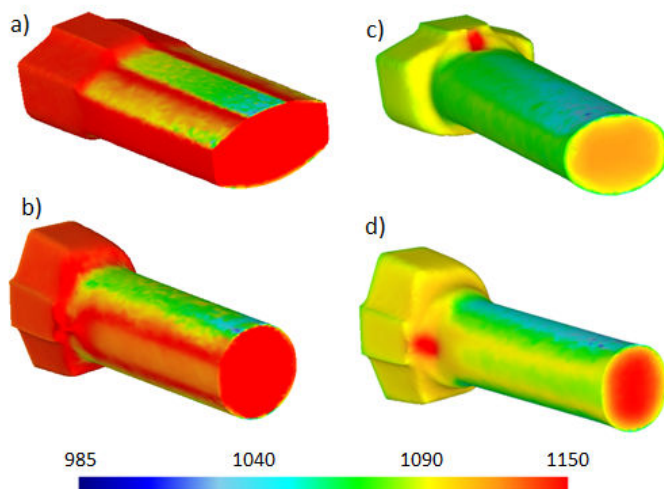


Rys. 6.16. Kształty prętów walcowanych w walcarni kuźniczej w czterech wykrojach wyznaczone w symulacjach MES: a) wsad, b) półfabrykat walcowany w pierwszym wykoju (owalnym), c) półfabrykat walcowany w drugim wykoju (kołowym $\varnothing 50$), d) półfabrykat po trzecim przepuszczeniu (walcowany w wykoju owalnym), e) półfabrykat odwalcowany w czwartym przepuszczeniu (wykroj kołowy $\varnothing 42$)

W trakcie symulacji numerycznych analizowano również przebieg zmian temperatury kształtowanego pasma, które zilustrowano na kolejnym rysunku 6.17. Temperatura jest bardzo istotnym parametrem procesu. Wpływa ona w zasadniczy sposób na wielkość oporów odkształcenia plastycznego, intensywność odkształcenia oraz jakość uzyskanych wyrobów.

Zarejestrowane spadki temperatury są stosunkowo niewielkie i mają raczej charakter powierzchniowy, co należy tłumaczyć kontaktem gorącego wsadu z chłodniejszymi narzędziami. Natomiast w strefach centralnych walcowanych półfabrykatów temperatura utrzymuje się w pobliżu wartości początkowych (1150°C). Jest to efektem generowania ciepła w wyniku odkształcenia plastycznego. Wysoka wartość temperatury pręta odwalcowanego w ostatnim przepuszczeniu (powyżej 1000°C) umożliwia realizację kolejnego etapu przeróbki główek złomowych szyn kolejowych – walcowania kul w walcarni skośnej,

bez konieczności powtórnego nagrzewania wsadu. Taki proces wytwarzania kul pozwala zaoszczędzić znaczne ilości energii oraz ograniczyć ilość powstającej zgorzeliny.



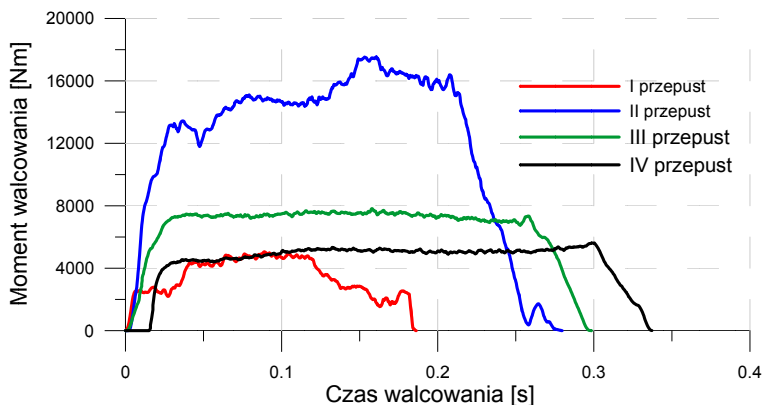
Rys. 6.17. Rozkład temperatury (w °C) na powierzchni i przekroju poprzecznym walcowanych prętów wyznaczony MES po procesie walcowania kuźniczego w: a) pierwszym wykroju, b) drugim wykroju, c) trzecim wykroju, d) czwartym wykroju

Podczas opracowywania technologii ważnym zagadnieniem jest prawidłowe określenie parametrów siłowych procesu. Na ich podstawie możliwy jest trafny dobór agregatu kuźniczego, ułatwione są również prace projektowe nad konstrukcją narzędzi i przyrządów, niezbędnych do realizacji kształtowania.

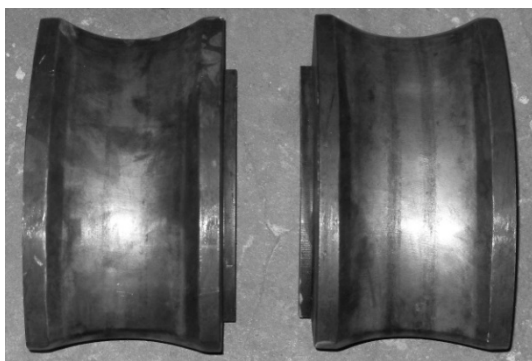
Przebiegi momentów wyznaczone numerycznie w symulacjach procesu walcowania kuźniczego w czterech wykrojach, pokazano na rysunku 6.18. Przedstawione rozkłady mają zbliżony charakter. Po szybkim wzroście momentu w początkowym etapie, który związany jest ze zwiększaniem się powierzchni kotliny walcowniczej, następuje ustabilizowanie jego wartości – faza ustalonego procesu walcowania. Następnie w końcowym etapie momenty dość szybko maleją, co jest efektem zmniejszania się powierzchni nacisku segmentów na kształtowany metal. Zasadnicza różnica między przedstawionymi przebiegami związana jest z wartościami maksymalnymi momentów walcowania w poszczególnych przepustach.

Można zauważyć, że wartości momentów uzależnione są od parametrów geometrycznych procesu (gniot, wydłużenie, ubytek przekroju - tab. 6.2). Największe współczynniki odkształcenia przyjęto dla walcowania w drugim przepuszczeniu. Dlatego też w tym przepuszczeniu odnotowano największy moment.

Pozytywne wyniki analizy numerycznej przyczyniły się do podjęcia decyzji o przeprowadzeniu prób walcowania wzdłużnego prętów okrągłych z główek złomowanych szyn. W pierwszej kolejności wykonano cztery komplety segmentów narzędziowych, z których jeden (do walcowania w pierwszym wykroju owalnym) pokazano na rys. 6.19.



Rys. 6.18. Przebieg momentów walcowania główek złomowych szyn kolejowych w czterech przepustach, obliczony MES



Rys. 6.19. Segmenty narzędziowe z wykojem owalnym, przeznaczone do walcowania główek szyn kolejowych w pierwszym przepuście

Wszystkie narzędzia wykonano ze stali stopowej narzędziowej do pracy na gorąco w gatunku WNL. Zostały one poddane obróbce cieplnej, w efekcie której uzyskano twardość na powierzchni w granicach 45 ± 2 HRC. Niedopuszczalne jest przekroczenie twardości powyżej 55 HRC, gdyż może to prowadzić do powstawania pęknięć i różnego rodzaju rys. Natomiast przy twardości poniżej 42 HRC na powierzchniach roboczych mogą występować wgniecenia. Powoduje to bardzo szybkie zużywanie się narzędzi.

Proces walcowania kuźniczego główek złomowych szyn kolejowych wykonano na walcarki dwustojakowej (ramowej) WK2, znajdującej się na wyposażeniu jednej z kuźni krajowych. Szczegółowe parametry zastosowanej maszyny zestawiono w tabeli 6.3. Natomiast na rysunku 6.20 przedstawiono fotografię walcarki WK2 wraz z zamontowanym oprzyrządowaniem (segmentami) do walcowania prętów z główek złomowych szyn kolejowych.

Walcarka kuźnicza WK 2 ma dwa wały robocze o średnicy $\varnothing 280$ mm, na których mocowane są narzędzia. Wały te łożyskowane są ślizgowo, dwustronnie w korpusie maszyny (w dwóch stojakach). Przy czym wał dolny osadzony jest w obrotowej tulei mimośrodowej, która umożliwia zmianę rozstawu osi w zakresie 560 ± 5 mm. Wały robocze podczas pracy maszyny obracają się w przeciwnych kierunkach tak, że walcowany materiał przemieszcza się w stronę pracownika obsługującego maszynę. Za kłatką roboczą

umieszczone są regulowane zderzaki, do których dosuwany jest wsad podczas procesu walcowania. Napęd wałów roboczych maszyny odbywa się od silnika elektrycznego za pośrednictwem przekładni pasowej i zębatej oraz układu sprzęgło - hamulec. Na wale sprzęgłowym maszyny osadzone jest koło zamachowe, które oddaje swoją energię podczas procesu walcowania. Walcarka wyposażona jest w sprzęgło ciernie wielopłytkowe sterowane pneumatycznie oraz hamulec cierny taśmowy, który powoduje zatrzymanie wałów wraz z zamontowanymi narzędziami po wykonaniu pełnego obrotu lub w momencie wyłączenia sprzęgła (w dowolnym położeniu wałów). Cała maszyna jest ustawiona na czterech regulowanych, antypoślizgowych stopach wibroizolacyjnych. Sterowanie maszyny odbywa się za pomocą pedału. Wsad do przestrzeni roboczej podawany jest ręcznie i przez cały okres kształtowania trzymany w kleszczach przez pracownika obsługującego maszynę.



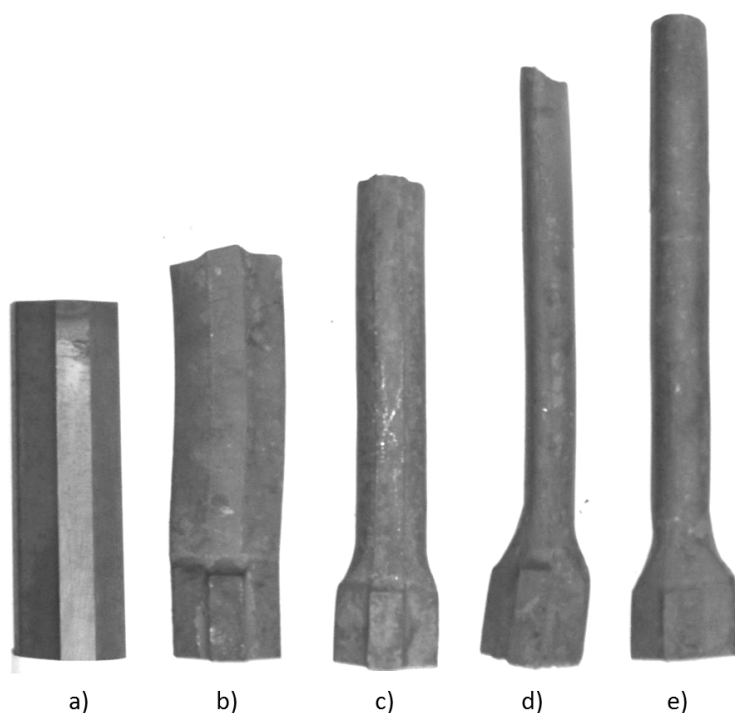
Rys. 6.20. Fotografia walcarki kuźniczej WK 2 znajdującej się w jednym z krajowych zakładów kuźniczych, którą zastosowano do realizacji procesu walcowania prętów z główek złomowanych szyn kolejowych

Wsad (odcinki główek szyn) nagrzewano w piecu komorowym opalanym gazem ziemnym do temperatury wynoszącej około 1200 °C. Temperatura w komorze pieca wynosiła około 1300 °C. Następnie nagrany i wygrzany wsad walcowano w walcarni kuźniczej w kolejnych wykrojach, począwszy od pierwszego owalnego poprzez kołowy, drugi owalny i ostatni kołowy. Taki schemat walcowania umożliwił uzyskanie wyrobów o dwóch różnych wymiarach: prętów o średnicy $\varnothing 50$ oraz o średnicy $\varnothing 42$. Podczas przenoszenia walcowanego półfabrykatu z jednego wykroju do drugiego, obracano go o kąt 90°. Przy czym w pierwszym wykroju wsad był tak zorientowany, że jego dłuższa oś leżała w płaszczyźnie podziału narzędzi (wykroju). Takie ustawienie półfabrykatu wpływało negatywnie na wielkość maksymalnego wydłużenia, które można było uzyskać w pierwszym przepuszczeniu. Zabezpieczało jednak wyrób przed możliwością tworzenia się zawałów w obszarach ostrych krawędzi powstałych po odcięciu środka szyny.

Ukształtowane pręty składowano w stalowych pojemnikach, gdzie były powolnie studzone na powietrzu. W ten sposób wyeliminowano niebezpieczeństwo samoistnego hartowania się wyrobów, które w dalszym procesie będą poddawane obróbce mechanicznej. Na powierzchni odwalcowanych prętów można było zauważyć dość grubą war-

stwę zgorzeliny, która jest efektem intensywnego utleniania się metalu podczas nagrzewania wsadu w piecu komorowym w stosunkowo wysokiej temperaturze.

Kształt wyrobów otrzymanych kolejno w każdym przepuście przedstawiono na rysunku 6.21. Odwalcowane wyroby mają pozostawiony naddatek technologiczny (kleszczowinę), który był niezbędny do uchwycenia materiału podczas realizacji procesu. Długość kleszczowiny waha się w granicach 50 – 60 mm. W dalszym etapie będzie ona podlegała odcięciu od ukształtowanych prętów.



