

Walcowanie poprzeczno-
-klinowe kul

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Zbigniew Pater
Janusz Tomczak

Walcowanie poprzeczno- -klinowe kul



Politechnika Lubelska
Lublin 2012

Opiniodawca:

dr hab. inż. Andrzej Gontarz, prof. Politechniki Lubelskiej

Redakcja i skład: Janusz Tomczak

Monografia powstała w ramach realizacji projektu badawczo-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: 978-83-63569-07-5

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.agencjatom.pl

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

Nakład: 100 egz.

Spis treści

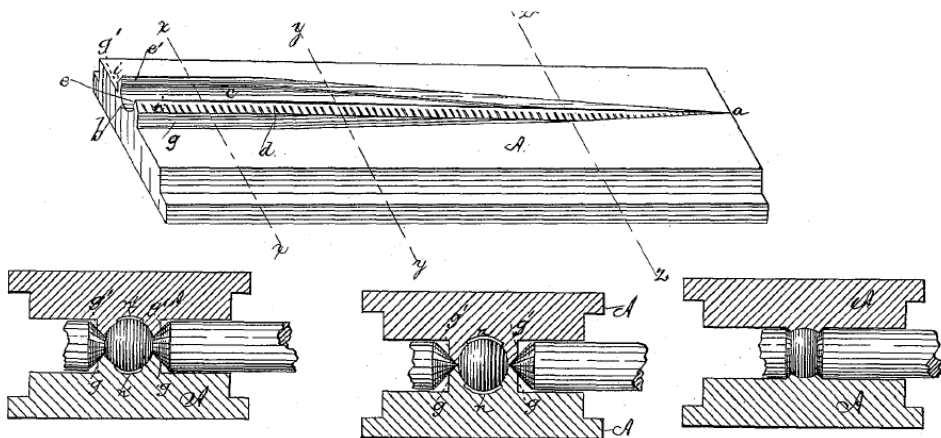
1. Wprowadzenie	7
2. Rozwój teorii i technologii WPK	23
2.1. Teoria	24
2.1.1. Analiza inżynierska	24
2.1.2. Metoda warstwowa	25
2.1.3. Metoda elementów skończonych (MES)	26
2.2. Technologia	28
2.2.1. Nowe metody walcowania	28
2.2.2. Walcowanie wyrobów niesymetrycznych osiowo	29
2.2.3. Walcowanie wyrobów drążonych	31
2.2.4. WPK wałków ze stopniem mimośrodowym	32
2.2.5. WPK na zimno	34
2.2.6. WPK części z metali nieżelaznych i ich stopów	35
2.2.7. Maszyny do WPK	35
3. Analiza numeryczna procesu WPK kul	37
3.1. WPK metodą zwykłą	38
3.2. WPK ze spęczaniem	50
3.3. WPK metodą równoległą	63
3.4. Rozcinanie półwyrobów kul	76
4. Próby doświadczalne procesu WPK kul	87
4.1. Walcowanie poprzeczne kul z jednoczesnym spęczaniem materiału	87
4.2. Stanowisko badawcze i narzędzia do WPK odkuwek kul	89
4.2.1. Stanowisko badawcze	89
4.2.2. Narzędzia płasko-klinowe do WPK odkuwek kul	91
4.3. Symulacje numeryczne walcowania kul $S\varnothing 22$	93
4.3.1. Symulacje WPK kul metodą zwykłą	94
4.3.2. Symulacje WPK kul metodą równoległą	96
4.3.3. Symulacje WPK kul ze spęczaniem	99
4.4. Konstrukcja narzędzi do WPK odkuwek kul	102
4.5. Weryfikacja doświadczalna WPK odkuwek kul	107
4.5.1. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul metodą zwykłą	107
4.5.2. Walcowanie kul metodą równoległą	110
4.5.3. Walcowanie kul metodą wsteczną	112

5. Próby przemysłowe WPK kul	115
5.1. WPK ośmiu kul metodą zwykłą	115
5.2. WPK sześciu kul metodą zwykłą	122
5.3. Walcowanie poprzeczne sześciu kul	127
6. Innowacyjne procesy walcowania poprzeczno-klinowego kul	135
6.1. Walcowanie poprzeczne dwoma walcami wyrobów typu kula metodą wglębną	135
6.1.1. Istota procesu walcowania poprzecznego kul dwoma walcami metodą wglębną	135
6.1.2. Konstrukcja narzędzi do walcowania poprzecznego odkuwek kul ...	137
6.2. Walcowanie poprzeczne odkuwek kul dwoma walcami metodą styczną ...	139
6.3. Walcowanie poprzeczne odkuwek kul dwoma walcami metodą planetarną	141
6.4. Walcowanie poprzeczne odkuwek kul dwoma walcami w sposób ciągły ...	142
6.5. Walcowanie poprzeczne kul w układzie pojedynczym dwoma tarczami metodą wglębną	144
6.6. Walcowanie poprzeczno - klinowe kul w układzie pojedynczym dwoma tarczami	146
6.7. Walcowanie poprzeczne kul w układzie pojedynczym dwoma dyskami płaskimi	148
6.8. Walcowanie poprzeczne kul z główek złomowanych szyn kolejowych	150
6.8.1. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami płaskimi	150
6.8.2. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami w kształcie walców	153
6.8.3. Dwuetapowe walcowanie poprzeczno-klinowe kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami płaskimi	155
7. Podsumowanie	159
8. Summary	161
Literatura	163

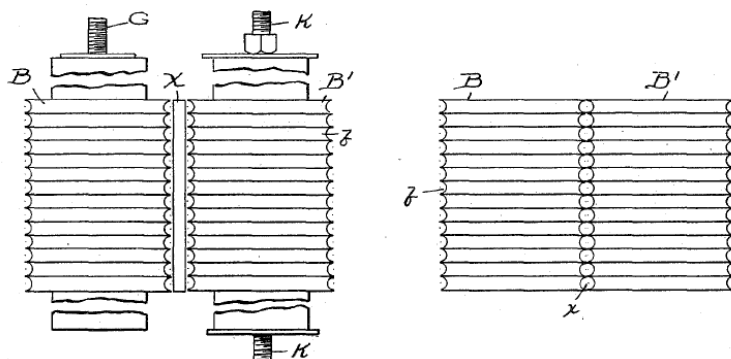
1. Wprowadzenie

Półwyroby kul są powszechnie wykorzystywane w gospodarce, przede wszystkim na mielniki do młynów kulowych oraz elementy toczne łożysk. Zapotrzebowanie roczne na półwyroby tego typu liczone jest w milionach ton (w skali światowej). Tak duża wielkość produkcji powoduje, że uzasadnione jest zarówno udoskonalanie dotychczas stosowanych metod wytwarzania, jak i poszukiwanie nowych sposobów produkcji, odznaczających się mniejszą energochłonnością i materiałochłonnością.

Pod koniec XIX wieku w efekcie rozwoju przemysłu światowego wzrosło zapotrzebowanie na kule stalowe, które zaczęły być powszechnie stosowane w łożyskach tocznych. W tym samym okresie zaczęto budować młyny kulowe, np. [31, 41], w których materiał rozdrabniany był w efekcie oddziaływania kul. Jednym z pierwszych wynalazców, który zainteresował się wytwarzaniem kul stalowych był Amerykanin Simonds, założyciel (1886 r.) "*The Simonds Rolling Machine Company*". Jeden [100] z kilku patentów jakie uzyskał on w 1885 roku dotyczył narzędzia umożliwiającego walcowanie poprzeczne pojedynczych kul (rys. 1.1). Narzędzie to miało kształt rozszerzającego się na boki klina, przez którego środek biegła bruzda o półkolistym przekroju poprzecznym. W procesie walcowania kuli wykorzystywano dwa identyczne narzędzia, które przemieszczając się przeciwnie do siebie wcinając się w materiał wsadowy (pręt okrągły). Pod koniec procesu kula była odcinana od pręta. Mankamentem metody był dość duży odpad technologiczny, towarzyszący ukształtowaniu pojedynczego półwyrobu. Narzędzia klinowe montowane były w walcierce napędzanej silnikiem parowym, której pierwsze konstrukcje również zawdzięczane są Simondsovi [99 - 101]. Podobna metoda walcowania, ale realizowana w układzie dwóch, obracających się w tym samym kierunku walców, została opracowana w 1888 roku przez Tebbetts'a [104].



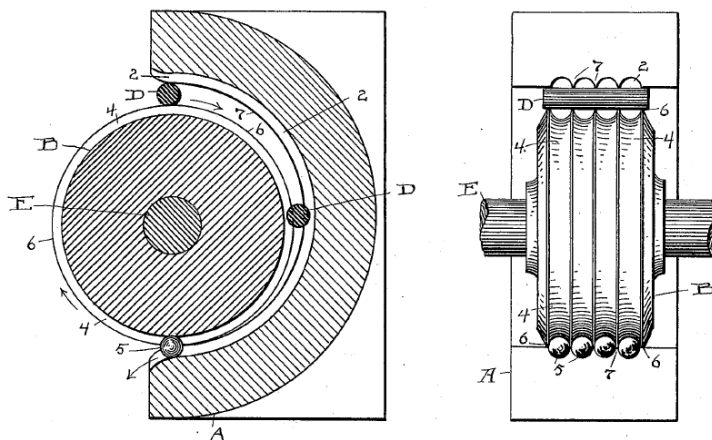
Rys. 1.1. Narzędzie do walcowania poprzecznego półwyrobu kuli, opracowane przez Simondsa [100]



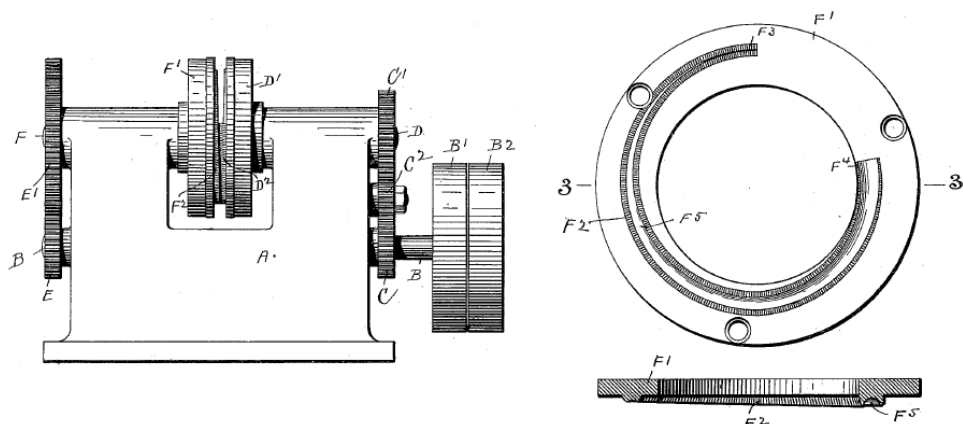
Rys. 1.2. Schemat procesu walcowania kul za pomocą dwóch walców bruzdowych, opracowany przez Hill'a [32]

Pod koniec XIX wieku Hill opatentował nową metodę walcowania kul do łożysk tocznych [32]. Polegała ona na zastosowaniu w procesie walcowania dwóch walców obracających się w tym samym kierunku, z których jeden dodatkowo miał możliwość przemieszczania się w kierunku promieniowym. Na powierzchni walców wykonane były pierścieniowe bruzdy (o półkolistym przekroju poprzecznym), które miały za zadanie ukształtowanie półwyrobów kul. Wsadem do walcowania był odcinek pręta o średnicy mniejszej od średnicy kuli. Schemat procesu wytwarzania kul wg Hill'a przedstawiono na rys. 1.2.