Rys. 6.21. Kształt półwyrobów otrzymanych w czterech przepustach: a) wsad, b) półwyrób walcowany w pierwszym wykroju (owalnym), c) półwyrób walcowany w drugim wykroju (kołowym $\varnothing 50$), d) półwyrób po trzecim przepuście (walcowany w wykroju owalnym), e) półwyrób odwalcowany w czwartym przepuście (wykroju kołowym $\varnothing 42$)

Analizując kształty półwyrobów pokazanych na rys. 6.21, można zauważyć wygięcie odwalcowanego pręta w płaszczyźnie podziału narzędzi (w płaszczyźnie poziomej). Przypuszczalnie przyczyną powstania tego typu deformacji było nieosiowe wprowadzenie wsadu do pierwszego wykroju oraz niezachowana symetria walcowanego półfabrykatu, spowodowana nierównomiernym zużyciem powierzchni bocznej główki szyny. Zaobserwowane zniekształcenie zostaje jednak usunięte w kolejnych przepustach i nie ma znaczącego wpływu na jakość półwyrobów. W obszarach ostrych krawędzi powstałych po odcięciu średnika nie zaobserwowano zawalcowień czy zawinięcia metalu, potwierdza to prawidłowość przyjętego sposobu kalibrowania wykroi w narzędziach.

Znacznie większy wpływ na kształt i jakość finalnego produktu ma stopień oraz sposób wypełnienia wykroju przez metal w pierwszym przepuście. Na ogół przekrój po-

przecznym kształtowanego pręta nie jest symetryczny. Jedna strona odwalcowanego owalu jest znacznie dłuższa i bardziej ostra od drugiej, prawidłowo ukształtowanej. W dalszym etapie walcowania może prowadzić to do niewypełnienia kolejnych wykroi oraz powstawania zawalcowań. Niesymetryczne wypełnienie wykroju w pierwszym przepuście (w wykroju owalnym) jest bezpośrednio związane z jakością zastosowanego wsadu. Największe znaczenie ma tutaj niesymetryczne i nadmierne zużycie główki szyny kolejowej, w której często obserwuje się jednostronny ubytek materiału rzędu $7 \div 10$ mm (rys. 6.22). Dlatego też, aby zapobiegać powstawaniu tego typu wad należy prowadzić selekcję stosowanego wsadu, a następnie dla bardziej zużytych główek szyn kolejowych stosować inne narzędzia, w których wykroje będą tak skalibrowane, by umożliwić równomierne płynięcie metalu.

Rys. 6.22. Nierównomierne zużycie główki szyny kolejowej S60 (zaznaczone strzałką), będące przyczyną nieprawidłowego wypełnienia wykroju owalnego w pierwszym przepuście

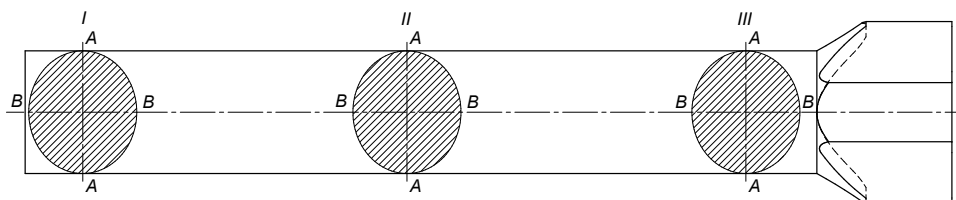


Powierzchnia odwalcowanych półwyrobów - prętów $\varnothing 42$ mm (rys. 6.23) jest stosunkowo gładka i wolna od wad (nie zauważono zawalcowań, pęknięć czy głębszych wgnieceń). Nie zaobserwowano również wygięcia osi ukształtowanych półwyrobów. Natomiast w płaszczyźnie podziału narzędzi można zaobserwować niewielką wypływkę po obu stronach ukształtowanych prętów, której wysokość nie przekracza 0,5 mm. Przyczyną tworzenia się wypłytki może być nadmierne zsuniecie wałów, co prowadzi do przepelnienia wykroju i powstawania wybrzuszenia w płaszczyźnie podziału segmentów. Również przyjęcie zbyt dużego luzu między narzędziami sprzyja formowaniu się wypłytki. Powstała wypływka jest bardzo mała i nie wpływa w istotny sposób na jakość uzyskanego półwyrobu, który w dalszym etapie przeróbki stosowany jest jako wsad do walcowania kul.



Rys. 6.23. Pręty o średnicy $\varnothing 42$ odwalcowane w czterech przepustach w walcierce kuźniczej z główek złomowanych szyn kolejowych

Celem określenia dokładności wykonania, metodą walcowania kuźniczego, prętów o średnicach nominalnych $\varnothing 42$ i $\varnothing 50$ mm dokonano pomiarów średnic dla serii półwyrobów wynoszących po 100 szt. W każdym przypadku pomiar wykonywano w trzech płaszczyznach: przy końcu pręta, w jego części środkowej oraz bezpośrednio przy kleszczowinie. Miejsca pomiaru zaznaczone zostały schematycznie na rys. 6.24. Przy tym w wytypowanych przekrojach pomiaru dokonywano dwukrotnie, tj. w płaszczyźnie wyplwki oraz w płaszczyźnie prostopadłej do niej.



Rys. 6.24. Widok półwyrobu pręta po walcowaniu kuźniczym wzdłużnym, z zaznaczonymi miejscami pomiaru średnic

Wyniki otrzymane z pomiarów poddano obróbce statystycznej, w której określono wymiar średni oraz odchylenie standardowe. Otrzymane rezultaty zestawiono w tab. 6.4. Analiza danych zamieszczonych w tej tabeli wykazuje, że dokładność wytworzenia prętów z główek złomowanych szyn kolejowych nie jest wysoka. Otrzymane pręty miały w przekroju poprzecznym kształt eliptyczny i przyjmowały większy wymiar w płaszczyźnie podziału (w kilku przypadkach doszło wręcz do utworzenia wyplwki). Ponadto odchyłki wykonania prętów są dość znaczne i wahają się na ogół w przedziale $\pm 1,5$ mm. Przyczyny takiego faktu należy upatrywać w bardzo różnym zużyciu poszczególnych główek szyn, prowadzącym do zmian objętości materiału podlegającego walcowaniu.

Niemniej jednak dokładność wykonania prętów, rozpatrywaną pod kątem uruchomienia procesu walcowania kul, należy uznać za zadowalającą. Przy czym należy pamiętać o tym, że takie wykonanie prętów eliminuje z potencjalnego zastosowania te metody walcowania śrubowego, w których wymagane jest stosowanie wsadu o znanej (dokładnie określonej) wartości przekroju poprzecznego.

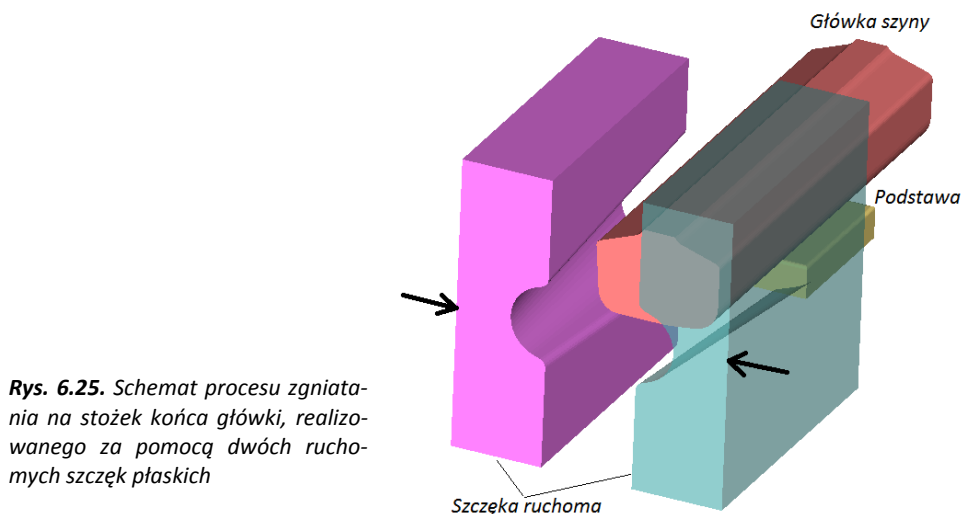
Tab. 6.4. Wyniki pomiarów średnic półwyrobów prętów otrzymanych metodą walcowania wzdłużnego po obróbce statystycznej

Pręt o średnicy nominalnej $\varnothing 50$ mm			
Przekrój	I - I	II - II	III - III
A - A	$52,16 \pm 1,46$	$51,39 \pm 1,26$	$51,03 \pm 1,66$
B - B	$50,44 \pm 1,04$	$50,48 \pm 1,52$	$50,61 \pm 1,40$
Pręt o średnicy nominalnej $\varnothing 42$ mm			
Przekrój	I - I	II - II	III - III
A - A	$41,95 \pm 1,85$	$41,68 \pm 1,24$	$41,47 \pm 1,03$
B - B	$41,44 \pm 1,93$	$41,37 \pm 1,16$	$41,14 \pm 0,89$

6.1.3. Walcowanie skośne

W procesie walcowania skośnego materiał zginiatany jest między walcami (rolkami) obracającymi się w tym samym kierunku, które są nachylone pod kątem do osi kształtowanego półwyrobu (pręta). Wskutek takiego ustawienia walców powstają osiowe składowe siły tarcia, wciągające materiał w strefę odkształcenia w sposób ciągły. Metodę walcowania skośnego wykorzystuje się w produkcji rur bez szwu [13], ale także do przeróbki plastycznej wlewków okrągłych [58], czy prętów bimetalowych [60, 50]. Zwykle stosuje się od dwóch do czterech narzędzi (walców) [18, 22, 58].

Zastosowanie procesu walcowania skośnego do wytwarzania pręta okrągłego z główki szyny wymaga ukształtowania jej końca na stożek, co jest niezbędne ze względu na płynne wprowadzenie materiału między walce. Do tego celu można zastosować zginiatanie główki między dwoma szczękami mającymi wybrania stożkowe. Schemat takiego procesu kształtowania pokazano na rys. 6.25. Założono, że oba narzędzia poruszają się przeciwnie z prędkością 25 mm/s, a proces realizowany jest bezpośrednio po nagraniu główki szyny i poprzedza proces walcowania skośnego.

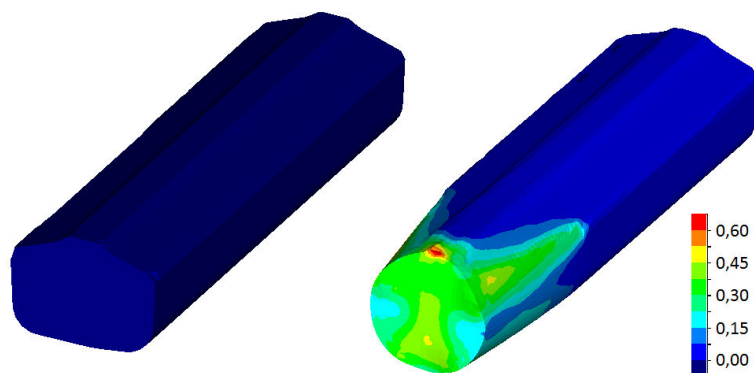


Rys. 6.25. Schemat procesu zginiatania na stożek końca główki, realizowanego za pomocą dwóch ruchomych szczęk płaskich

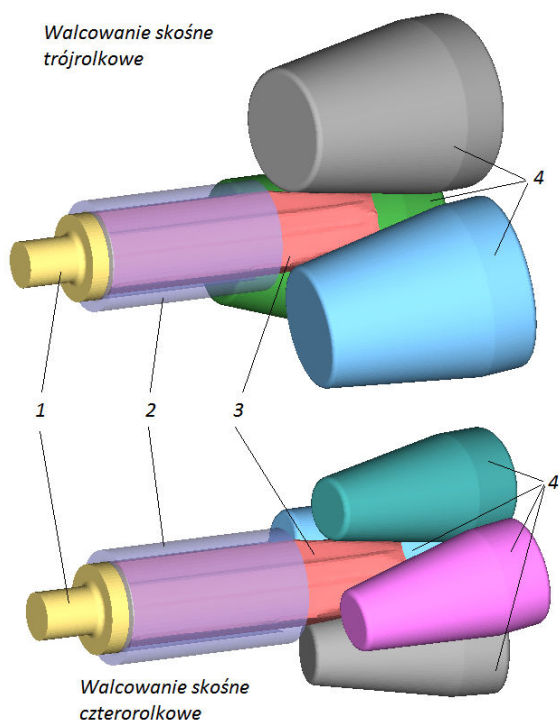
W efekcie wykonanej symulacji numerycznej stwierdzono, że zastosowany schemat zginiatania końca główki szyny jest wystarczający do uzyskania zakończenia stożkowego o pożądanym kształcie, pokazanym na rys. 6.26. Ważne jest by materiał nie został wsunięty zbyt daleko między szczęki, gdyż wtedy jego nadmiar wpłynie między narzędzia i zostanie utworzona niepożądana wypływka. Z tego też względu należy preferować stopniowe wsuwanie główki szyny między szczęki, w czasie którego zakończenie stożkowe uzyskane będzie w kilku cyklach zginiatania.

Realizacja procesu walcowania skośnego wymaga specjalnego prowadzenia (centrowania) główki szyny. W tym celu można wykorzystać prowadnicę rurową, której średnica wewnętrzna jest większa od największego wymiaru główki w jej przekroju poprzecznym, umieszczonej w osi obrotu kształtowanego pręta cylindrycznego. Do zainicjowania procesu walcowania niezbędne jest także zastosowanie popychacza, mającego za zadanie

wprowadzenie wsadu między walce, które kształtując pręt będą go wciągać samoistnie w przestrzeń międzywalcową. Schemat tak realizowanego procesu walcowania skośnego, wykorzystującego trzy oraz cztery rolki kształtujące, pokazano na rys. 6.27.



Rys. 6.26. Widok główki szyny S60 o początkowej wysokości $H_g=46,5$ mm przed (po lewej) i po procesie zgniatania na stożek (po prawej) z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

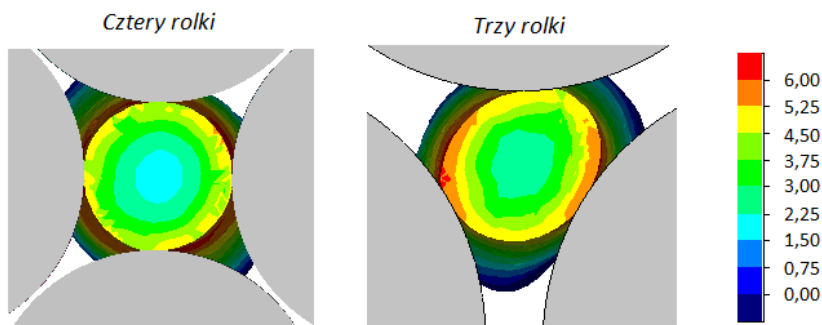


Rys. 6.27. Schematy procesu walcowania skośnego pręta okrągłego z główki szyny, gdzie: 1 - popychacz, 2 - prowadnica rurowa, 3 - główka szyny z zakończeniem stożkowym, 4 - rolka kształtująca

Ważne dla przebiegu walcowania są wymiary rolki, która zbudowana jest z dwóch części: stożkowej (kształtującej) i cylindrycznej (kalibrującej). W wykonanej analizie założono, że kąt pochylenia tworzącej stożka wynosi 9° , podczas gdy średnica części cylin-

drycznej rolki równa się 90 i 150 mm - odpowiednio dla schematu walcowania trój- i cztero-rolkowego. Kąt skoszenia rolek względem osi półwyrobu walcowanego jest w obu przypadkach jednakowy i wynosi 9° .

Dla sprawdzenia możliwości wykonania pręta o średnicy $\varnothing 40$ mm z główki szyny S60, o wysokości początkowej $H_g=46,5$ mm, wykorzystano modelowanie numeryczne. W obliczeniach przyjęto identyczny model materiału oraz warunki brzegowe, jak w przypadku rozważanego w rozdziale 6.1.1 procesu prasowania pręta. Różnice dotyczyły jedynie kinematyki narzędzi. Przyjęto, że: rolki obracają się w tę samą stronę z prędkością 60 obr./min, zaś popychacz przesuwają się z prędkością 10 mm/s. Zamodelowano kształtowanie w czasie 5 sekund, co odpowiadało wykonaniu przez rolki pięciu pełnych obrotów.

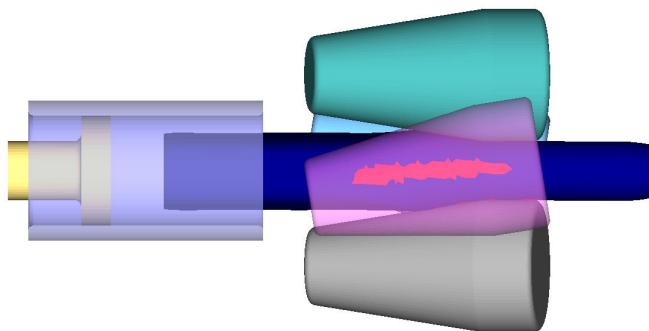


Rys. 6.28. Widok przekroju poprzecznego (z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia) półwyrobu pręta kształtowanego metodą walcowania skośnego

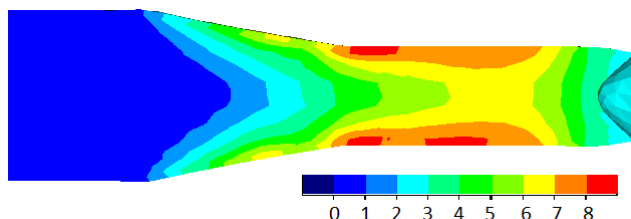
W efekcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że stosowanie w procesie walcowania skośnego trzech rolek jest niewystarczające do uzyskania przez walcowany pręt pożądanego kształtu kołowego. W tym przypadku półwyrób (rys. 6.28) jest silnie zowalizowany, co dyskwalifikuje go jako wsad do walcowania śrubowego kul. Natomiast użycie podczas walcowania czterech (rozmieszczonych co 90°) rolek pozwala na uzyskanie pręta o pożądanym kształcie.

Po uchwyceniu materiału przez rolki jest on wprowadzany samoistnie w przestrzeń kształtowania. Wsad odrywa się od popychacza (rys. 6.29), który można wycofać celem umożliwienia wprowadzenia do prowadnicy rurowej kolejnego wsadu.

Rys. 6.29. Proces walcowania skośnego czterema rolkami w stadium zaawansowanym, z zaznaczoną powierzchnią kontaktu materiał-narzędzie (walec)



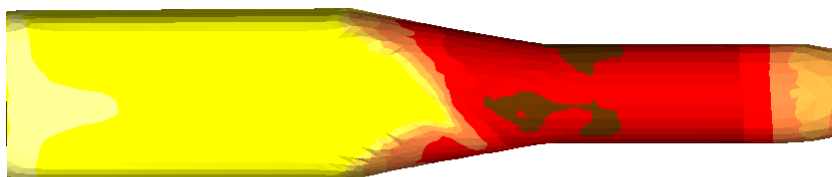
W efekcie walcowania pręt jest intensywnie przerabiany plastycznie na wskroś, o czym świadczy rozkład intensywności odkształcenia w przekroju osiowym (wzdłużnym), przedstawiony na rys. 6.30. Jednakże odkształcenia nie są jednakowe i przyjmują wartości największe w strefie przypowierzchniowej, co jest niewątpliwie efektem oddziaływania narzędzi (przez tarcie i zgniot).



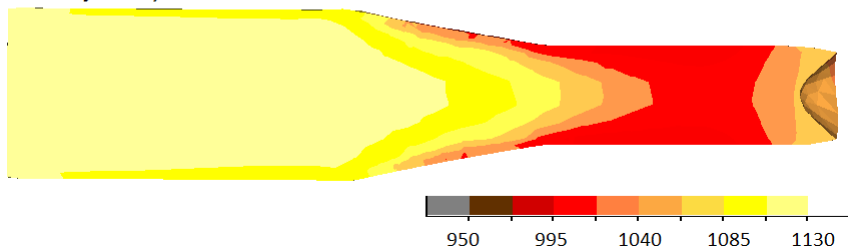
Rys. 6.30. Rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobie otrzymanym w procesie walcowania skośnego czterema rolkami

Zastosowanie procesu walcowania skośnego pręta z główki szyny bezpośrednio przed procesem walcowania śrubowego nie powoduje konieczności wprowadzenia międzyoperacyjnego dogrzewania materiału. Jak wynika z rys. 6.31 otrzymany w wyniku walcowania pręt ma temperaturę dość równomierną w całej swej objętości, która oscyluje wokół wartości 1000 °C i jest wystarczająca do przeprowadzenia operacji kształtowania kul wraz z ich późniejszą obróbką cieplną (hartowaniem).

Widok z góry



Przekrój osiowy

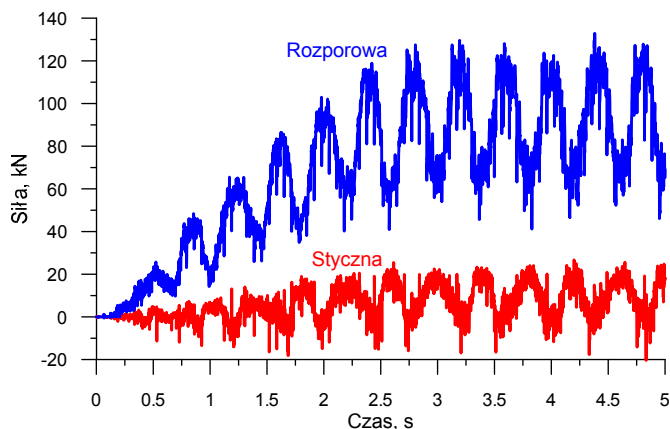


Rys. 6.31. Rozkład temperatury (w °C) w półwyrobie otrzymanym w procesie walcowania skośnego czterema rolkami, po wykonaniu przez nie pięciu obrotów

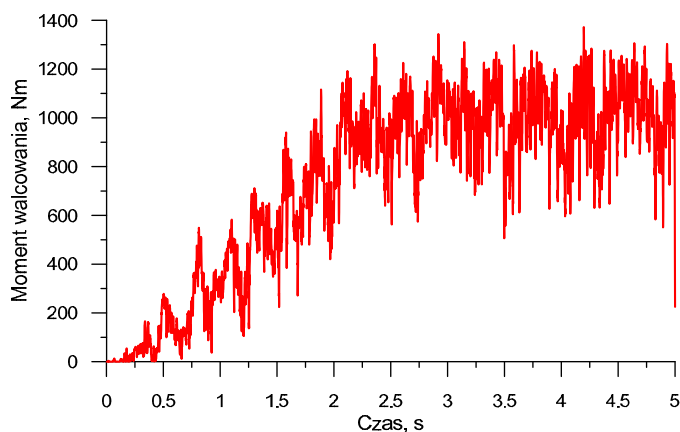
Na rys. 6.32 przedstawiono rozkłady sił rozporowej i stycznej działających na jeden z walców w procesie walcowania czterema rolkami. Cechą charakterystyczną analizowanego przypadku kształtowania jest oscylacyjny charakter przebiegu sił będący następstwem zmiany gniotu w trakcie obracania się wsadu. Jako ciekawostkę należy potraktować fakt przyjmowania przez siłę styczną wartości zarówno dodatnich jak i ujemnych (wówczas walec hamuje obrót wsadu), co także należy przypisać zmieniającemu się

gniotowi, przekładającemu się na różne prędkości poślizgu między poszczególnymi rolkami a materiałem kształtowanym. Należy przy tym podać, że siła rozporowa jest około sześć razy większa od siły stycznej.

Rys. 6.32. Rozkłady sił działających na rolkę w procesie walcowania skośnego 4 rolkami, pręta $\varnothing 40$ mm z główki szyny S60



Rys. 6.33. Rozkład momentu obrotowego na rolce w procesie walcowania skośnego 4 rolkami, pręta $\varnothing 40$ mm z główki szyny S60



6.2. Walcowanie śrubowe kul $S\varnothing 40$ mm i $S\varnothing 50$ mm

Na podstawie wykonanych prac badawczych można stwierdzić, że stosując metody obróbki plastycznej można skutecznie wykonać z główki szyny pręty okrągłe o średnicy 40 i 50 mm. Najlepsze rezultaty daje w tym zakresie zastosowanie walcowania wzdłużnego. Przy tym należy pamiętać o tym, że wymiary przekroju poprzecznego tak wytworzonego pręta mogą odbiegać od założonych do uzyskania nawet o $\pm 1,5$ mm. Z tego powodu do walcowania kul z tak przygotowanych wsadów należy stosować metody, w których w pierwszej kolejności wykonywana jest kalibracja wymiaru średnicowego pręta. Taką metodą jest niewątpliwie opracowane przez autorów walcowanie w wykroju spiralno-śrubowym, przybliżone w rozdziale piątym.

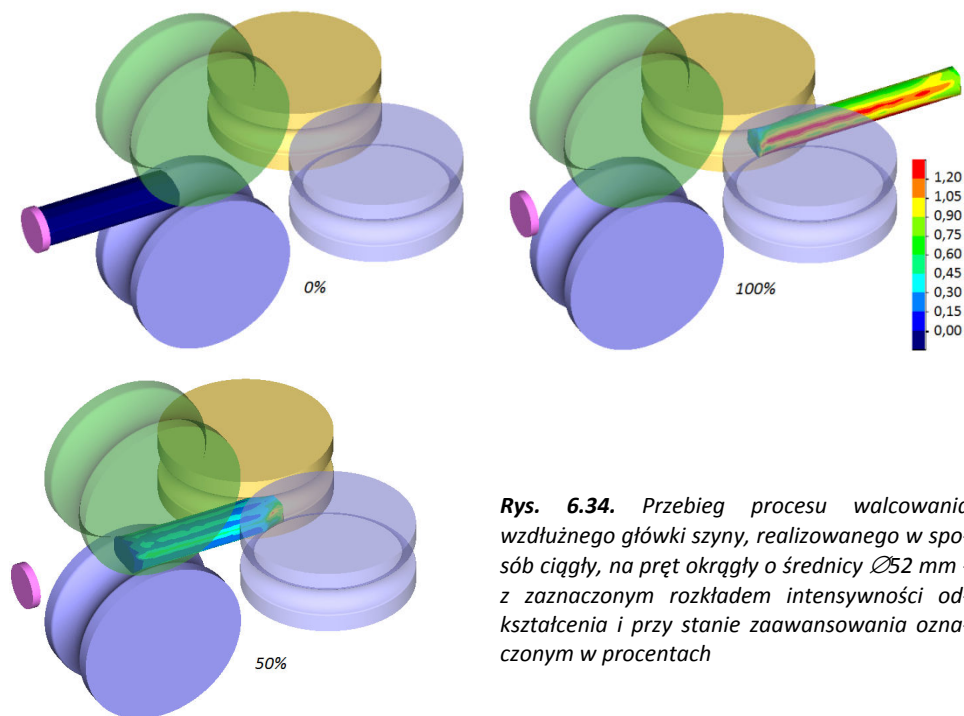
Dla wykazania możliwości kształtowania kul o średnicach 40 i 50 mm, walcowanych z główki szyny S60 o wysokości $H_g=46,5$ mm, zastosowano modelowanie numeryczne.