W tym samym czasie co Hill (1898 r.) patent na nową metodę walcowania kul uzyskuje Brisben [8]. W jego procesie kule kształtowane są przez walec oraz segment wklęsły, zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1.3. Oba narzędzia na powierzchniach roboczych mają wykonane bruzdy o półkolistym przekroju poprzecznym. W efekcie mimośrodowego osadzenia walca w segmencie wklęsłym uzyskiwano zmniejszenie szczeliny niezbędne do zginięcia materiału wsadu (pręta), który dodatkowo w trakcie kształtowania wykonywał ruch obrotowy.

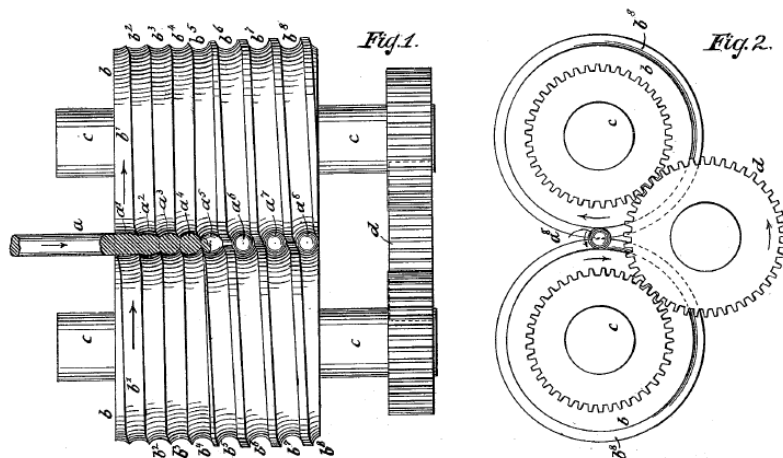


Rys. 1.3. Schemat procesu walcowania kul w układzie walec-segment wklęsły, opracowany przez Brisben'a [8]



Rys. 1.4. Agregat do walcowania kul oraz jedno z narzędzi kształtujących, opracowane przez Putnam'a w 1899 roku [94]

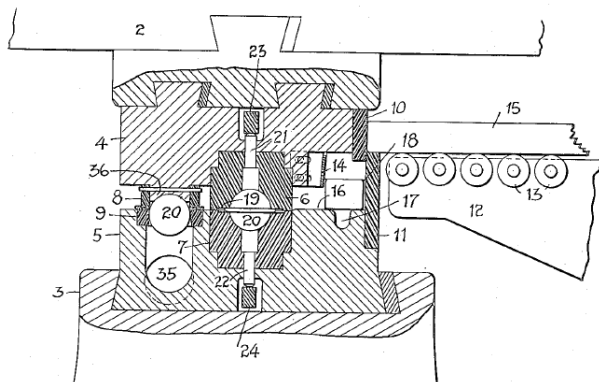
W 1899 roku Putnam przedstawił nową koncepcję walcowania kul [94]. Zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1.4 półwyrob kul kształtowany był w wyniku oddziaływania dwóch tarcz, mających wykonane na powierzchniach roboczych w sposób spiralny kliny (podobne jak u Simondsa), które obracając się przeciwnie wcinając się we wsad i kształtowały półwyroby kul. Ten schemat kształtowania, ze względu na trudności z wykonawstwem narzędzi nie znalazł jednak zastosowania. Problematyczne było również przemieszczanie poosiowego materiału w trakcie procesu, które powinno być wspomagane przez odpowiednio zsynchronizowany popychacz.



Rys. 1.5. Sposób kształtowania kul walcami śrubowymi opracowany przez Bornemann'a [5]

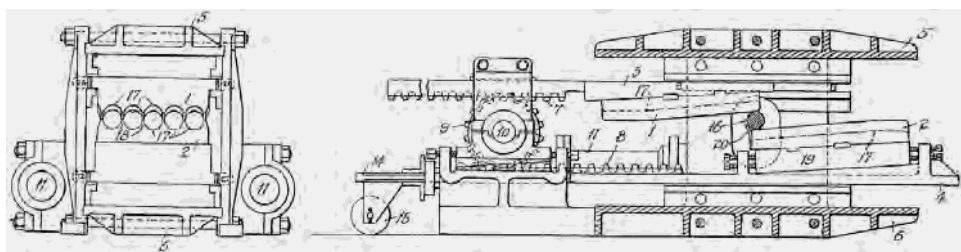
Kolejna koncepcja walcowania kul została opracowana przez Bornemann'a [5] i polegała na wykorzystaniu dwóch walców, na których obwodzie wykonano śrubowe bruzdy (rys. 1.5). Walce były ustawione równolegle do siebie i obracały się w tym samym kierunku. Bruzdy miały zmienną krzywiznę oraz zmienny skok linii śrubowej, co powo-

dowało, że były praktycznie niemożliwe do wykonania przy stanie techniki z początku XX wieku. Nie przewidziano zastosowania listew prowadzących, utrzymujących materiał we właściwej pozycji w trakcie walcowania.



Rys. 1.6. Metoda kucia wyphywkowego odkuwek kul, realizowana na prasie hydraulicznej, opatentowana przez Candę w roku 1916 [17]

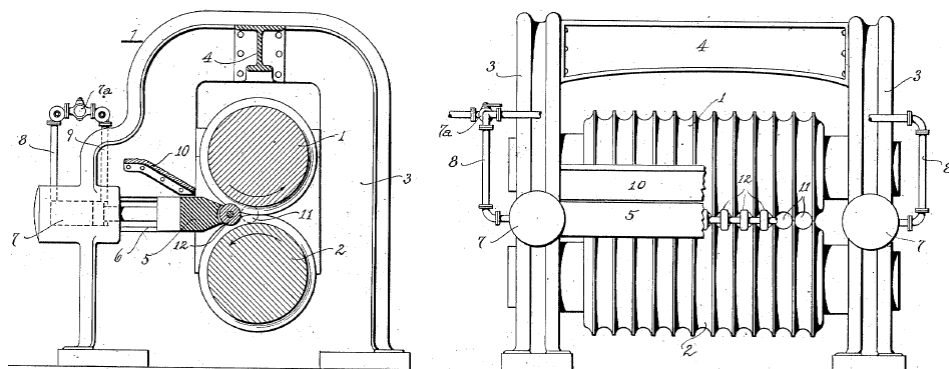
Ogromny wkład w rozwój technologii wytwarzania kul przeznaczonych na mielniki wniósł Amerykanin Ferdinand M. Canda. Wynalazca ten zajął się opracowaniem nowych metod wytwarzania kul o dużych gabarytach (powyżej 3"), które w owym czasie powszechnie produkowano w procesie kucia na młotach parowych (najczęściej za pomocą 6-8 uderzeń i z koniecznością stosowania dogrzewania kształtowanego materiału). W jednym z pierwszych swoich patentów [17] Canda zaproponował nową metodę kucia, realizowanego na prasie hydraulicznej. Schemat tego procesu pokazano na rys. 1.6. Wsad do kucia odcinany był z pręta o przekroju poprzecznym kwadratowym, za pomocą dwóch noży. Następnie był on umieszczany w wykroju matrycującym (posiadającym wyrzutniki), w którym kształtowano odkuwkę kuli. Nadmiar materiału idącego w wyphywkę usuwano w wykroju do okrawania, umieszczonym z boku matrycy.



Rys. 1.7. Walcowanie poprzeczne półwyrobów kul, realizowane w walcarkę z narzędziami płaskimi, wprowadzone przez Candę w 1918 roku [14]

Kolejne patenty uzyskane przez Candę dotyczyły wytwarzania kul na mielniki w oparciu o bardziej wydajne metody walcowania poprzecznego. W 1918 roku wynalazca opatentował walcarkę [14] pracującą w układzie dwóch przemieszczających się przeciwnie narzędzi płaskich, pozycjonowanych w układzie poziomym (rys. 1.7) bądź pionowym. Narzędzia te wciskając się we wsad (pręt) o średnicy mniejszej od średnicy kuli, wprawiały go w ruch obrotowy, w trakcie którego otrzymywane były półwyroby kul.

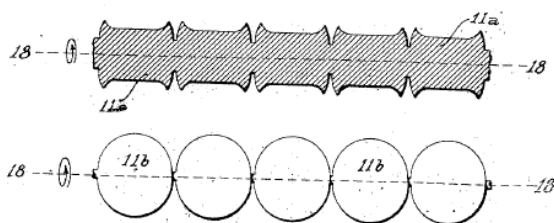
Wadą maszyny było występowanie ruchu powrotnego (jałowego) suwaków, co wymagało zmiany kierunku obrotów koła napędowego i odbijało się niewątpliwie na wydajności procesu wytwarzania.



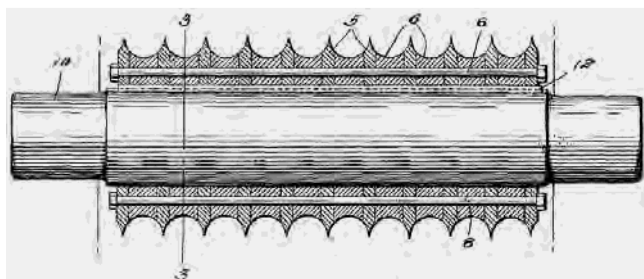
Rys. 1.8. Walcowanie poprzeczne półwyrobów kul, realizowane w walcierce dwuwalcowej, opatentowane przez Candę w 1921 roku [16]

Od wspomnianej powyżej wady procesu kształtowania półwyrobów kul w walcierce płaskiej wolne są metody walcowania, w których narzędzia wykonują ruch obrotowy. Mając ten fakt na uwadze Canda w 1921 roku uzyskuje patent [16] na walcarkę dwuwalcową, w której pomiędzy obracające się w tym samym kierunku walce wprowadzany jest pręt o średnicy mniejszej od średnicy kul. Walce mają wykonane na obwodzie pierścieniowe wykroje, rozdzielone kołnierzami, które wciskając się w materiał powodują uformowanie półwyrobów kul, zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1.9. Do wprowadzenia materiału do strefy kształtowania stosowany jest siłownik hydrauliczny, który przemieszcza rolki naciskające na wsad (pręt).

Rys. 1.9. Progresja kształtu półwyrobów kul, w procesach walcowania poprzecznego, rozwijanych przez Candę [16]

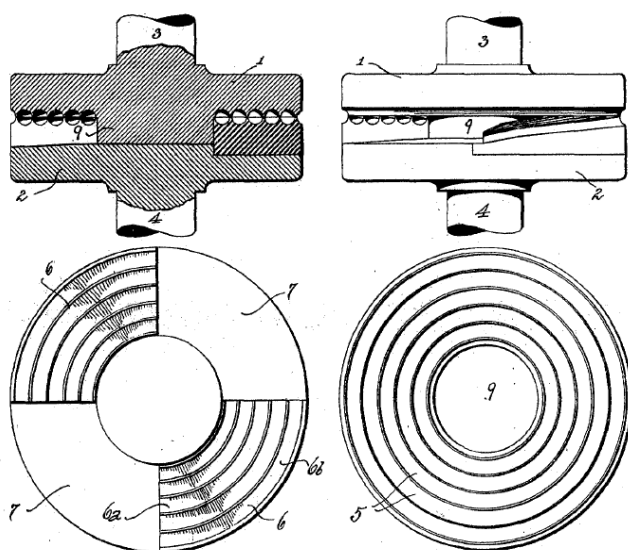


Walcowanie poprzeczne dwoma walcami znalazło największe uznanie u Candy, który szybko uzyskał ochronę autorską na kolejne maszyny pracujące wg tego schematu [11, 13]. Nowością było wprowadzenie dodatkowego ruchu liniowego (w kierunku promieniowym), wykonywanego przez jeden lub dwa walce, w efekcie którego kształtowano kule umieszczone między dwiema prowadnicami rolkowymi. Ponadto, wynalazca opatentował walec składany [18], w którym kołnierze ulegające szybkiemu zużyciu wykonano jako wymienne – rys. 1.10. W ten sposób zwiększono żywotność narzędzi, których elementy newralgiczne mogły być wykonywane z droższych, ale też bardziej wytrzymałych materiałów.



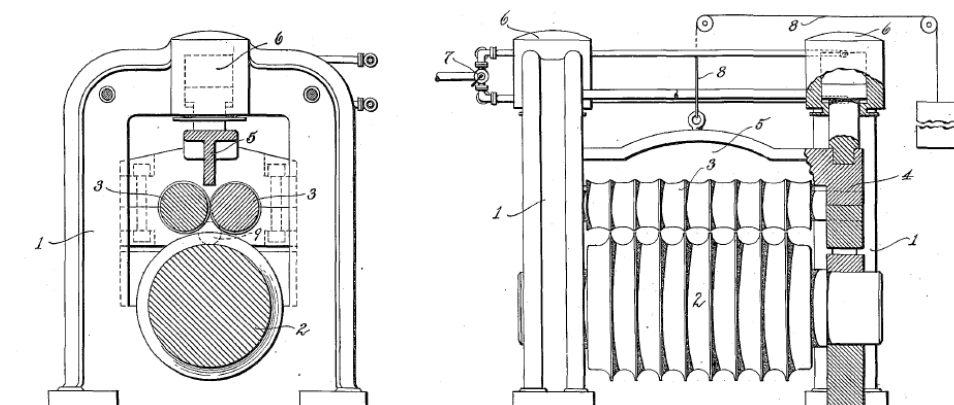
Rys. 1.10. Walec do walcowania kul o segmentowej budowie [18]

W następnym wynalazku [10] Canda proponuje do kształtowania kul zastosować dwie, obracające się przeciwnie, tarcze (rys. 1.11). Na powierzchni roboczej tarczy górnej wykonane są koncentryczne rowki o przekroju półkolistym. Natomiast na tarczy dolnej mocowane są dwie wkładki z podobnymi bruzdami, ale o stopniowo zwiększającej się wysokości. W ten sposób uzyskiwany jest gniot niezbędny do ukształtowania półwyrobów kul. W opisie patentowym wynalazku podkreślony został także nowy obszar wykorzystania kul wytwarzanych proponowaną metodą, które po wykonaniu ich z ołowiu mogą znaleźć zastosowanie, jako szrapnele w pociskach artyleryjskich.



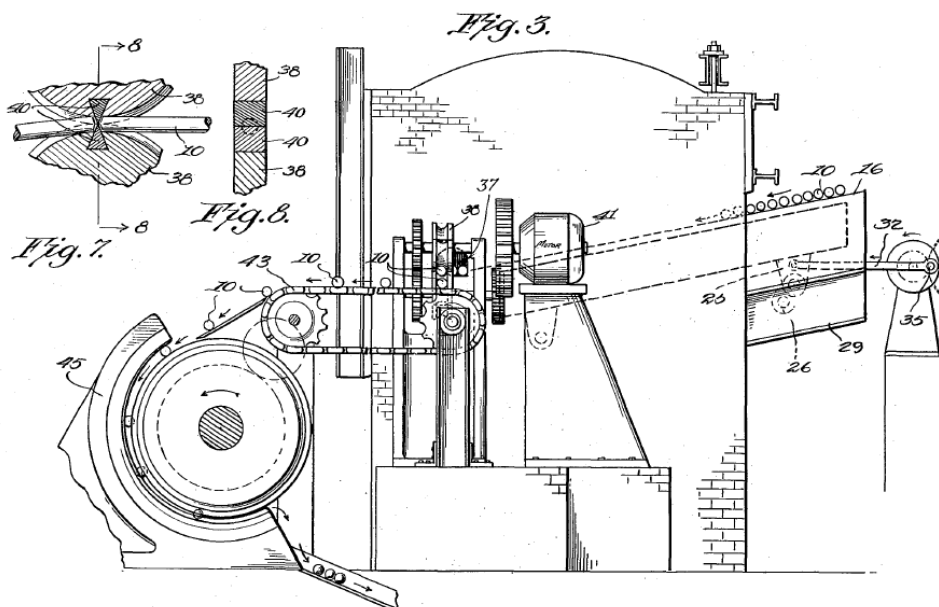
Rys. 1.11. Schemat procesu walcowania poprzecznego dwoma tarczami, opatentowany przez Candę w roku 1921 [10]

Canda jako pierwszy zaproponował także zastosowanie w procesie walcowania poprzecznego kul trzech narzędzi roboczych (rolek) [12]. Zaletą nowego rozwiązania było lepsze prowadzenie materiału w trakcie walcowania. Natomiast wadę stanowiło kształtowanie kul w końcowej fazie procesu tylko przez jedno narzędzie – rolę dolną o dużej średnicy, której kołnierze miały większą wysokość w porównaniu do kołnierzy znajdujących się na rolkach mniejszych. Schemat walcarki zabezpieczającej kształtowanie kul, wg nowego pomysłu wynalazcy, zamieszczono na rys. 1.12.



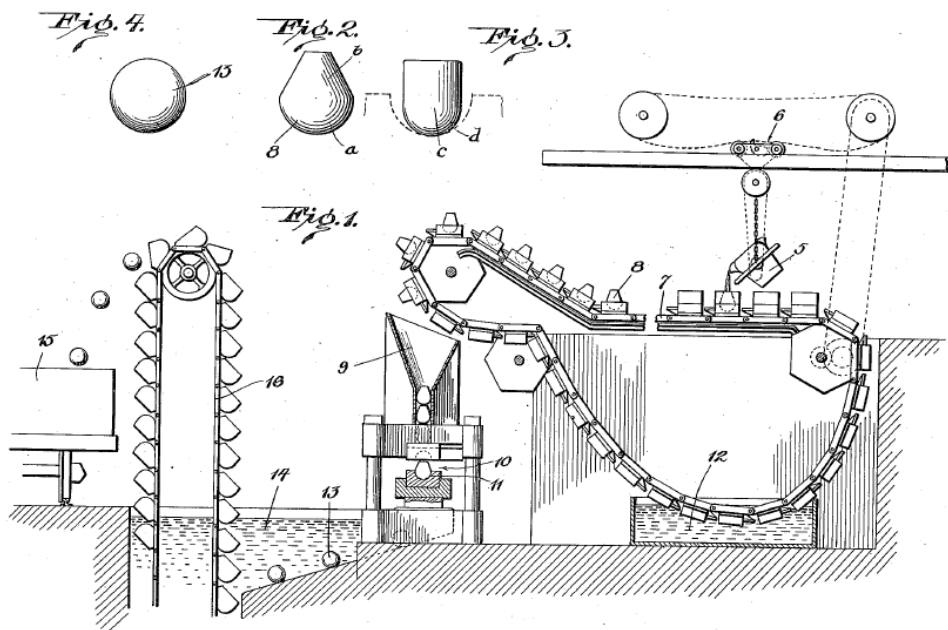
Rys. 1.12. Walcowanie poprzeczne półwyrobów kul, realizowane w walcierce trójwalcowej, opatentowanej przez Candę w 1923 roku [12]

Dążąc do zwiększenia wydajności oraz zmniejszenia produkcji wytwarzania kul Canda opracował proces walcowania ciągłego, na który uzyskał patent w 1925 roku [15]. Linia do kształtowania kul, pokazana na rys. 1.13, obejmowała: piec komorowy służący do nagrzewania prętów okrągłych, walcarkę dwuwalcową z wykrojem kołowym zaopatrzoną w umieszczone na obwodzie noże do cięcia prętów na wsady, walcarkę kul pracującą w układzie napędzany wałec - nieruchomy segment wklęsły oraz zespół podajników i prowadnic.