W pierwszej kolejności zasymulowano proces walcowania wzdłużnego (w systemie koło - owal - koło) główki na pręt o średnicy nominalnej $\varnothing 52$ mm. Zastosowano przy tym schemat walcowania hutniczego realizowanego w dwóch kłatkach w sposób ciągły, co pozwala na ukształtowanie półwyrobu wolnego od nadmiaru na kleszczowinę.

Przebieg procesu walcowania pręta przedstawiony na rys. 6.34 uzyskano w symulacji numerycznej, w której przyjęto identyczne dane (odnośnie tarcia, materiału, parametrów termicznych) jak w przypadkach walcowania analizowanych w rozdziale 6.1.2. Widoczne jest, że walce pierwszej klatki pewnie wciągają główkę, zgniatają ją doprowadzając uzyskania przekroju owalnego i odrywają od popychacza. Następnie półwyrób podawany jest między walce drugiej klatki, gdzie uzyskuje pożądany kształt pręta okrągłego.

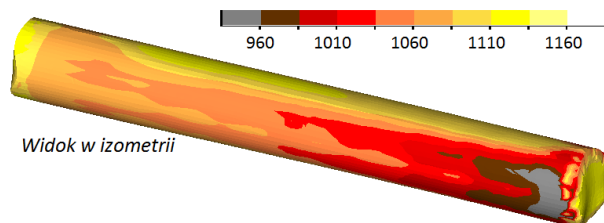
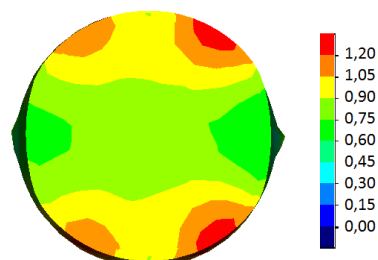
Podobnie jak w procesie walcowania kuźniczego przekrój poprzeczny uzyskanego w ten sposób pręta odbiega od pożądanego kształtu kołowego (rys. 6.35). W jednych miejscach jest on silnie zowalizowany, w innych zaś występuje nadmiar materiału w postaci szczątkowej wypłytki. Taki zarys przekroju poprzecznego powinien być skorygowany w następnej operacji, poprzedzającej kształtowanie kul.

Zastosowana metoda walcowania pręta z główki szyny prowadzi do nieznacznego, sięgającego 100°C , ochłodzenia materiału - rys. 6.36. Jednakże wychłodzenie to ograniczone jest do warstw powierzchniowych, stykających się z narzędziami. Ponadto, zakłada się, że odnotowane różnice temperatury ulegną zmniejszeniu w efekcie przepływu ciepła od warstw cieplejszych do zimniejszych materiału, w trakcie przerwy związanej z podaniem pręta do walcarki skośnej.



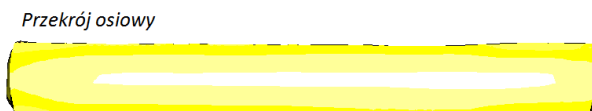
Rys. 6.34. Przebieg procesu walcowania wzdłużnego główki szyny, realizowanego w sposób ciągły, na pręt okrągły o średnicy $\varnothing 52$ mm - z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia i przy stanie zaawansowania oznaczonym w procentach

Rys. 6.35. Kształt przekroju poprzecznego pręta otrzymanego w procesie walcowania wzdłużnego, realizowanego zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 6.34, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia



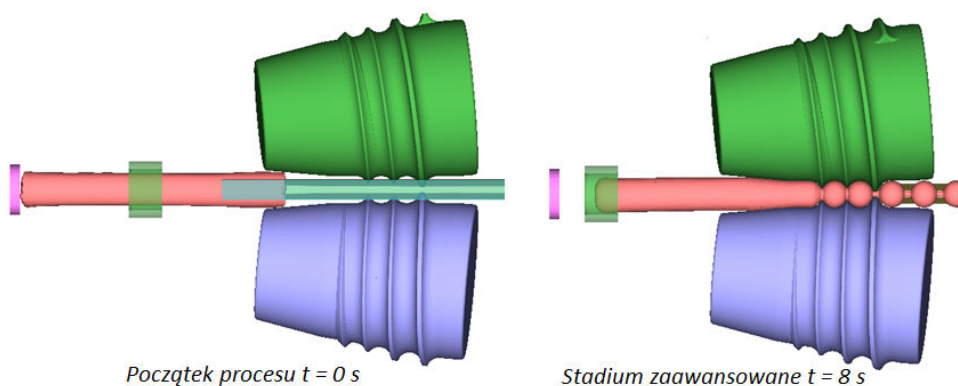
Widok w izometrii

Rys. 6.36. Prognozowany numerycznie rozkład temperatury (w °C) w odwalcowanym pręcie, w momencie wyjścia półwyrobu z drugiej pary walców



Przekrój osiowy

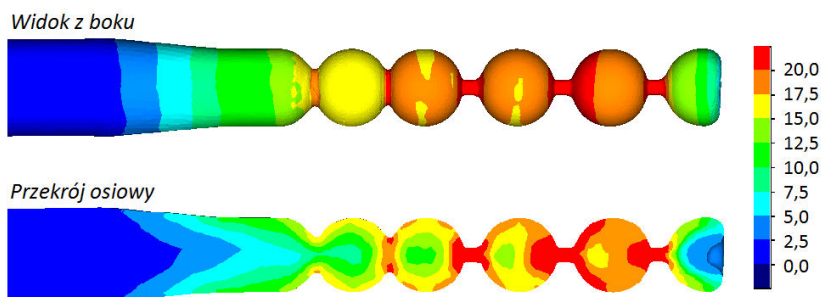
Jak już wspomniano, najlepiej jest proces kształtowania kul zrealizować wykorzystując walce o wykroju spiralno - śrubowym. W tym bowiem przypadku istnieje możliwość znaczącego zredukowania przekroju poprzecznego wsadu (przez oddziaływanie części stożkowych walców) i uzyskania pręta okrągłego o pożądanej średnicy. Możliwe będzie zatem ukształtowanie z pręta $\varnothing 52$ mm kul o wymiarze $S\varnothing 40$ mm. Schemat takiego procesu walcowania pokazano na kolejnym rys. 6.37, na którym zilustrowano m.in. sposób podania wsadu, z wykorzystaniem popychacza i prowadnicy pierścieniowej.



Początek procesu $t = 0$ s

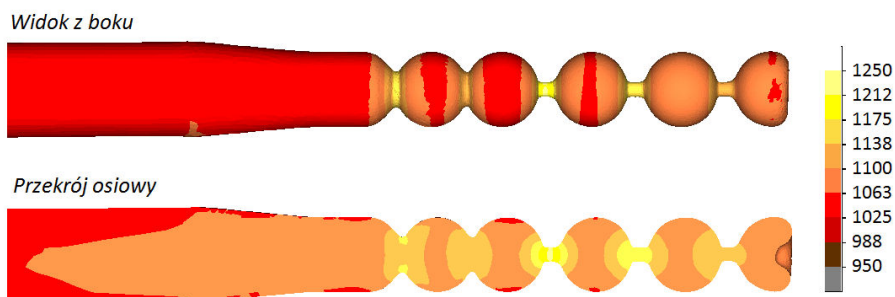
Stadium zaawansowane $t = 8$ s

Rys. 6.37. Walcowanie spiralno - śrubowe kul $S\varnothing 40$ mm z wsadu o średnicy $\varnothing 52$ mm (na rysunku po prawej ukryto jedną z prowadnic celem pokazania ukształtowanego półwyrobu)



Rys. 6.38. Rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobie otrzymanym w procesie walcowania spiralno - śrubowego kul $S\varnothing 40$ mm, po wykonaniu przez walce ośmiu obrotów

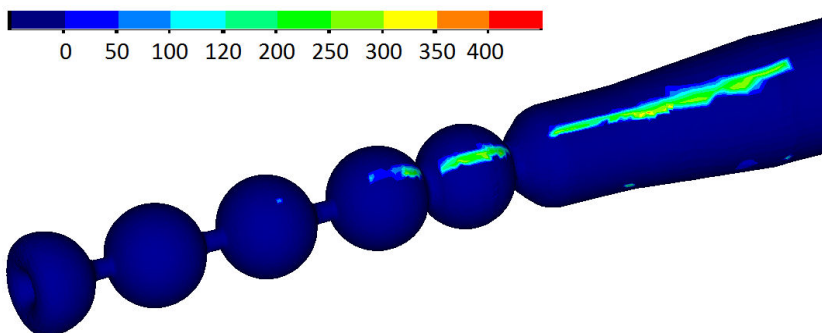
Na rys. 6.38 pokazano półwyrob otrzymany po ośmiu obrotach walców, na którym zaznaczono rozkład intensywności odkształcenia. Cechą charakterystyczną jest uzyskiwanie przez odkształcenia wartości większych niż w typowych procesach walcowania śrubowego, co ma związek z bardziej intensywnym przerobem plastycznym materiału w kulach.



Rys. 6.39. Rozkład temperatury (w °C) w półwyrobie otrzymanym w procesie walcowania spiralno - śrubowego kul $S\varnothing 40$ mm, po wykonaniu przez walce ośmiu obrotów

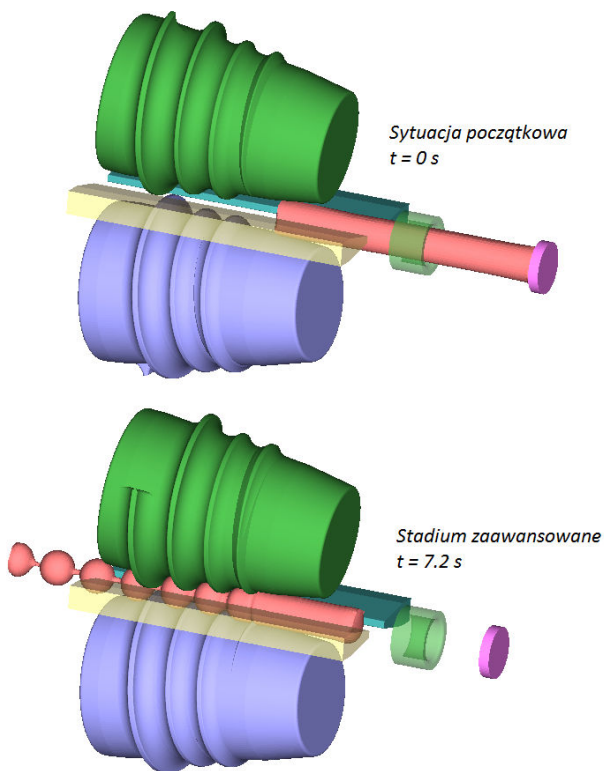
Z przedstawionego na rys. 6.39 rozkładu temperatury wynika, że pomimo zastosowania dwóch operacji kształtowania (walcowania wzdłużnego pręta i walcowania skośnego kul) temperatura materiału w ukształtowanych półwyrobach jest nadal wysoka. W objętości kuli osiąga ona wartości zbliżone do 1100 °C, co wymaga schłodzenia półwyrobów w powietrzu przed operacją hartowania. Alternatywą jest zmniejszenie temperatury nagrzewania wsadu z główki szyny).

Na rys. 6.40 pokazano rozkład nacisku na powierzchni kontaktu materiał - narzędzie w zaawansowanym stadium procesu walcowania. Z danych przedstawionych na tym rysunku wynika, że powierzchnia kontaktu składa się z kilku części. Największa z nich występuje w strefie redukcji średnicy pręta, a mniejsze związane są poszczególnymi kulami, przy czym wraz z wykalibrowaniem półwyrobów kul ich kontakt z narzędziami zanika. Odnosnie nacisków powierzchniowych zauważa się, że osiągają one stosunkowo niskie wartości, rzędu 300 MPa, co niewątpliwie znajdzie przełożenie na długi okres wykorzystania narzędzi kształtujących.



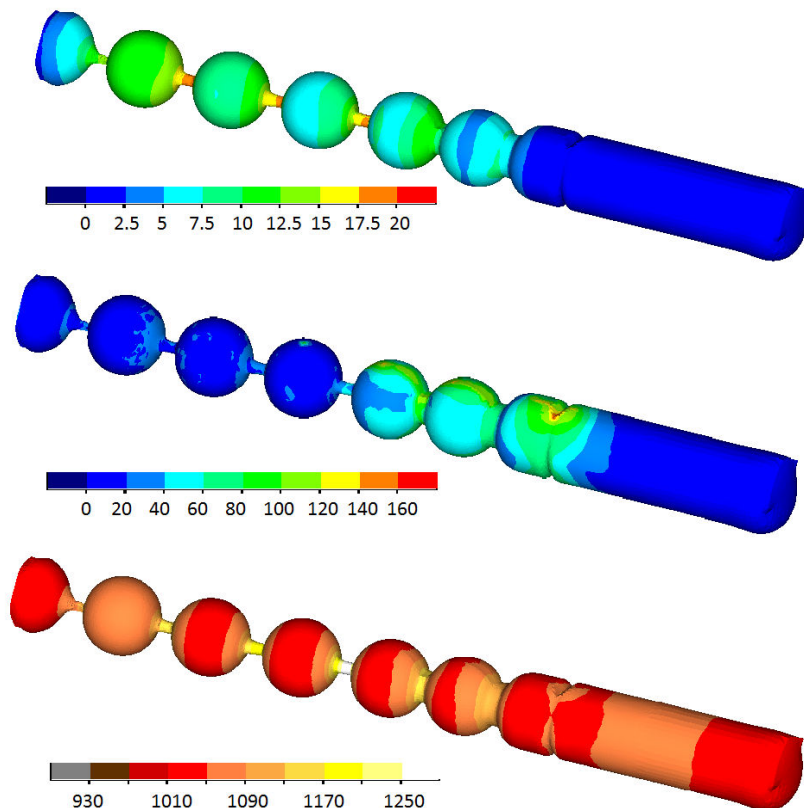
Rys. 6.40. Rozkład nacisku (w MPa) na powierzchni kontaktu materiał - narzędzie w zaawansowanym stadium procesu walcowania śrubowego kuli $S\varnothing 40$ mm

Z wsadu (pręta $\varnothing 52$ mm) otrzymanego w procesie walcowania wzdłużnego można także przeprowadzić proces walcowania kul $S\varnothing 50$ mm. Na rys. 6.41 przedstawiono taki przypadek walcowania, w którym przyjęto parametry identyczne (gabaryty walców, prędkość obrotowa narzędzi, kąty skrócenia walców) jak przy kształtowaniu kul $S\varnothing 40$ mm. Oznacza to, że oba procesy walcowania zrealizować będzie można w tej samej walcarni.