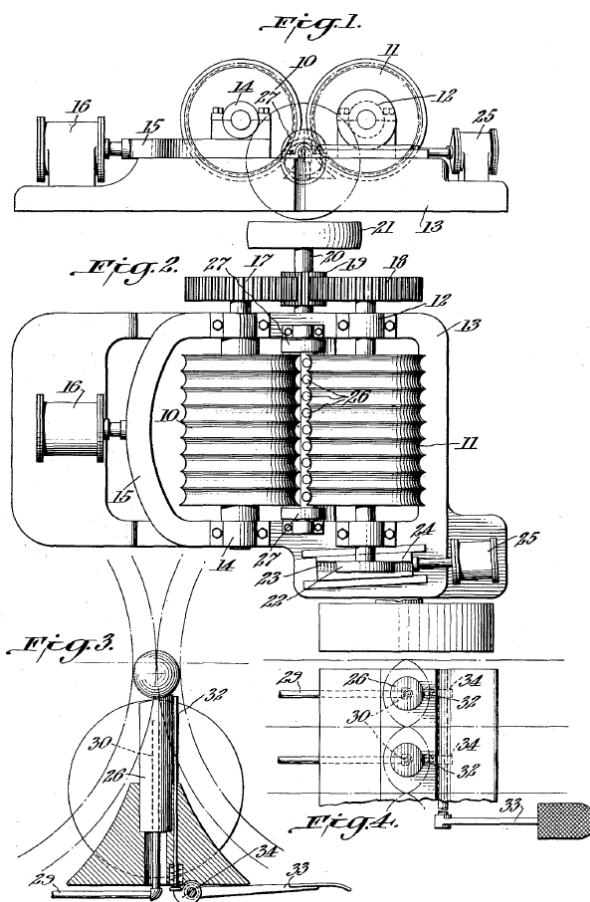
Rys. 1.13. Proces ciągłego wytwarzania półwyrobów kul, opatentowany przez Candę w 1925 roku, bazujący na walcowaniu w układzie wałec-segment wklęsły [15]

Cechą charakterystyczną kul walcowanych poprzecznie w bruzdach półkolistych, a więc metodą rozpowszechnioną przez Candę, była płaskość a nawet wklęsłość powierzchni kul od strony kształtujących je kołnierzy (efekt obracania się kul w trakcie walcowania wyłącznie wokół jednej osi obrotu). Zaczęto zatem poszukiwać nowych sposobów umożliwiających kształtowanie półwyrobów kul wolnych od tej wady. Jednym z pierwszych nowych rozwiązań była metoda kuto-odlewana, opracowana przez Hanks'a [30]. Polegała ona na odlewaniu do wlewnic ciekłego metalu, po zakrzepnięciu którego otrzymywano wlewki o kształcie stożkowym, półsferycznym lub prostopadłościennym, stanowiące wsady do kucia bezwypłytkowego kul na prasie. Wadą procesu, którego schemat pokazano na rys. 1.14, było przede wszystkim ograniczenie produkcji do kul o dużych gabarytach.

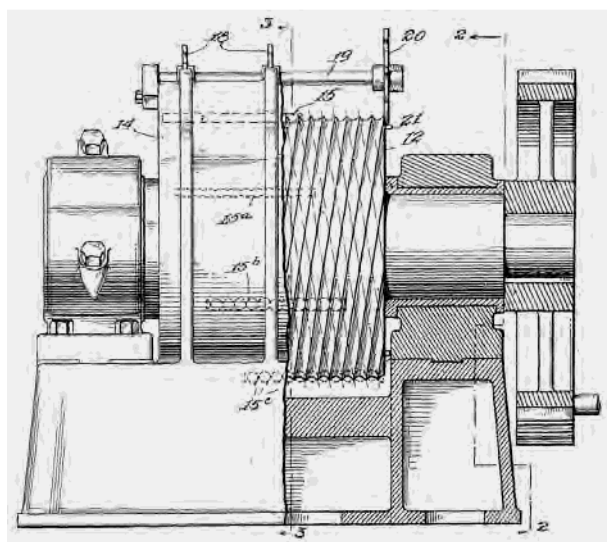


Rys. 1.14. Wytwarzanie kul o dużych gabarytach metodą kuto-odlewą, opatentowaną przez Hanks'a w 1923 roku [30]

Znacznie ciekawsze rozwiązanie zostało opracowane przez Marcy'ego [47]. Bazowało ono na metodzie bruzdowego walcowania poprzecznego, w której jeden z walców uzyskał dodatkowo możliwość oscylacyjnego ruchu w kierunku osiowym. Początkowo proces kształtowania realizowany był podobnie jak w walcarkach Candy, jednak po rozcięciu wsadu na poszczególne części włączano ruch oscylacyjny jednego z walców. W ten sposób w trakcie kształtowania kul (w wykrojach owalnych) uzyskiwano możliwość zmiany osi obrotu, wokół której toczył się półwyrob. Schemat walcarki zabezpieczającej kształtowanie wg nowego pomysłu pokazano na rys. 1.15. Zmianę położenia osiowego walca uzyskiwano w wyniku oddziaływania na jego oś siłownika 25, poprzez prowadnicę ślizgową 24 i tarczę 22.



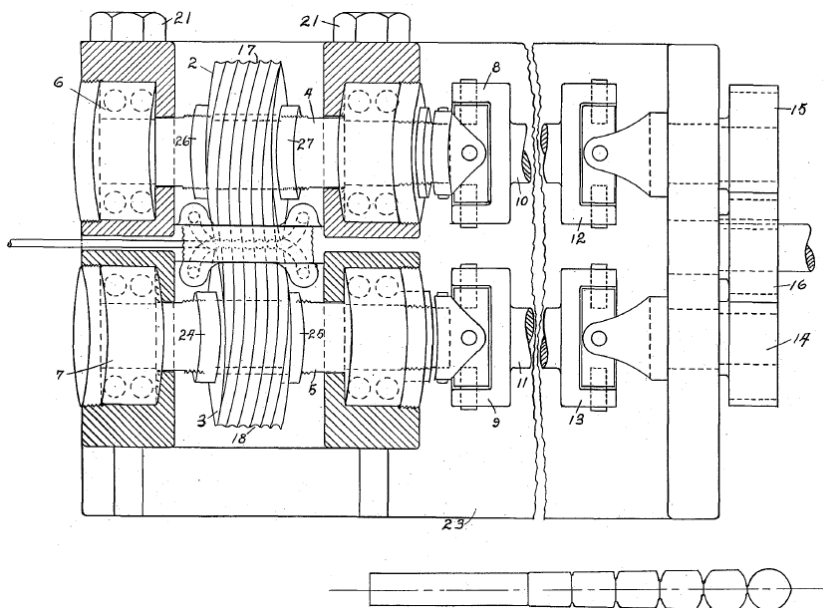
Rys. 1.15. Walcarka opatentowana przez Marcy'ego w 1925 roku. W maszynie tej zastosowano mechanizm umożliwiający wprowadzenie oscylacyjnego ruchu poosiowego wałców, celem wymuszenia zmiany osi obrotu kształtowanej kuli [47]



Rys. 1.16. Walcarka do kształtowania kul, opatentowana przez Abeela Candę w 1926 roku. Zmianę kierunku obrotu kul wymuszono przez skrócenie bruzd kształtujących kule [9]

Inny sposób wymuszenia zmiany kierunku ruchu obrotowego kształtowanej kuli został opracowany przez Abeela Candę [9]. Wynalazca ten zmodyfikował znaną metodę wytwarzania kul w układzie walec - segment wklęsły, nacinając na narzędziach bruzdy w sposób śrubowy. Przy tym kierunek nacięcia rowków był przeciwny na obu narzędziach, przy zachowaniu wartości skoku. Takie rozwiązanie powodowało, że kule przemieszczały się podczas walcowania śrubowo. Schemat walcarki zabezpieczającej kształtowanie półwyrobów kul przedstawiono na rys. 1.16.

W roku 1928 Hodge jako pierwszy zaproponował walcowanie kul dwoma walcami, mającymi wykroje śrubowe, których osie były skrócone względem siebie [33]. Dla utrzymania wsadu we właściwej pozycji podczas walcowania zastosowano prowadnice liniowe. Ustawienie skośne walców powodowało, że wsad w trakcie walcowania był wprowadzany do strefy kształtowania w sposób samoistny. Schemat walcarki skośnej opracowanej przez Hodge'a pokazano na rys. 1.17, na którym dodatkowo zilustrowano zmiany kształtu półwyrobu w trakcie walcowania.

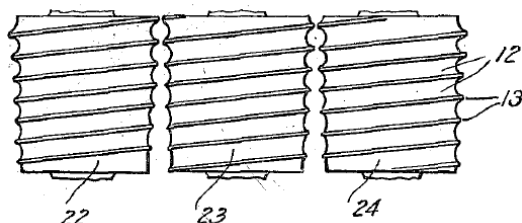


Rys. 1.17. Walcarka śrubowa z walcami skośnymi, opatentowana przez Hodge'a w 1928 roku, oraz progresja kształtu półwyrobu w trakcie walcowania [33]

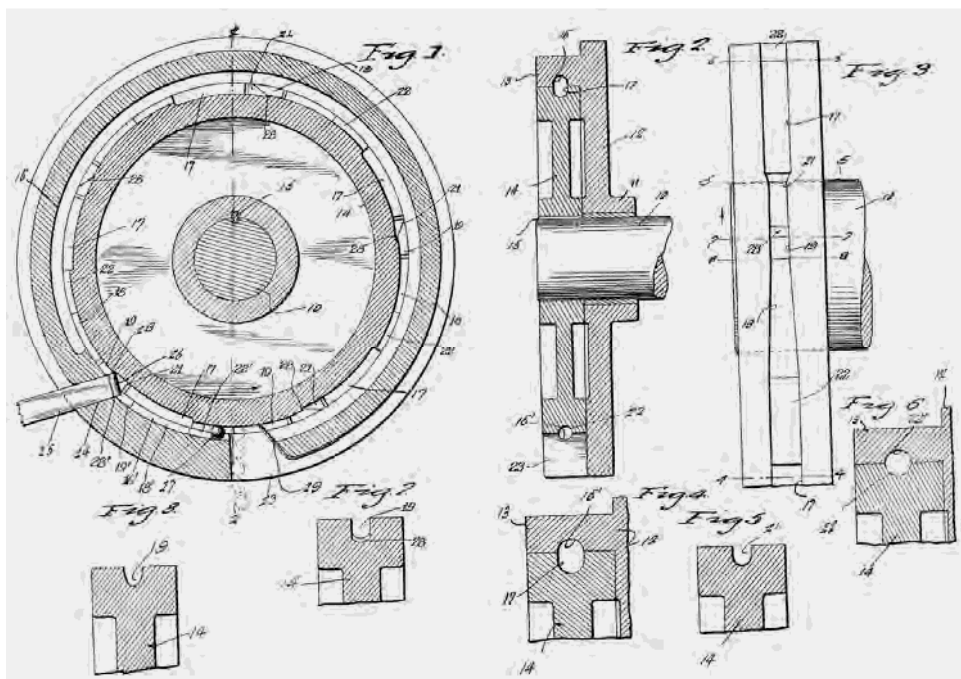
Dalsze modyfikacje procesu walcowania śrubowego zawdzięczamy Kanadyjczykowi Munro. Był on prekursorem użycia walców stożkowych (z bruzdami naciętymi śrubowo), celem zintensyfikowania zgniatania materiału [48]. Ponadto, wynalazca ten jako pierwszy, dla zwiększenia wydajności walcowania, zaproponował stosowanie walców śrubowych wielozwojnych, lub równocześnie wykorzystanie trzech walców - w sposób pokazany na rys. 1.18. Kolejny patent [49] uzyskany przez Munro w roku 1930 dotyczył walcarki, o równolegle ustawionych walcach, na obwodzie których wykonano śrubowe bruzdy (o zmiennym skoku). Jedną z nowości, zaproponowaną w tym patencie, była

propozycja wykorzystania jako wsadów do walcowania złomowanych szyn kolejowych, które przed kształtowaniem powinny być sprasowane, celem uzyskania kształtu zbliżonego do pręta okrągłego.