Rys. 6.41. Proces walcowania spiralno - śrubowego kul $S\varnothing 50$ mm z wsadu o średnicy $\varnothing 52$ mm

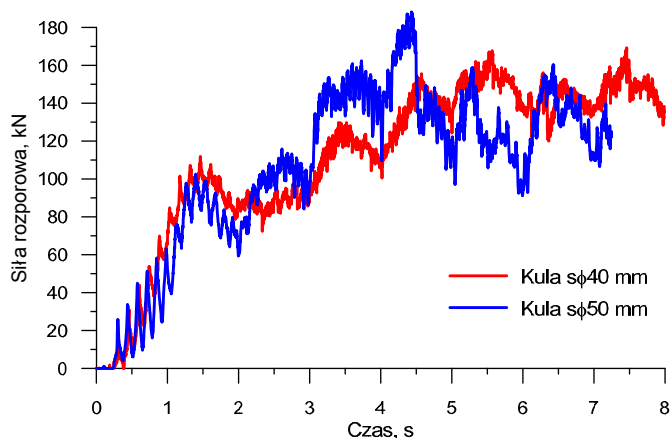
Wykonana analiza numeryczna w pełni potwierdziła możliwość walcowania kul $S\varnothing 50$ mm z pręta $\varnothing 52$ mm otrzymanego z główki szyny. Szereg wyników otrzymanych z obliczeń w postaci rozkładów intensywności odkształcenia, intensywności naprężenia i temperatury w półwyrobie kul przedstawiono na rys. 6.42.



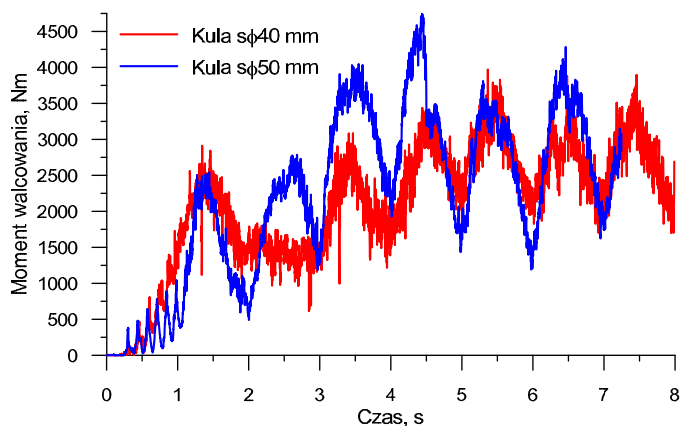
Rys. 6.42. Przykładowe wyniki otrzymane w symulacji procesu walcowania spiralno - śrubowego kuli $S\varnothing 50$ mm, kolejno od góry: intensywność odkształcenia, intensywność naprężenia (w MPa), temperatura (w $^{\circ}\text{C}$)

Na kolejnych rysunkach 6.43 i 6.44 przedstawiono odpowiednio rozkłady siły rozporowej i momentu walcowania, obliczone dla analizowanych przypadków kształtowania półwyrobów kul $S\varnothing 40$ i $S\varnothing 50$ mm. Rozkłady te mają charakterystyczny dla procesów walcowania śrubowego przebieg wahadłowy. Co ciekawe rozkłady uzyskane w obu przypadkach walcowania są zbliżone do siebie, zarówno jakościowo jak i ilościowo, co może oznaczać, iż decydującą rolę w procesie wytwarzania kul odgrywa wielkość (średnica) zastosowanego materiału wsadowego (pręta). Należy przy tym podkreślić, że obliczone maksymalne wartości sił i momentów mieszczą się w zakresie obciążeń dopuszczalnych laboratoryjnej walcarki skośnej, wykorzystanej w badaniach doświadczalnych. Zatem proces walcowania kul $S\varnothing 40$ i $S\varnothing 50$ mm ze złomowanej główki szyny S60 jest możliwy do zrealizowania w warunkach AGH w Krakowie.

Rys. 6.43. Rozkłady siły rozporowej w procesach walcowania spiralno - śrubowego kul, realizowanych z wsadu o średnicy $\varnothing 52$ mm



Rys. 6.44. Rozkłady momentu walcowania w procesach walcowania spiralno - śrubowego kul, realizowanych z wsadu o średnicy $\varnothing 52$ mm

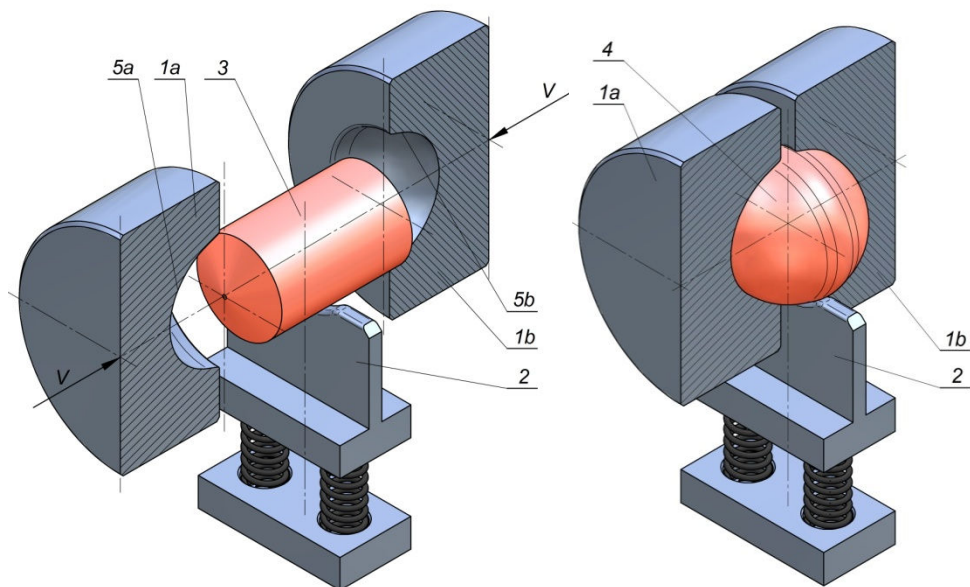


6.3. Kucie kul SØ60 mm, SØ70 mm i SØ80 mm

Kule o większych rozmiarach można kształtować z główki szyny metodą kucia. Należy wówczas stosować jako wsady dobrze skalibrowane odcinki prętów okrągłych, np. otrzymane w procesie walcowania skośnego.

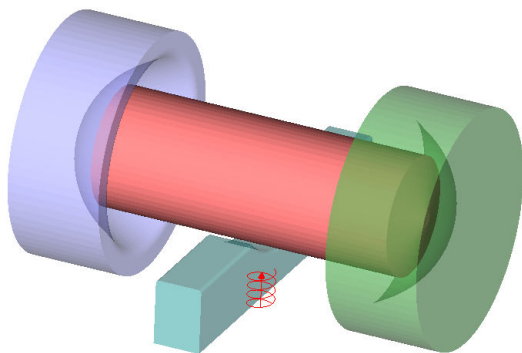
W bieżącym rozdziale omówiono zagadnienie kształtowania kul SØ60, SØ70 i SØ80 mm, z wsadu o średnicy $\varnothing 50$ mm, z wykorzystaniem innowacyjnej metody kucia półswobodnego [38, 48, 49]. Sposób ten (rys. 6.45) charakteryzuje się tym, że półfabrykat 3 w kształcie odcinka pręta o średnicy mniejszej od średnicy kształtowanej kuli 4 i długości większej od średnicy kształtowanej kuli 4, umieszcza się na podtrzymańcu 2 sprężystej pomiędzy dwoma matrycami 1a i 1b, które na powierzchniach czołowych, położonych naprzeciwko siebie mają wykonane kształtowe wykroje 5a i 5b sferyczno – stożkowe, przy czym końce półfabrykatu 3 mają kształt stożkowy o jednakowych kątach rozwarcia stożków. Następnie uruchamia się ruch postępowy dwóch matryc 1a i 1b, które przemieszcza się w kierunku półfabrykatu 3 ze stałą prędkością v , w wyniku czego spęcza się półfabrykat 3 w kształtowych wykrojach 5a i 5b sferyczno - stożkowych i kształtuje się kulę 4. Przy czym powierzchnie stożkowe półfabrykatu 3 i jego powierzchnie walcowe bezpo-

średnio przylegające do powierzchni stożkowych kształtuje się w wykrojach 5a i 5b sferyczno – stożkowych, zaś środkową część półfabrykatu 3 kształtuje się swobodnie.



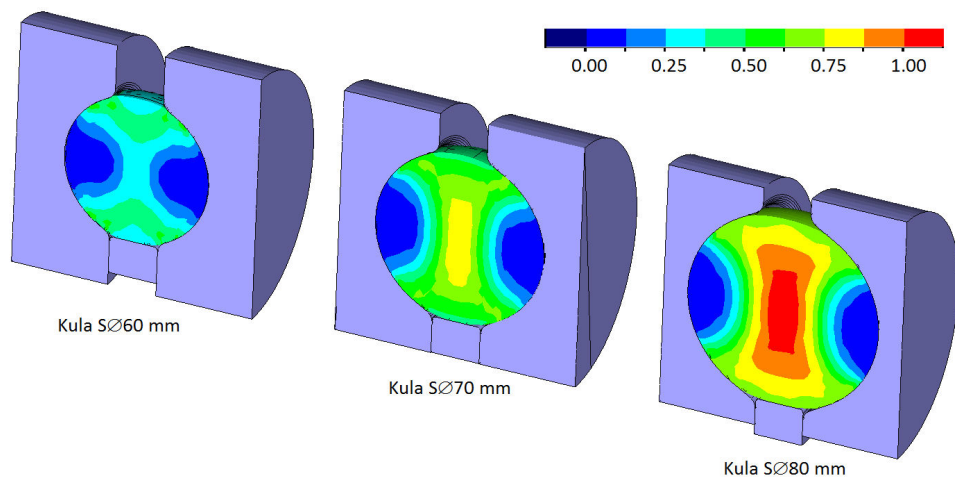
Rys. 6.45. Schemat kształtowania kul metodą kucia półswobodnego (opis w tekście)

Celem sprawdzenia słuszności proponowanego rozwiązania wykonano analizę numeryczną w programie Simufact. Na potrzeby obliczeń zbudowano model numeryczny procesu, przedstawiony na rys. 6.46. Przyjęto przy tym, że: kształtowany materiał (stal węglowa o zawartości 0,6 %C) nagrany jest przed kuciem do temperatury 1050 °C, narzędzia mają stałą temperaturę wynoszącą 250 °C, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a matrycami równy jest 10 kW/m²K, tarcie na powierzchni kontaktu określone jest czynnikiem tarcia $m=0,4$, narzędzia przemieszczają się przeciwbieżnie z prędkością 50 mm/s każde.



Rys. 6.46. Model geometryczny procesu kucia półswobodnego kuli S $\varnothing$ 80 mm z wsadu o średnicy $\varnothing$ 50 mm, zbudowany w programie Simufact

Wsadem do kucia jest odcinek pręta o średnicy $\varnothing 50$ mm, który z obu stron ma zakończenia stożkowe (kąt wierzchołkowy stożka wynosi 150°). Długość wsadu wynosi: $l = 64,5$ mm dla kuli $S\varnothing 60$ mm, $l = 98$ mm dla kuli $S\varnothing 70$ mm oraz $l = 142$ mm dla kuli $S\varnothing 80$ mm. Przy tak dobranej długości objętość wsadu była nieco mniejsza (o $1\div 1,5\%$) od objętości kuli. W przypadku kucia największej kuli długość wsadu była prawie trzykrotnie większa od jego średnicy. Jednakże, ze względu na pewne trzymanie końców wsadu w wykrojach matryc analizowany przypadek kucia można porównać do ściskania pręta o końcach utwierdzonych, dla którego długość wyboczeniowa jest dwukrotnie większa niż podczas ściskania pręta o końcach nietwierdzonych. Zatem, w analizowanych procesach kucia nie powinno mieć miejsca wygięcie (wyboczenie) wsadu.

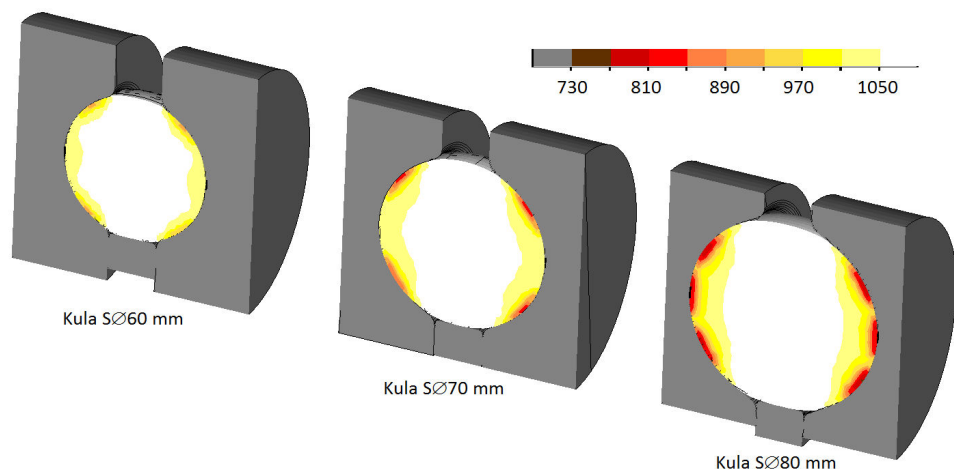


Rys. 6.47. Rozkład intensywności odkształcenia w kulach ukształtowanych metodą kucia półswobodnego z pręta o średnicy $\varnothing 50$ mm

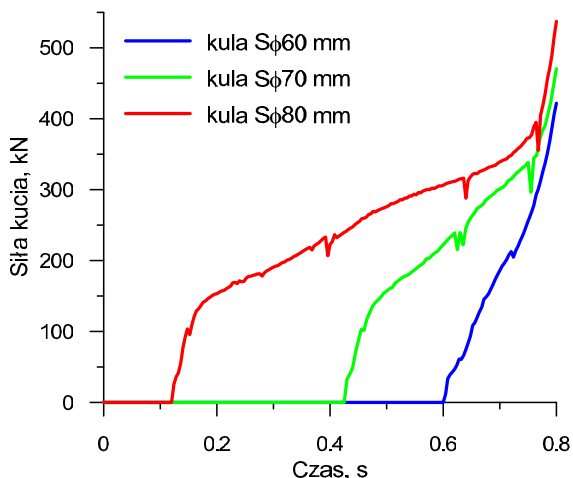
Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że proponowana metoda kucia półswobodnego może być z powodzeniem stosowana do wykonywania z główek złomowanych szyn kul o większych gabarytach, niż w procesie walcowania śrubowego. Na rys. 6.47 pokazano (w przekroju osiowym) kule uzyskane w efekcie symulacji. Wszystkie półwyroby mają prawidłowy kształt, a ich wymiary mieszczą się w tolerancji wykonania wynoszącej ± 3 mm, wg PN dla kucia swobodnego (tab. 1.1). Dodatkowo, na omawianym rysunku zaznaczono rozkład intensywności odkształcenia. Największe odkształcenia występują w części centralnej kul, gdzie ma miejsce największy wzrost średnicy wsadu. Najmniejsze zaś w częściach czołowych, gdzie dochodzi do pierwszego kontaktu materiału z narzędziami. W tych obszarach odkuwki metal tworzy tzw. strefy martwe, które podlegają największemu wychłodzeniu (rys. 6.48), co prowadzi do zmniejszenia plastyczności. Jak wynika z rys. 6.48 zróżnicowanie temperatury na przekroju kuli kutej jest znacznie większe niż w przypadku walcowania. Spadek temperatury na powierzchni czołowej wynosi nawet 300°C . Z tego powodu po procesie kucia kula przed obróbką cieplną powinna być przez pewien czas przetrzymana na powietrzu celem

wyrównania temperatury, która w jej warstwach jest nadal za wysoka do wykonania hartowania.

Zaproponowany proces kucia półswobodnego nie jest zbyt energochłonny. Świadczą o tym stosunkowo niskie wartości sił kucia, których rozkłady przedstawiono na rys. 6.49. Największe siły występują pod koniec procesu, gdy narzędzia stykają się z materiałem na największej powierzchni. Ze względu na małe wartości sił proces kucia kul można zrealizować w maszynie specjalnej, wyposażonej w zasilanie hydrauliczne.



Rys. 6.48. Rozkład temperatury (w °C) w kulach ukształtowanych metodą kucia półswobodnego z pręta o średnicy $\varnothing 50$ mm

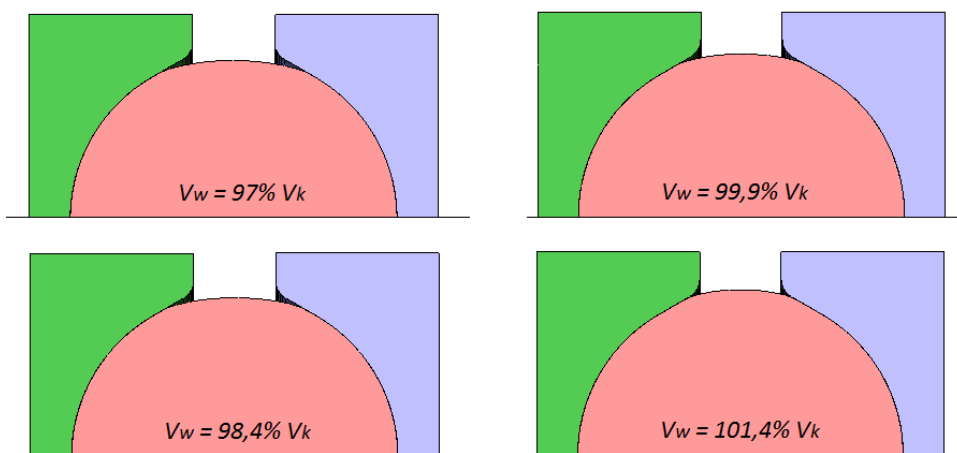


Rys. 6.49. Wyznaczone numerycznie rozkłady sił kształtowania w procesach kucia półswobodnego kul, realizowanego z pręta o średnicy $\varnothing 50$ mm

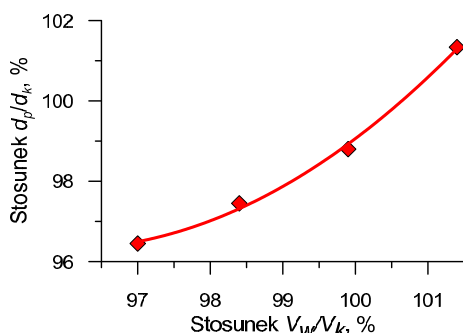
Proces kucia półswobodnego, wg schematu przedstawionego na rys. 6.45, realizowany jest bezwplywkowo. Istotne jest zatem określenie wrażliwości procesu na objętość materiału wsadowego. Celem wyjaśnienia tego zagadnienia wykonano dodatkowe symulacje procesu kucia kul $\varnothing 80$ mm, w których wykorzystano wsady o objętości V_w

wynoszącej od 97% do 101,4% objętości kuli V_k . Takim wahaniom objętości wsadu odpowiadała różnica jego długości w zakresie 6 mm ($l = 140 \div 146$ mm).

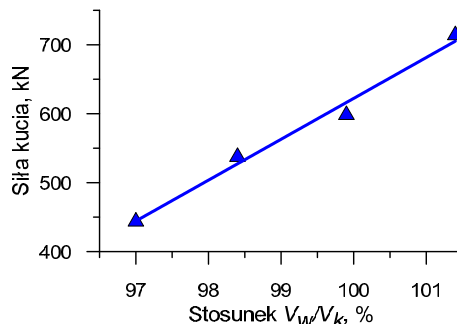
Na rys. 6.50 przedstawiono zarys przekroju kul otrzymanych w analizowanych przypadkach kucia. Widoczne jest, że wraz ze zwiększeniem objętości wsadu wzrasta średnica kuli d_p w płaszczyźnie podziału matryc. Natomiast kształt kuli (przy przeznaczeniu jej na mielniki we wszystkich przypadkach jest zadowalający. Oceny ilościowej wpływu stosunku objętości wsadu V_w do objętości kuli V_k na wartość uzyskiwanej średnicy podziałowej można dokonać na podstawie rys. 6.51. Widoczne jest, że przedstawiona na tym rysunku zależność d_p/d_k zmienia się parabolicznie wraz ze wzrostem V_w/V_k . Zwiększenie objętości wsadu powoduje także znaczący wzrost wartości siły kucia (rys. 6.52), który wyniósł blisko 60% w przypadku porównania skrajnych rozważanych przypadków kucia (nadal są to jednak wartości stosunkowo małe).



Rys. 6.50. Wpływ objętości wsadu V_w (w stosunku do objętości kuli V_k) na wypełnienie wykroju w procesie kucia półswobodnego

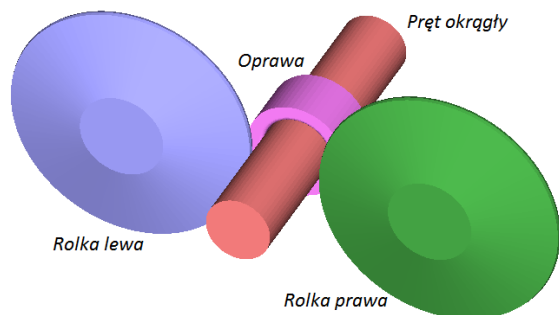


Rys. 6.51. Wpływ stosunku objętości wsadu V_w i kuli V_k na średnicę kuli w płaszczyźnie podziału matryc d_p , gdzie d_k - średnica kuli



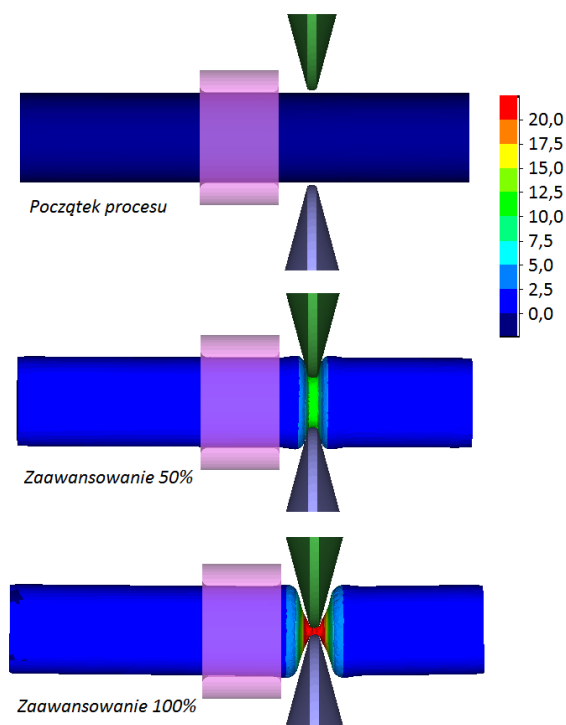
Rys. 6.52. Wpływ stosunku objętości wsadu V_w i kuli V_k na siłę kształtowania w procesie kucia półswobodnego kuli $S\varnothing 80$ mm

Ostatnim zagadnieniem, które należy rozwiązać jest cięcie wsadu na określoną długość, pozwalające na otrzymanie korzystnych dla przebiegu kucia półswobodnego zakończeń stożkowych. Można w tym celu zastosować dwie napędzane rolki, które oprócz ruchu obrotowego mają możliwość przemieszczania liniowego. Schemat takiego procesu cięcia, realizowanego na gorąco, przedstawiono na rys. 6.53.



Rys. 6.53. Schemat procesu cięcia za pomocą dwóch rolek, które oprócz ruchu obrotowego przemieszczają się przeciwbieżnie w stosunku do siebie

Rolki obracające się w tym samym kierunku, w trakcie zbliżania się do siebie (rys. 6.54) wciskają się w pręt i wprowadzają go w ruch obrotowy, w kierunku przeciwnym. W efekcie oddziaływania narzędzi tnących na obwodzie pręta kształtowany jest rowek klinowy, którego głębokość stopniowo wzrasta, aż do rozdzielenia pręta na dwie części.