Rys. 1.18. Koncepcja kształtowania półwyrobów kul za pomocą trzech walców śrubowych, ustawionych równolegle (walcowanie prowadzono z dwóch prętów) [48]



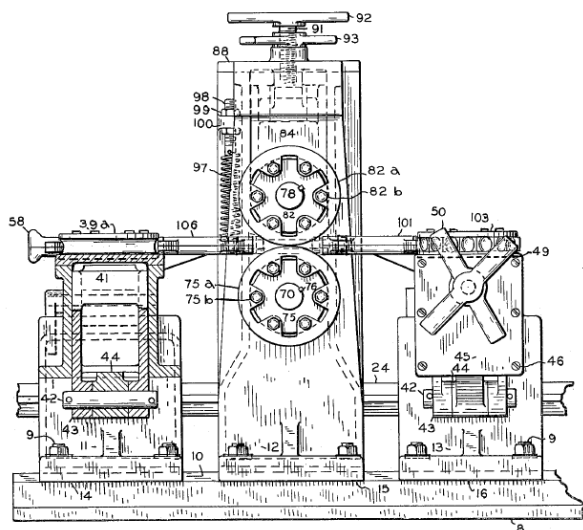
Przed drugą wojną światową powstała także koncepcja kształtowania pojedynczych kul z odcinków prętów, w wyniku ich obtaczania przez wykrój (o zmiennym przekroju poprzecznym), tworzony na ogół przez tarczę (rolkę) i segment wklęsły (pierścien). Patenty na takie rozwiązanie uzyskali m.in. Brenholtz [7] oraz Coates [20, 21]. Schemat jednego z tych procesów, wyjaśniający zasadę kształtowania kuli, pokazano na rys. 1.19.



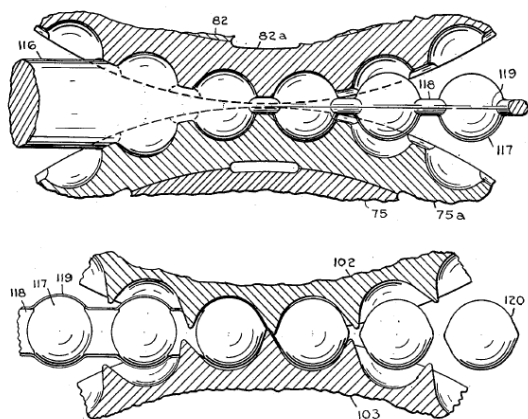
Rys. 1.19. Kształtowanie pojedynczej kuli z odcinka walcowego pręta, wg koncepcji opracowanej przez Brenholtza (1934 r.) [7]

Nowy sposób produkcji kul, bazujący na walcowaniu wzdłużnym, został opatentowany przez Brand'ta w 1942 roku [6]. W procesie tym wykorzystano walcarkę (rys. 1.20) mającą trzy pary walców poruszających się w tym samym kierunku, ale z różną prędkością obrotową. Pierwsza para walców służyła do zgniatania wsadu (pręta okrąg-

głego), celem uzyskania półwyrobu o przekroju poprzecznym owalnym. Druga para narzędzi (skręcona do dwóch pozostałych par o kąt 90°) kształtowała kule, które połączone były mostkami o zarysie owalnym. Natomiast zdaniem ostatniej pary walców było rozdzielenie ukształtowanych półwyrobów kul. Schemat przebiegu procesu walcowania, wg koncepcji Brandta, w klatkach drugiej i trzeciej przedstawiono na kolejnym rys. 1.21.

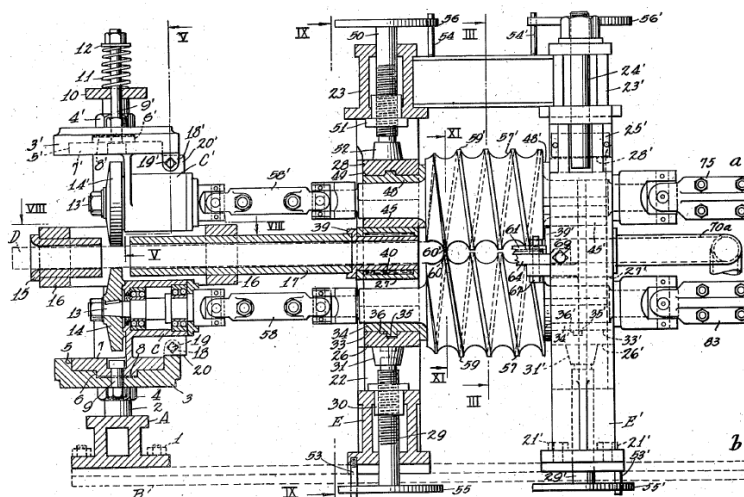


Rys. 1.20. Walcarka wzdłużna do walcowania półwyrobów kul (kształtowanych trzema parami walców), opatentowana przez Brandta w 1942 roku [6]



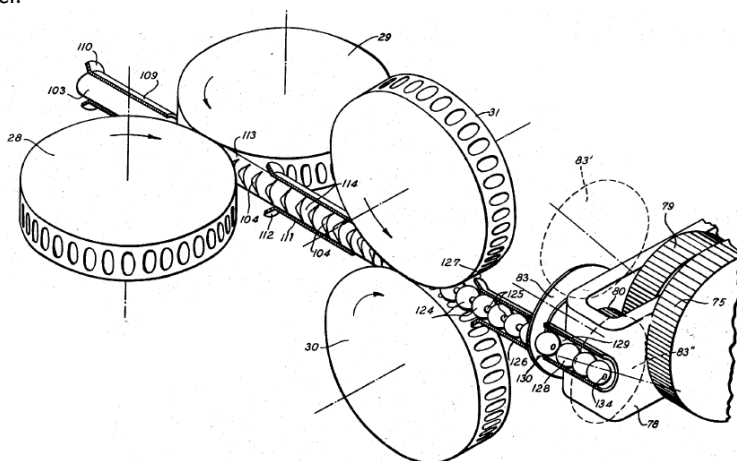
Rys. 1.21. Przebieg kształtowania półwyrobów kul, odpowiednio w drugiej (rys. górny) i trzeciej (rys. dolny) parze walców – realizowany wg koncepcji Brandta [6]

W 1946 roku Wells otrzymał patent [114] na walcarkę wyposażoną w dwa ustawione równolegle wałce śrubowe (rys. 1.22). Nowością w stosunku do dotychczas stosowanych rozwiązań było wyposażenie maszyny w dodatkową parę rolek, ustawionych skośnie w stosunku do osi pręta. Narzędzia te spełniały dwa zadania. Po pierwsze kalibrowały pręt wsadowy na średnicę wymaganą do ukształtowania kul. Po drugie wprawiały wsad w ruch śrubowy i podawały go między wałce śrubowe kształtujące kule. Prędkość przesuwu osiowego pręta regulowano kątem skreślenia rolek.



Rys. 1.22. Walcarka śrubowa, opatentowana przez Wells'a [114], wyposażona w specjalny dwu-rolkowy podajnik do wprowadzania prętów wsadowych

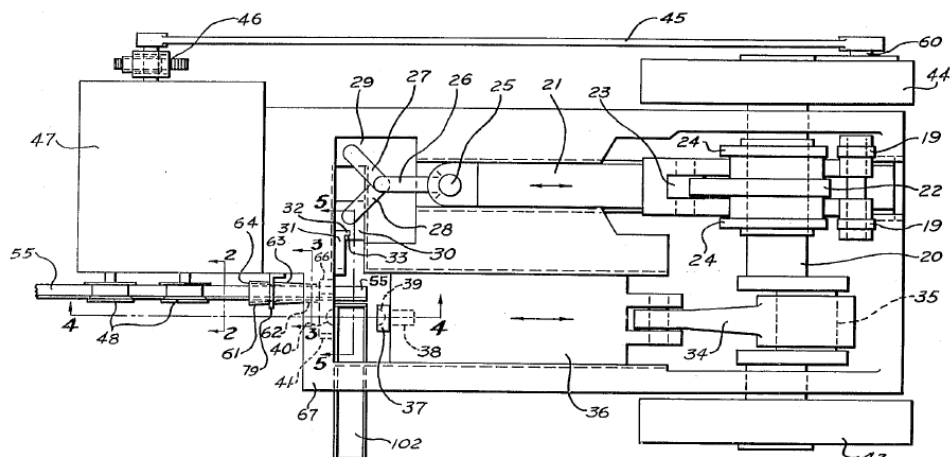
Bazując na pomysł Brandta inny Amerykanin Gronemeyer opracowuje automat do kształtowania kul i otrzymuje na nią patent w 1948 roku [29]. Zasada pracy maszyny polega (rys. 1.23) na odwalcowaniu w dwóch kłatkach kul połączonych ze sobą mostkami cylindrycznymi. Rozcinanie kul realizowane było za pomocą szybkoobrotowej tarczy ścierniej, która zeszlifowywała mostek. Kształtowane półwyroby przesuwane były w trakcie procesu w prowadnicy rurowej. Gronemeyer zaproponował także stosowanie narzędzi kształtujących (walców) o budowie segmentowej, w celu przedłużenia ich żywotności.



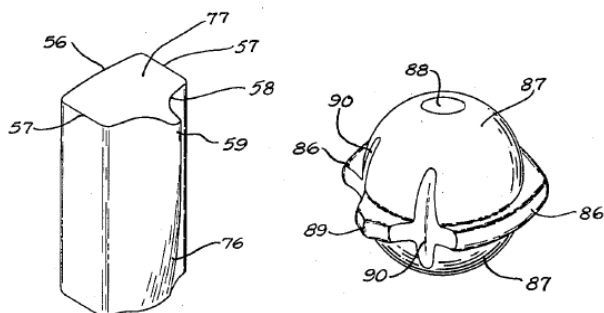
Rys. 1.23. Przebieg procesu walcowania kul, w automacie opracowanym przez Gronemeyer'a, który został opatentowany w 1957 roku [29]

W roku 1960 Gray uzyskuje patent [28] na prasę specjalistyczną, służącą do produkcji kul na mielniki z główek złomowanych szyn. Maszyna (rys. 1.24) miała napęd korbowy,

a kucie kuli przebiegało w dwóch operacjach. Najpierw odcinany był na żadaną długość odcinek główki szyny, który następnie przekuwany był wypływkowo na kulę. Niestety uzyskana w ten sposób odkuwka kuli miała (ze względu na nierównomierne zużycie główki oraz złożony kształt jej przekroju poprzecznego) w jednych miejscach niewypełnienia, a w innych dość znaczną wypływkę – rys. 1.25. Dla polepszenia kształtu półwyrobu kuli Gray zaproponował przetaczanie odkuwki przez wykrój (o przekroju kołowym), utworzony przez tarczę oraz zespół segmentów wklęsłych, rozłożonych na jej obwodzie.

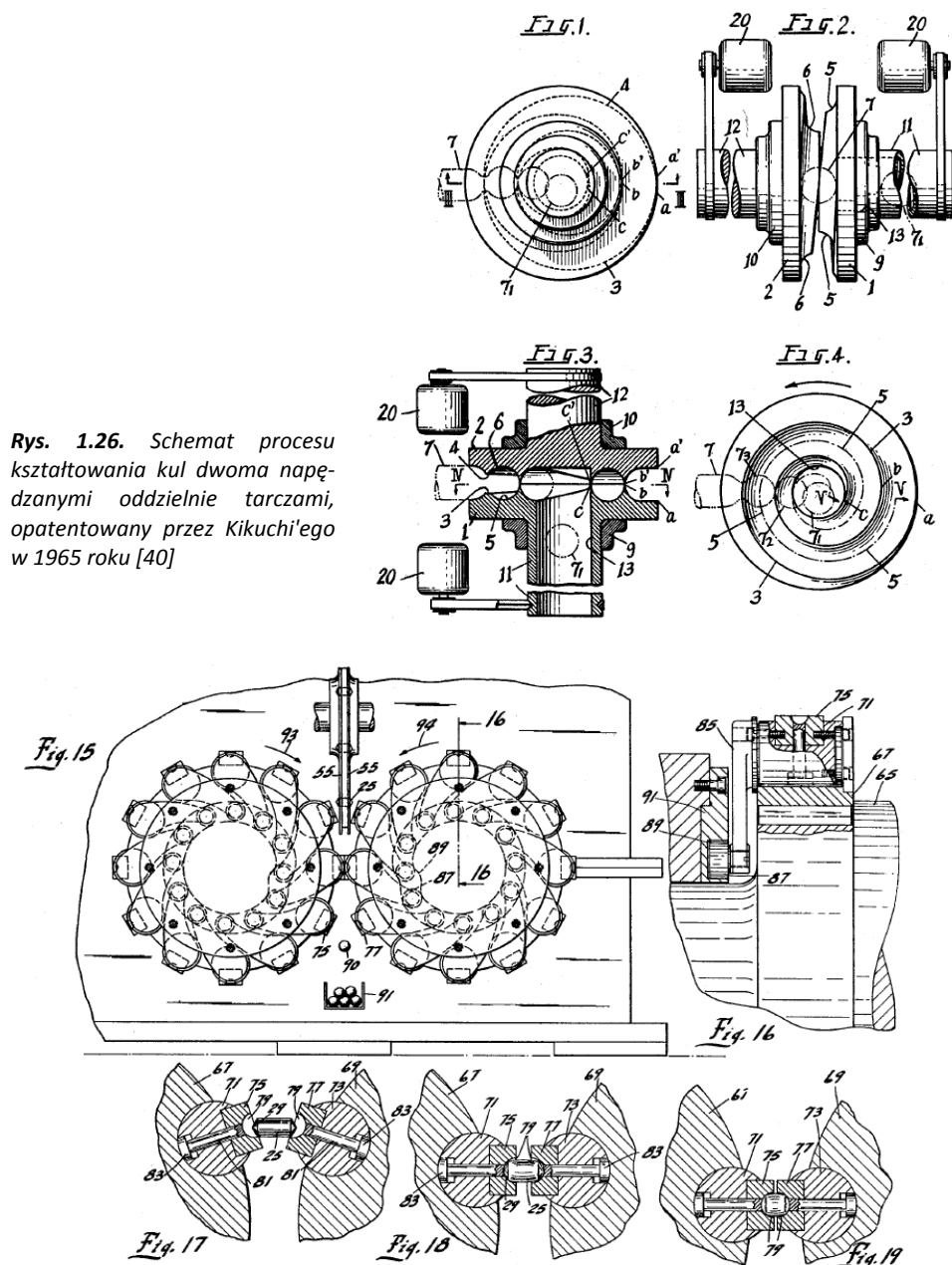


Rys. 1.24. Prasa specjalna do kształtowania odkuwek kul z główek otrzymanych ze złomowanych szyn kolejowych, opatentowana przez Gray'a w 1960 roku [28]



Rys. 1.25. Przykład odkuwki kuli (po prawej) otrzymanej z odcinka główki złomowanej szyny kolejowej (po lewej), wg Gray'a [28]

Ciekawa metoda kształtowania kul została zaproponowana w 1965 roku przez wynalazcę japońskiego Kikuchi'ego [40]. Polegała ona na wykorzystaniu dwóch tarcz mających kołnierze spiralne, które obracały się w stronę przeciwną. Wysokość kołnierzy była zmienna i zwiększała się wraz ze zbliżaniem się do osi tarczy. W ten sposób uzyskiwano gniot niezbędny do ukształtowania półwyrobów kul, które po odwalcowaniu odprowadzane były z przestrzeni roboczej maszyny przez otwór wykonany w wale tarczy dolnej (rys. 1.26).



Rys. 1.26. Schemat procesu kształtowania kul dwoma napędzanymi oddzielnie tarczami, opatentowany przez Kikuchi'ego w 1965 roku [40]

Rys. 1.27. Kształtowanie kul metodą opracowaną przez Baumgartnera i in. [3]

Kolejna koncepcja kucia kul zaproponowana została przez Baumgartnera i in. [3]. Polegała ona na kuciu bezwyływkowym za pomocą wkładek umieszczonych na walcach i mocowanych w oprawach cylindrycznych - rys. 1.27. Zbliżające się do siebie wkładki

spęcały wsad w postaci odcinka pręta z zakończeniami stożkowymi, który był uzyskiwany za pomocą cięcia, realizowanego metodą walcowania wzdłużnego. Wykonane w ten sposób półwyroby nie miały kształtu idealnie kulistego, co nie przeszkadzało w ich wykorzystaniu na mielniki. Zaletą metody była bardzo duża wydajność.

W późniejszym okresie skoncentrowano się na doskonaleniu dotychczas opracowanych metod. Rozwijano również konstrukcje stosowanych maszyn i urządzeń oraz automatyzowano procesy wytwarzania kul.

W Polsce kule są produkowane głównie przez odlewanie i kucie matrycowe. W przypadku wykonywania kul stosowanych na mielniki do młynów ich dokładność nie musi być wysoka (tab. 1.1). Pozwala to na poszukiwanie nowych, innowacyjnych metod wytwarzania półwyrobów kul, w tym z taniego materiału wsadowego, jakim jest stal pochodząca ze złomowanych szyn kolejowych.

Tab. 1.1. Wymiary i dopuszczalne odchyłki wymiarowe kul, w zależności od technologii wykonania [103]

Średnice kul, mm	Technologia wykonania kul	Dopuszczalna wielkość ¹⁾ , mm		
		odchyłki wymiarów	pozostałość wypływki	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 wypływki i przesadzenia nie mogą występować jednocześnie				

W Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej od ponad 20 lat realizowane są prace badawcze w zakresie walcowania poprzeczno-klinowego (WPK), których rezultaty przedstawiono w szeregu monografii naukowych [55, 77, 91, 105]. W ostatnim okresie w jednostce tej korzystając z wiedzy na temat procesu WPK realizowano projekt rozwoju p.t.: „Opracowanie nowej technologii walcowania kul stalowych ze złomowanych szyn kolejowych”. Ważniejsze wyniki z tych prac, w zakresie walcowania poprzecznego i poprzeczno-klinowego kul zebrano w niniejszym opracowaniu.

Kończąc wprowadzenie autorzy chcieliby złożyć wyrazy podziękowania szeregowi osób, które przyczyniły się do wykonania prac badawczych w zakresie walcowania kul. W szczególności uznanie należy się mgr inż. Janowi Brożkowi z Górniczej Fabryki Narzędzi w Radzynie Podlaskim, który zdecydował się na przetestowanie opracowanej metody walcowania kul w warunkach przemysłowych. Podziękowania należą się także pracownikom Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, którzy czynnie uczestniczyli w pracach badawczych. Osobne wyrazy wdzięczności kierowane są do recenzenta monografii - dr hab. inż. Andrzeja Gontarza, prof. PL, którego uwagi i spostrzeżenia wpłynęły na ostateczną postać opracowania.

2. Rozwój teorii i technologii WPK

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

Na rysunku 2.1 przedstawiającym schemat WPK wałka elementarnego (mającego pojedyncze, centralne przewężenie) zaznaczono podstawowe parametry geometryczne procesu. Należą do nich: kąt kształtujący α , kąt rozwarcia klina β , średnica wsadu d_0 , średnica kształtowanego stopnia wałka d oraz długość odcinka walcowanego l . W narzędziach wykorzystywanych do WPK wyróżnia się następujące podstawowe strefy: wcinania, kształtowania i kalibrowania. W strefie wcinania klin stopniowo zagłębia się w materiał na głębokość Δr , redukując średnicę wsadu do zakładanej wartości d . W strefie kształtowania, w wyniku oddziaływania bocznych ścian klina, następuje spiralne rozwinięcie redukcji na całą długość l walcowanego stopnia odkuwki. Natomiast w strefie kalibrowania odkuwka poddawana jest obciskaniu obrotowemu, w czasie którego usuwane są powstałe w poprzednich fazach procesu nieprawidłowości kształtu.