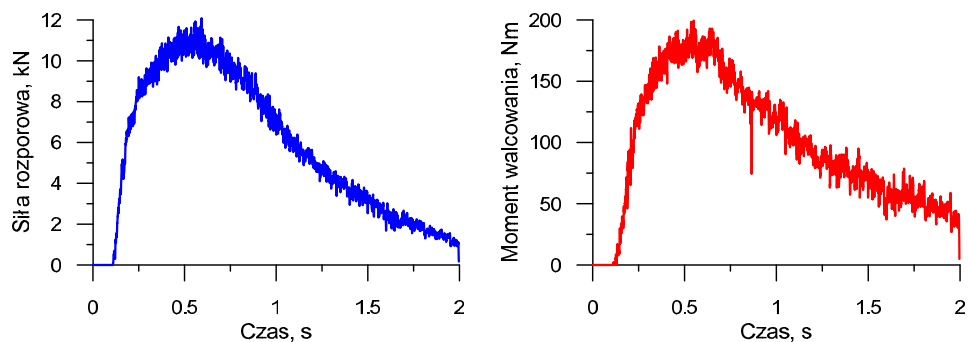


Rys. 6.54. Przebieg procesu cięcia za pomocą dwóch poruszających się przeciwbieżnie i napędzanych obrotowo rolek, z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

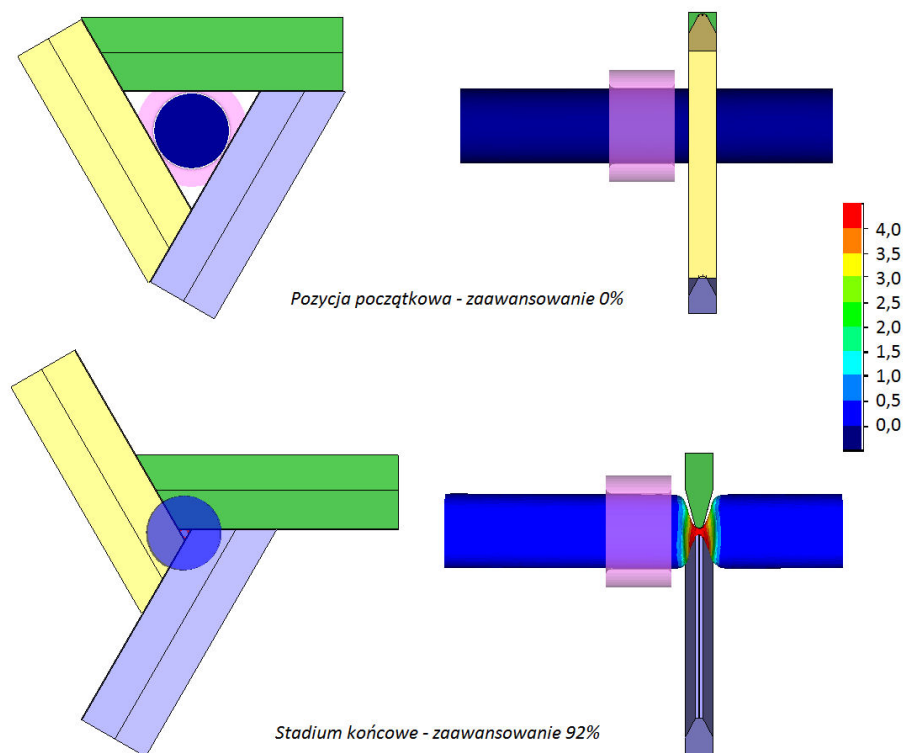
Realizacja procesu cięcia dwoma rolkami nie wymaga zastosowania dużych sił i momentów. W przypadku analizowanego procesu cięcia pręta o średnicy $\varnothing 50$ mm rolkami

6. Problematyka kształtowania kul ze złomowanych szyn kolejowych

obracającymi się z prędkością 120 obr/min i przesuwającymi się w kierunku promieniowym z prędkością 10 mm/s maksymalna siła potrzebna do realizacji procesu wyniosła zaledwie 11 kN, a moment obrotowy 190 Nm (rys. 6.55).

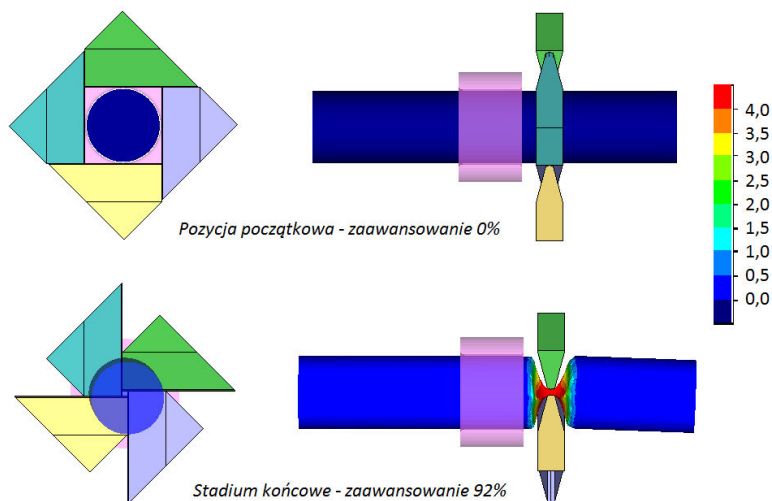


Rys. 6.55. Rozkład siły i momentu w procesie cięcia pręta $\varnothing 50$ mm za pomocą dwóch rolek, realizowanego zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 6.53

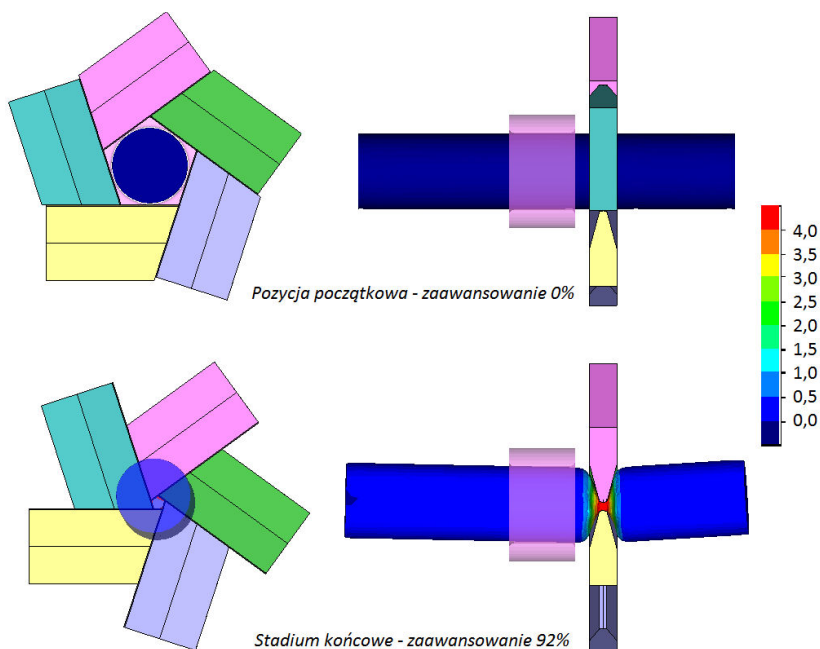


Rys. 6.56. Przebieg procesu cięcia przy pomocy trzech noży klinowych z zaznaczonym rozkładem odkształcenia (w widoku z boku dla stadium końcowego ukryto jeden z noży celem poprawy widoczności)

Inny możliwy do zastosowania schemat cięcia polega na wykorzystaniu głowic, w których noże klinowe przemieszczane są kierunku promieniowym. Schematy takich procesów cięcia, przebiegających z wykorzystaniem od 3 do 5 noży przedstawiono na kolejnych rys. 6.56 - 6.58.



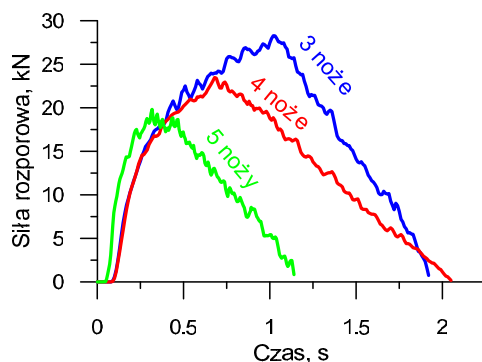
Rys. 6.57. Przebieg procesu cięcia przy pomocy czterech noży klinowych z zaznaczonym rozkładem odkształcenia (w widoku z boku dla stadium końcowego ukryto jeden z noży celem poprawy widoczności)



Rys. 6.58. Przebieg procesu cięcia przy pomocy pięciu noży klinowych z zaznaczonym rozkładem odkształcenia (w widoku z boku dla stadium końcowego ukryto jeden z noży celem poprawy widoczności)

W trakcie procesu cięcia noże ślizgają się wzajemnie po sobie i stopniowo zmniejszają powierzchnię otworu tworzonego przez ich złożenie. Powierzchnia ta ma kształt trójkąta, kwadratu, lub pięciokąta, w zależności od ilości zastosowanych noży. Uzyskany w procesie cięcia materiał wsadowy przeznaczony do kucia ma w części czołowej kształt ostrosłupa o podstawie trójkąta, kwadratu lub pięciokąta.

Realizacja cięcia wsadu nożami klinowymi (podobnie jak proces cięcia dwoma rolkami obrotowymi) nie wymaga zastosowania zbyt dużych sił kształtowania, w przypadku rozdzielania przebiegającego w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Rozkłady sił, przedstawione na rys. 6.59, odnoszące się do przypadków cięcia pokazanych na rys. 6.56-6.58, pokazują, że maksymalne wartości sił cięcia mieszczą się w zakresie od 20 do 30 kN. Siły te są większe wtedy, gdy stosowana jest mniejsza liczba noży, które mają wówczas większy skok.



Rys. 6.59. Rozkłady sił działających na nóż klinowy w procesach cięcia na gorąco pręta $\varnothing 50$ mm, realizowanych zgodnie ze schematami pokazanymi na rys. 6.56-6.58

Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono wyniki prowadzonych prac badawczych procesów walcowania kul w wykrojach śrubowych. Analiza teoretyczna procesów walcowania półfabrykatów kul w wykrojach śrubowych i spiralnych została przeprowadzona w oparciu o techniki numeryczne bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). W obliczeniach wykorzystano komercyjny pakiet oprogramowania MES (Simufact Forming w wersji 10.0), który był wielokrotnie wykorzystywany przez autorów w analizie rotacyjnych procesów kształtowania plastycznego metali i stopów, a uzyskane wyniki z powodzeniem były weryfikowane w czasie badań doświadczalnych. Symulacje walcowania kul prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia z uwzględnieniem zjawisk termicznych zachodzących w trakcie kształtowania. Podczas obliczeń wyznaczono podstawowe parametry siłowe i kinematyczne procesu oraz określono możliwości wytwarzania odkuwek kul nowo opracowanymi metodami walcowania. Prognozowano również możliwość pojawienia się zjawisk zakłócających stabilny przebieg procesów, które mogą mieć negatywny wpływ na jakość kształtowanych półfabrykatów. Część z analizowanych numerycznie procesów walcowania skośnego kul w wykrojach śrubowych zweryfikowano doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych Katedry Plastycznej Przeróbki Metali, Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie, wykorzystując zainstalowaną tam walcarkę skośną.

Po krótkim wprowadzeniu w rozdziale pierwszym, w którym scharakteryzowano obszar zastosowania wyrobów w kształcie kul oraz metody ich wytwarzania, przedstawiono rys historyczny procesów walcowania kul w wykrojach śrubowych. Jak się okazuje, pierwsze procesy walcowania śrubowego kul opracowano już pod koniec XIX wieku. Jednak pomimo długiej historii i wielu cennych zalet do tej pory nie są to metody powszechnie stosowane. W rozdziale drugim przedstawiono istotę procesu walcowania śrubowego kul w walcarkach skośnych. Omówiono szczegółowo sposób kalibrowania tradycyjnych narzędzi śrubowych stosowanych w procesach walcowania kul, a także podano wpływ poszczególnych parametrów geometrycznych narzędzi i technologicznych procesu na jakość kształtowanych wyrobów. Przedstawiono również rozwiązania konstrukcyjne i parametry techniczne dostępnych na rynku walcarek skośnych do walcowania kul. Następnie przedstawiono wyniki symulacji numerycznych i badań doświadczalnych procesu walcowania kul $S\varnothing 33$ w wykrojach śrubowych. W kolejnym rozdziale opisano procesy walcowania śrubowo-klinowego wyrobów w kształcie kul, w których wykorzystuje się narzędzia z kołnierzami o klinowo-wklęsłych powierzchniach bocznych. Omówiono sposób kalibrowania narzędzi śrubowych i podano zakresy parametrów geometrycznych, gwarantujących stabilny przebieg procesu walcowania. Następnie przedstawiono wyniki symulacji numerycznych walcowania kul $S\varnothing 33$ w wykrojach śrubowo-klinowych, które zweryfikowano doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych. Rozdział czwarty poświęcono procesom walcowania odkuwek kul w wielozwojnych wykrojach śrubowo-klinowych. Omówiono korzyści płynące ze stosowania narzędzi wielo-

krotnych oraz sposób ich kalibrowania. Przedstawiono również przykładowe rozwiązania konstrukcyjne narzędzi wielozwojnych stosowanych do walcowania kul. Następnie opisano wyniki analizy numerycznej i badań doświadczalnych walcowania kul $S\varnothing 30$ w trójzwojnych wykrojach śrubowo-klinowych. Nowatorskie metody walcowania śrubowego kul, które opracowano w ramach prowadzonych badań opisano w rozdziale piątym. Omówiono tutaj między innymi procesy walcowania kul w wykrojach śrubowo-spiralnych, które umożliwiają kształtowanie kul z półfabrykatów o znacznie większych średnicach w stosunku do wymiaru walcowanej kuli. Przedstawiono również procesy walcowania kul w wykrojach spiralnych, w których wykorzystuje się narzędzia w kształcie dysków o płaskich lub stożkowych powierzchniach roboczych. Proces walcowania kul można również zrealizować wykorzystując narzędzia o wewnętrznych i zewnętrznych wykrojach śrubowo-klinowych. Zaproponowano także realizację procesu walcowania odkuwek kul między trzema narzędziami, na powierzchniach których wykonane są śrubowo-klinowe kołnierze. Przedstawiono również wyniki symulacji numerycznych nowo-opracowanych procesów walcowania półfabrykatów kul. W rozdziale szóstym omówiono problematykę kształtowania kul ze złomowanych szyn kolejowych. Przedstawiono sposób zagospodarowania złomowanych szyn oraz metody pozyskiwania z nich półfabrykatów. Następnie opisano metody kształtowania prętów o przekroju kołowym z główek odciętych od złomowanych szyn kolejowych. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki analizy numerycznej walcowania śrubowego kul z półfabrykatów pozyskanych ze złomowanych szyn kolejowych. Zaproponowano również w oparciu o pozyskany materiał, kształtowanie kul o większych średnicach w procesach kucia matrycowego. Przeanalizowano także wpływ zmiany objętości materiału na parametry geometryczne wyrobów oraz parametry siłowe procesu kucia. Rozdział zamyka analiza metod cięcia półfabrykatów do kucia matrycowego kul.