Za podstawowe miary przerobu plastycznego materiału w procesie WPK uznaje się:

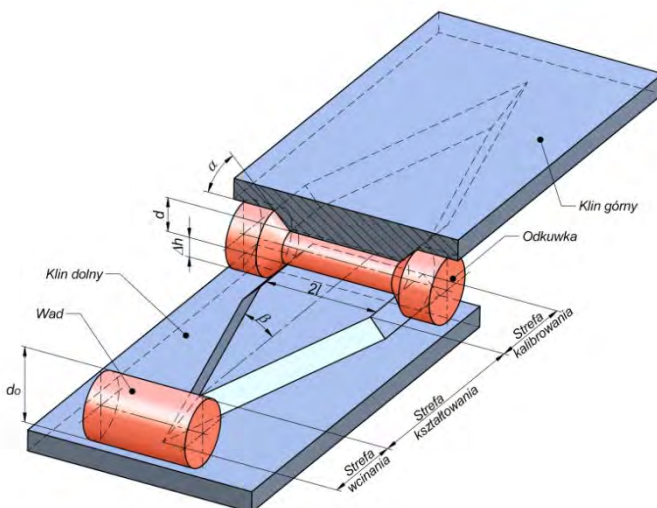
- stopień gniotu δ , definiowany jako

$$\delta = d_0/d, \quad (2.1)$$

- redukcję R_p przekroju poprzecznego równą

$$R_p = 100\% (S_0 - S)/S_0, \quad (2.2)$$

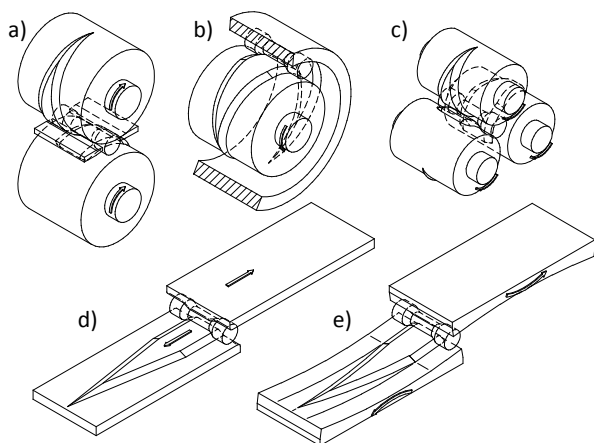
gdzie: d_0 – średnica wsadu, d – średnica walcowanego stopnia odkuwki, S_0 – pole przekroju poprzecznego wsadu, S – pole przekroju poprzecznego walcowanego stopnia.



Rys. 2.1. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego, realizowanego dwoma narzędziami płaskimi

Proces WPK rozwinął się dopiero po drugiej wojnie światowej. Za datę pierwszego w pełni przemysłowego zastosowania technologii WPK przyjmowany jest rok 1949, w którym pod kierunkiem Balina w Fabryce Samochodów w Gorki (obecnie Rosja) wdrożono tę metodę do kształtowania przedkuwek korbowodów. W latach 60-tych, 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku wykonano wiele prac badawczo-rozwojowych w zakresie WPK. W efekcie tych prac opracowano kilka metod walcowania, pokazanych na rysunku 2.2, oraz maszyny zabezpieczające ich realizację. Wówczas zaczęto szeroko stosować technologię WPK do wytwarzania ze stali części maszyn typu stopniowanych osi i wałków oraz przedkuwek do kucia matrycowego wyrobów, takich jak: klucze maszynowe, korbowody, dźwignie, widełki, korby pedałów rowerowych. Wyczerpujący opis rozwoju teorii, technologii i maszyn do WPK jaki miał miejsce do roku 1992 przedstawili w obszernym opracowaniu [27] Fu i Dean.

W bieżącym rozdziale zestawiono ważniejsze wyniki prac badawczych, odnoszących się do procesu WPK, które zostały wykonane w ciągu ostatnich dwudziestu lat.



Rys. 2.2. Schematy procesów WPK realizowanych w układzie: a) dwóch walców, b) wałek – segment wklęsły, c) trzech walców, d) klinów płaskich, e) klinów wklęsłych

2.1. Teoria

2.1.1. Analiza inżynierska

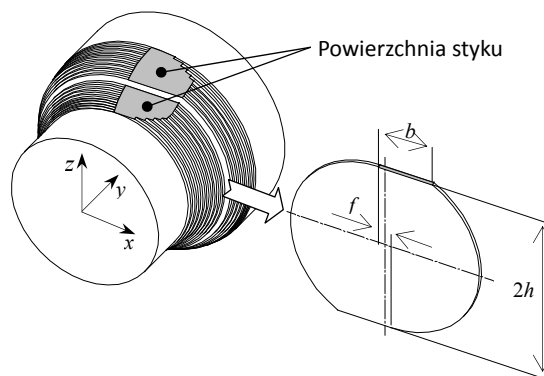
Ze względu na złożoność procesu WPK jego analiza teoretyczna jest utrudniona. Z tego też powodu pierwsze rozwiązania teoretyczne dotyczące tej metody kształtowania bazowały na licznych uproszczeniach, z których najczęściej stosowane było zakładanie warunków płaskiego, bądź osiowo-symetrycznego stanu odkształcenia. Tego typu postępowanie stosowane było jeszcze w pierwszej połowie lat 90-tych XX wieku, kiedy to opracowano zależności uproszczone pozwalające na obliczenie: pola powierzchni kontaktu materiał-narzędzie [2], średniego nacisku powierzchniowego [3], zwiększenia średnicy wyrobów kształtowanych [4], oraz ograniczeń (w postaci niekontrolowanego poślizgu, przewężenia rdzenia i pęknięcia wewnętrznego materiału) stabilności przebiegu procesu WPK [5 – 8]. W analizach tych wykorzystywano zależności

geometryczne opisujące strefę odkształcenia oraz metody analizy inżynierskiej, takie jak: energetyczna, równań różniczkowych równowagi, linii poślizgów i charakterystyk, górnej oceny. Obecnie ten sposób analizy procesu WPK, w związku z rozwojem metod komputerowych, stracił na znaczeniu.

2.1.2. Metoda warstwowa

W analizie procesu WPK można wykorzystać metodę modelowania warstwowego, która została opracowana przez Patera [72, 76, 78, 87]. Bazuje ona na podobieństwie przemieszczania się materiału w przekrojach poprzecznych wyrobów kształtowanych metodą WPK i obrotowo obciskanych. Korzystając z tego podobieństwa przyjęto, że strefę odkształcenia w dowolnym procesie WPK można modelować w postaci wzajemnie przylegających do siebie warstw – rys. 2.3. Główne założenia, na których oparto konstrukcję rozwiązania są następujące:

- strefa odkształcenia modelowana jest warstwowo;
- nacisk powierzchniowy w dowolnie wybranej warstwie strefy odkształcenia można symulować analizując proces obrotowego obciskania pręta, w warunkach płaskiego stanu odkształcenia;
- kształtowany materiał zachowuje się jak materiał sztywno-plastyczny ze wzmocnieniem;
- w obliczeniach nie uwzględnia się sił masowych oraz sił tarcia pochodzących od listew lub rolek prowadzących;
- czynnik tarcia jest stały na bocznej i kalibrującej powierzchni kontaktu materiał – narzędzie.

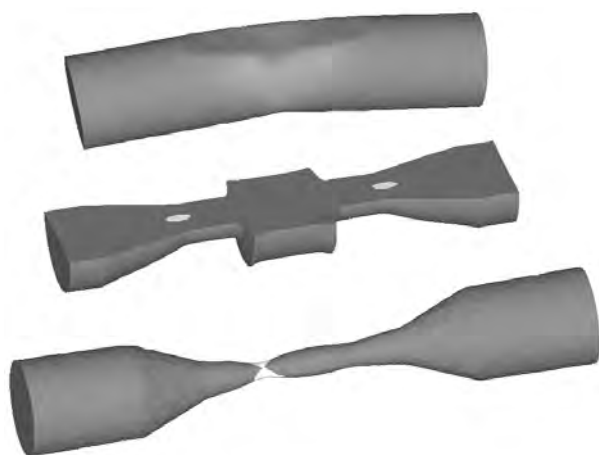


Rys. 2.3. Model warstwowy strefy odkształcenia w procesie WPK, wprowadzony przez Patera

Metoda modelowania warstwowego pozwala na obliczenie podstawowych parametrów siłowych na każdym etapie procesu WPK. Może być również zastosowana do przewidywania czy stabilność walcowania zostanie naruszona z powodu wystąpienia zjawiska niekontrolowanego poślizgu lub przewężenia rdzenia. Korzystając z metody modelowania warstwowego możliwe stało się także przeprowadzenie optymalizacji wielokryterialnej podstawowych parametrów procesu WPK [89].

2.1.3. Metoda elementów skończonych (MES)

Proces WPK ze względu na swoją złożoność może być modelowany wyłącznie w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D). Dodatkowe trudności związane z przeprowadzeniem obliczeń wynikają z: dużego skoku narzędzi (wielokrotnie przekraczającego gabaryty wyrobu kształtowanego), skomplikowanego kształtu wyrobu walcowanego oraz charakteru kontaktu (poślizgi) między materiałem kształtowanym a narzędziami. Wymienione czynniki spowodowały, że proces WPK został skutecznie zamodelowany metodą elementów skończonych stosunkowo późno, dopiero pod koniec XX wieku. Do chwili obecnej odnotowanych zostało szereg rozwiązań, w których modelowano proces WPK korzystając z następujących programów komercyjnych: Ansys/LS-DYNA [19, 22 - 25, 42, 44, 46, 109, 110, 118], DEFORM-3D [26, 45, 111 - 113, 116], Forge3 [93], MSC.SuperForm i MARC.AutoForge [30-39]. Większość z wykonanych analiz zogniskowana była na modelowaniu ograniczeń stabilnego przebiegu procesu WPK powstających w efekcie wystąpienia niekontrolowanego poślizgu, przewężenia rdzenia i pęknięcia materiału – rys. 2.4. Zestawienie wpływu ważniejszych parametrów kształtowania na możliwość wystąpienia wymienionych ograniczeń podano w tabeli 2.1. Ponadto stosując MES analizowano w wyrobie walcowanym poprzeczno-klinowo: rozkład temperatury [95, 111], mikrostrukturę [112, 116], stan naprężenia [24, 26, 53, 85] i stan odkształcenia [35, 37].