Summary

The book presented the results of research conducted on processes of rolling balls in helical impressions. The theoretical analysis of rolling semi-finished balls in helical and spiral impressions was performed with numerical methods which are based on the finite element method (FEM). The calculations were made using FEM commercial software Simufact Forming v10.0, which has already been many times used by the authors to analyze rotary processes of forming metals and alloys, and the obtained analysis results were then positively verified in the course of experimental tests. The ball simulations were conducted in a three-dimensional state of strain, with the thermal phenomena which occur during the forming process taken into account. During the calculations, basic force parameters and kinematic parameters of the process were determined, and possibilities of producing ball forgings by newly-developed rolling methods were investigated. Also, the potential occurrence of phenomena interrupting the process stability that could affect negatively the quality of formed semi-finished products was investigated. Some of the numerically analyzed rolling processes of balls in helical impressions were then experimentally verified in laboratory conditions at the Department of Metal Forming in the Faculty of Metal Engineering and Industrial Computer Science of the AGH University of Science and Technology, Cracow, Poland, using the helical rolling mill available there.

Chapter 1 began with a brief introduction describing application fields of ball-shaped products and their production methods. It then presented a historical outline concerning processes of rolling balls in helical impressions. The first ball rolling processes were developed already in the late 19th century. Despite their long history and numerous advantages, these methods have not been widely used so far. The second chapter presented the essence of rolling with helical rolling mills. The chapter discussed in detail the way of sizing of standard helical tools used in ball rolling processes, as well as it offered a description of the effect of particular geometric parameters of tools and of technological process parameters on the quality of formed products. The chapter also presented design solutions and technical parameters of currently available helical rolling mills for rolling balls. Next, the results of conducted numerical simulations and experimental tests of rolling balls with a diameter of 33 mm in helical impressions were presented. The third chapter offered a description of helical-wedge rolling processes of ball-shaped products in which tools that have collars with concave wedge flanks are used. Also, the way of sizing helical tools was discussed and ranges of geometrical parameters which ensure the rolling process stability were given. Then, the chapter presented the results of conducted numerical simulations of rolling balls with a diameter of 33 mm in helical-wedge impressions which were experimentally verified in laboratory conditions. Chapter 4 was dedicated to processes of rolling ball forgings in multi-coil helical-wedge impressions. The chapter discussed the advantages of using multiple tools as well as the methods of sizing such tools. The chapter also presented some solutions

concerning the design of multi-coil tools used in ball rolling. Next, the results of conducted numerical analysis and experimental tests of rolling balls with a diameter of 30 mm in three-coil helical-wedge impressions were discussed. Innovative methods of helical rolling of balls were described in the fifth chapter. Among other things, this chapter discussed processes of rolling balls in helical-spiral impressions, which makes it possible to form semi-finished balls with diameters that are considerably bigger relative to the dimensions of the ball being rolled. The chapter also presented processes of rolling balls in spiral impressions where tools in the shape of discs with flat or conical working surfaces are used. The ball rolling process can also be realized using tools with internal and external helical-wedge impressions. The chapter also suggested that rolling ball could be done between three tools whose surfaces have helical-wedge collars. The chapter also presented the results of numerical simulations for the newly developed processes of rolling semi-finished balls. Chapter 6 discussed the problem of forming balls made of scrap railway rails. It presented both the way of recycling scrap railway rails and methods of obtaining semi-finished products out of them. Then, the methods of forming rods with a circular section out of heads cut off scrap railway rails were described. In the further part of the chapter, the results of conducted numerical analysis of helical rolling of balls made of semi-finished products obtained from scrap railway rails were presented. Given the material used, it is suggested in the chapter that balls with bigger diameters be formed by die forging. The chapter also analyzed the effect of changes in material volume on geometric parameters of products and on force parameters of the forging processes. Finally, the chapter offered an analysis of methods of cutting semi-finished products used in die forging of balls.

Literatura

1. Bartnicki J., Pater Z. *Numerical simulation of three-rolls cross wedge rolling of hollowed shaft*. Journal of Materials Processing Technology 2005 vol. 164-165 s. 1154-1159
2. 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
3. Boremann J. *Machine for manufacturing balls or other bodies*. US Patent No. 672,664, 23.04.1901
4. Celikov A. I. i in. *Specjalnye prokatnye stany*. Moskva: Wyd. Metallurgija 1971
5. Dobrucki W. *Wpływ podstawowych parametrów procesu na dokładność i jakość kul walcowanych na gorąco*. Obróbka Plastyczna 1970 Tom IX Zeszyt 4 s. 579-589
6. Dobrucki W., Mischke J. *Wstępne badania procesu walcowania kul na gorąco*. Obróbka Plastyczna 1970 Tom IX Zeszyt 1 s. 133-146
7. Dyja H. i in. *SPRAWOZDANIE Z REALIZACJI PROJEKTU ROZWOJOWEGO NR N R07 0012 06, pt.: „Opracowanie nowej technologii walcowania kul stalowych ze złomowanych szyn kolejowych”. Zadanie nr 4. Termomechaniczna symulacja walcowania wzdłużnego półwyrobów z szyn w wykrojach*. Częstochowa 2010 s. 1-94 (maszynopis)
8. Granowskij S. P. *Novyje processy i stany dla prokatki izdelij v vintovych kalibrach*. Moskva: Wyd. Mietalurgija 1980
9. Herzfeld A. *Ball grinding mill*. US Patent No. 569,268, 20.10. 1896
10. Hodge G. O. *Machine for forming balls*. US Patent No. 1,665,361, 10.04.1928
11. <http://www.skewrollingmill.com>
12. <http://www.vniimetmash.ru>
13. Kazanecki J. *Wytwarzanie rur bez szwu*. Kraków: AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne 2003
14. Kazanecki J., Kajtoch J., Chyła P. *Opracowanie metodyki projektowania narzędzi do procesu walcowania poprzecznego kul stalowych metodą WPK oraz w walcierce skośnej*. Opracowanie niepublikowane. Kraków 2010, s. 1-25
15. Kazanecki J., Pater Z., Bartnicki J. *The analysis of the influence of plug shape and its position on piercing process in skew rolling mill*. Computer Methods in Materials Science 2007 vol. 7, no 2 s. 299-304
16. Kempster D. E. *Die for rolling articles of metal*. US Patent No. 385.186, 26.06.1888
17. Kreiss E. *Desintegrator*. US Patent No. 639,406, 19.12.1899
18. Lapovok R., Smirnov S., Solomein V. *Modeling the helical rolling of rods in three-high mill*. Journal of Materials Processing Technology 1998 vols. 80-81 s. 365-369

19. Mróz S., Szota P., Stefanik A., Dyja H. *Numeryczne modelowanie procesu walcowania prętów okrągłych ze złomowanych szyn kolejowych*. Hutnik - Wiadomości Hutnicze 2011 nr 5 s. 400-403
20. Munro A. C. *Ball forming machine*. US Patent No. 1,691,248, 13.11.1928
21. Munro A. C. *Ball forming machine*. US Patent No. 1,746,671, 11.02.1930
22. Panov E. I. *Effect of the parameters of helical rolling on the magnitude of the circumferential stresses that develop in solid semifinished product*. Metallurgist 2005 vol. 49 nos 3-4 s. 102-109
23. Pater Z. *Finite element analysis of cross wedge rolling*. Journal of Materials Processing Technology 2006 vol. 173 s. 201-208
24. Pater Z. *Podstawy teoretyczne i badania eksperymentalne procesu walcowania klinowo-rolkowego*. Wyd. INOP, Poznań 2007
25. Pater Z. *Stress state in cross wedge rolling process*. Archives of Metallurgy 2003 vol. 48-1 s. 21-35
26. Pater Z. *The analysis of the state of strain in parts formed by means of the wedge-rolls rolling (WRR)*. Archives of Metallurgy and Materials 2006 vol. 50-3 s. 675-690
27. Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2001
28. Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe*. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2009
29. Pater Z. *Wartość graniczna całki Cockrofta-Lathama dla stali kolejowej gatunku R200*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2010 nr 12 s. 702-707
30. Pater Z., Bartnicki J. *Finished cross-wedge rolling of hollowed cutters*. Archives of Metallurgy and Materials 2006 vol. 51-2 s. 205-211
31. Pater Z., Bartnicki J., Samotył G. *Numerical modeling of cross wedge rolling process of ball pin*. Journal of Materials Processing Technology 2005 vol. 164-165 s. 1235-1240
32. Pater Z., Brożek J. *Walcowanie poprzeczne kul do młynów kulowych*. Przegląd Mechaniczny 2012 nr 6 s. 41-45
33. Pater Z., Gontarz A., Weroński W. *Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls*. Journal of Materials Processing Technology 2006 vol. 177 s. 550-554
34. Pater Z., Gontarz A., Weroński W. *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno-klinowego*. Lublin: LTN 2001
35. Pater Z., Kazanecki J. *Thermo-mechanical analysis of piercing plug loads in the skew rolling process of thick-walled tube shell*. Metallurgy and Foundry Engineering 2006 vol. 32 no 1 s. 31-40
36. Pater Z., Kazanecki J., Bartnicki J. *Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill*. Journal of Materials Processing Technology 2006 vol. 177 s. 167-170
37. Pater Z., Tofil A. *Experimental and theoretical analysis of the cross – wedge rolling process in cold forming conditions*. Archives of Metallurgy and Materials 2007 vol. 52-2 s. 289-297
38. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie do kształtowania kul metodą kucia półswobodnego*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398832, 2012
39. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie do walcowania skośnego wyrobu typu kula*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394835, 2011

40. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie spiralne do walcowania poprzecznego kul*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399155, 2012
41. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie spiralne do walcowania poprzecznego wielokrotnego wyrobów typu kula*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399154, 2012
42. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie spiralno – śrubowe do walcowania skośnego kul*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398914, 2012
43. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie stożkowo – spiralne do walcowania poprzecznego kul*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399569, 2012
44. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie stożkowo – spiralne do walcowania kul*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399570, 2012
45. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie wielozwojne do walcowania skośnego wielokrotnego*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.397942, 2012
46. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie wielozwojne do walcowania skośnego jednoczesnego*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.397943, 2012
47. Pater Z., Tomczak J. *Narzędzie z wewnętrznym wykrojem śrubowym do walcowania kul*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399528, 2012
48. Pater Z., Tomczak J. *Sposób kształtowania kul metodą kucia półswobodnego*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398831, 2012
49. Pater Z., Tomczak J. *Sposób kształtowania kul metodą kucia półswobodnego w układzie podwójnym*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398830, 2012
50. Pater Z., Tomczak J. *Sposób walcowania skośnego dwoma walcami spiralno – śrubowymi wyrobów typu kula*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.398915, 2012
51. Pater Z., Tomczak J. *Sposób walcowania skośnego trzema walcami śrubowymi wyrobów typu kula*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.400061, 2012
52. Pater Z., Tomczak J. *Sposób walcowania wyrobów typu kula, zwłaszcza w wykroju spiralnym dwoma dyskami*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399170, 2012
53. Pater Z., Tomczak J. *Sposób walcowania wyrobów typu kula, zwłaszcza w wykroju spiralnym dwoma dyskami stożkowymi*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399571, 2012
54. Pater Z., Tomczak J. *Sposób walcowania wyrobów typu kula, zwłaszcza w mimośrodowym wykroju spiralnym dwoma dyskami stożkowymi*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399568, 2012
55. Pater Z., Tomczak J. *Sposób walcowania wyrobów typu kula, zwłaszcza w śrubowym wykroju wewnętrzno – zewnętrznym*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.399529, 2012
56. Qiang Y. F., Song P. B. *Analysis on temperature distribution in cross wedge rolling process with finite element method*. Journal of Materials Processing Technology 2007 vol. 187-188 s. 392-196
57. Quanxian W., Qiping W., Jianming X.: *Study on the method for groove design in the helical rolling of steel balls*. Journal of Materials Processing Technology, 1995, vol. 55 s. 340-344
58. Romanenko V. P., Sizov D. V. *Simulation of the Skew Rolling of Large Ingots in a Two-Roller Mill*. Steel in Translation 2010 vol. 40 no 11 s. 945-948
59. Samołyk G., Pater Z. *Spęcanie głowy szyny S60 z fragmentem średnika*. Rudy i Metale Nieżelazne 2010 nr 6 s. 389-392

60. Sawicki S., Szota P., Dyja H. *Analysis of the bimetallic bars rolling during a skew rolling*. Archives of Materials Science and Engineering 2008 vol. 32 s. 53-56
61. Sawicki S., Szota P., Mroz S., Stefanik A., Dyja H. *Wpływ prędkości obrotowej na stan naprężeń i odkształceń prętów bimetalowych w procesie walcowania w trójwalcowej walcierce skośnej*. Obróbka Plastyczna Metali 2009 nr 1 s. 65-75
62. Shi X., Wang B. *Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling*. Materials Science Forum 2012 vols. 704-705 s. 151-154
63. Shi X., Wang B., Li Z. *Optimization of Pass Parameters on Two-Grooves Skew Rolling for AL Ball*. Key Engineering Materials 2010 vols. 419-420, s. 313-316
64. Šor E. R. *Novye processy prokatki*. Moskva: Wyd. Metallurgizdat 1960
65. *Stalowe kule i cylpepsy do młynów*. Polska Norma PN-H-94057
66. Tartakovsky I. K. *Helical rolling mill rolls line for producing die-rolled sections and solids of revolution*. US Patent No. 4,206,622, 10.06.1980
67. Wang Q., Wang Q., Xiao J. *Study on the method for groove design in the helical rolling of steel balls*. Journal of Materials Processing Technology 1995 vol. 55 s. 340-344
68. Wasiunyk P. *Kucie matrycowe*. Warszawa: WNT 1978
69. Wells D. E. *Ball forming mill*. US Patent No. 2,409,649, 22.10.1946
70. Yang S. C., Chen C. K. *The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls*. Proc. Instn. Mech. Engrs 2001 vol. 215 Part C s. 523-532