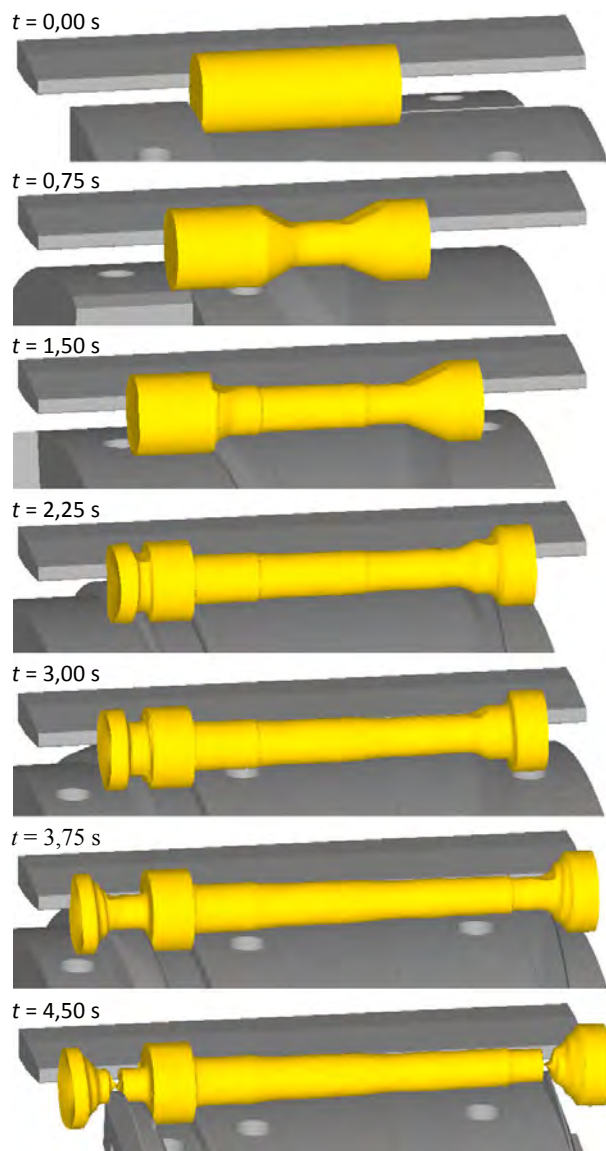


Rys. 2.4. Obliczone MES zniekształcenia wyrobów walcowanych, powstające w efekcie wystąpienia (kolejno od góry): niekontrolowanego poślizgu, pęknięcia wewnętrznego materiału, przewężenia rdzenia

Tab. 2.1. Wpływ ważniejszych parametrów procesu WPK na możliwość wystąpienia ograniczeń kształtowania [73]

Parametr procesu WPK	Niekontrolowany poślizg	Przewężenie (zerwanie) rdzenia	Utworzenie pęknięcia
$\uparrow \alpha$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
$\uparrow \beta$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
$\uparrow \delta$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$

gdzie: $\uparrow$ - wzrost, $\downarrow$ - zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia ograniczenia



Rys. 2.5. Obliczona MES progresja kształtu wałka pośredniego w trakcie procesu WPK, w zależności od czasu t

Obecnie korzystając z MES można modelować na komputerach osobistych nawet stosunkowo złożone przypadki procesów WPK. Przykładem w tym zakresie może być proces walcowania wałka pośredniego, wdrożony w jednym z zakładów przemysłowych w Polsce, który zamodelowano w programie DEFORM-3D. Realizowany jest on w walcierce ULS70, wyposażonej w walce o średnicy 700 mm. W procesie tym skrajne stopnie wałka kształtowane są przy stopniach gniołu $\delta = 2,45$, nieosiągalnych przy jednym przejściu klina. Dlatego też przyjęto, że proces walcowania przebiegać będzie w dwóch operacjach. Na rys. 2.5 przedstawiono obliczony MES przebieg procesu walcowania analizowanego wałka pośredniego. Ze względu na kształt wyrobu koniecznym było zastoso-

wanie schematu walcowania z odcinaniem odpadów końcowych z ukształtowanymi w nich lejami czołowymi. Odpady te z powodu na położenie na końcach odkuwki oraz wielkość średnicy (równej średnicy wsadu) spełniają w trakcie walcowania również rolę stabilizacyjną, zabezpieczając wyrób przed przekoszeniem. Na kolejnym rysunku 2.6 pokazano wałek pośredni otrzymany w próbach przemysłowych walcowania.

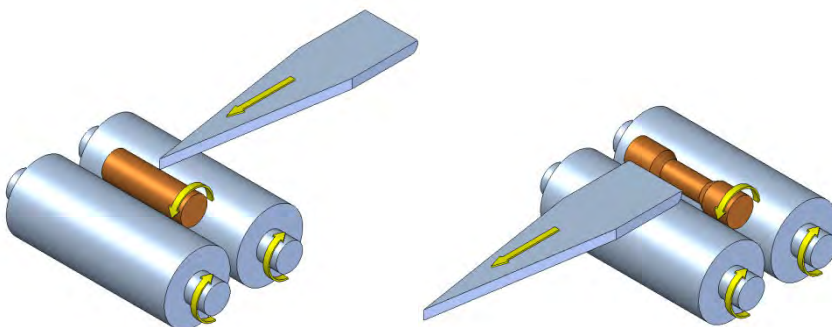


Rys. 2.6. Wałek pośredni (wraz z odpadami końcowymi) odwalcowany metodą WPK w walcarni dwuwalcowej o średnicy walców $\varnothing 700$ mm

2.2. Technologia

2.2.1. Nowe metody walcowania

W Politechnice Lubelskiej w ostatnim dziesięcioleciu opracowano nową odmianę WPK, którą nazwano walcowaniem klinowo-rolkowym (WKR). Polega ona na kształtowaniu wyrobów typu osiowo-symetrycznych wałków przy użyciu tylko jednego narzędzia klinowego oraz dwóch rolek, których głównym zadaniem jest utrzymanie wyrobu we właściwej pozycji w trakcie walcowania – rys. 2.7. W porównaniu do dotychczas stosowanych metod WPK walcowanie klinowo-rolkowe odznacza się szeregiem zalet, z których najważniejsze to: mniejsza skłonność do tworzenia pęknięć wewnętrznych w wyrobie walcowanym, niższe koszty wdrożeniowe, ułatwione usuwanie zgorzeliny. Na podstawie wykonanych prac badawczych [56, 77] stwierdzono, że proces WKR może być z powodzeniem stosowany do wytwarzania części osiowo-symetrycznych (np. przedkuwek), w szczególności drążonych o grubości ścianki wynoszącej do $0,2 d_0$ – rys. 2.8.



Rys. 2.7. Schemat procesu walcowania klinowo-rolkowego (WKR)

Inną metodą bazującą na procesie WPK, opracowaną w ostatnim okresie jest proces walcowania wgłębnego [41], w którym rolki obracające się wokół własnej osi przemieszczają się dodatkowo w kierunku promieniowym i osiowym wyrobu walcowanego. W ten sposób możliwe staje się kształtowanie stopniowanych wałków i osi przy użyciu narzędzi o stosunkowo prostej geometrii.

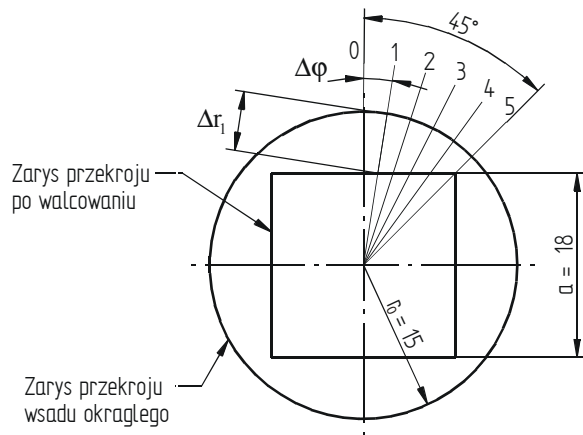


Rys. 2.8. Przykłady półwyrobów stalowych otrzymanych w próbach kształtowania metodą WKR

2.2.2. Walcowanie wyrobów niesymetrycznych osiowo

Bardzo często wyroby wydłużone mają stopnie o przekroju poprzecznym różnym od kołowego (kwadratowe, owalne, sześciokątne itd.). Takie stopnie można walcować stosując kliny mające odpowiednio sprofilowane powierzchnie kształtujące. Na rysunku 2.9 pokazano zarys przekroju poprzecznego stopnia odkuwki (o boku $a=18$ mm), który jest otrzymywany w procesie WPK z wsadu o średnicy $\varnothing 30$ mm. Ze względu na podwójną symetrię zarysu w analizowanym przypadku wystarczy wyznaczyć profil narzędzia zapewniający wykonanie przez odkuwkę $1/8$ obrotu, czyli o kąt $\varphi=45^\circ$. Kąt ten dzieli się na n równych części, następnie określa się wartość gniotu bezwzględnego Δr_i w płaszczyznach wzdłużnych określonych kolejnymi liniami $i = 0, 1, 2, \dots$. W analizowanym przykładzie jest to

$$\Delta r_i = r_0 - \frac{a}{2 \cdot \cos(i \cdot \Delta \varphi)} \quad (2.3)$$

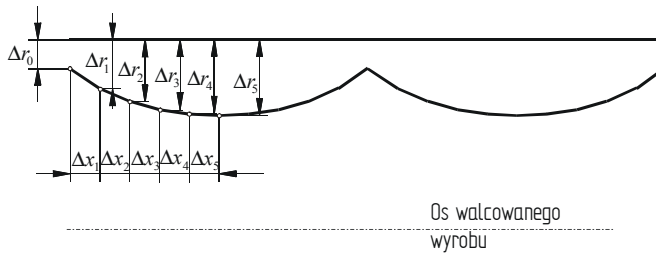


Rys. 2.9. Schemat ilustrujący sposób wyznaczania gniotu bezwzględnego Δr_i w procesie WPK części o przekroju poprzecznym różnym od kołowego (w kształcie kwadratu)

O wyliczoną wartość Δr_i obniża się powierzchnię kalibrującą narzędzia (w sposób pokazany na rys. 2.10) przyjmując jednocześnie, że odległość Δx_i (określająca przemieszczenie klina w trakcie wykonywania przez odkuwkę obrotu o kąt $\Delta \varphi$) może być obliczona na podstawie następującej zależności:

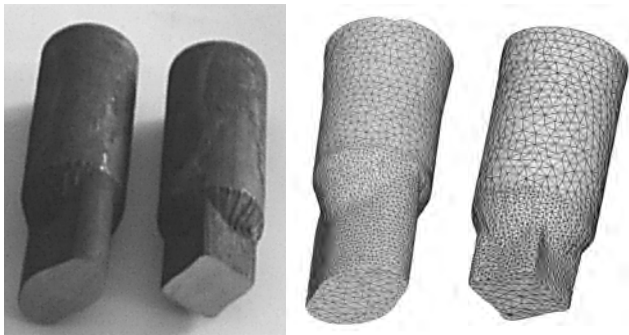
$$\Delta x_i = \Delta \varphi \cdot r_t, \quad (2.4)$$

gdzie: r_t – promień toczenia odkuwki.



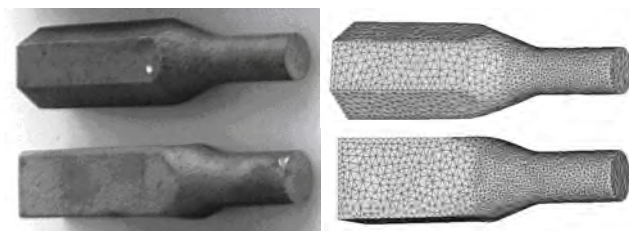
Rys. 2.10. Sposób profilowania powierzchni kalibrującej klina, gwarantujący walcowanie wyrobu o przekroju poprzecznym różnym od kołowego

Wykonane symulacje numeryczne oraz badania doświadczalne [91] wykazały przydatność opracowanej metody WPK w kształtowaniu wyrobów niesymetrycznych osiowo. Cechą charakterystyczną tych procesów kształtowania jest zmiana wahadłowa siły, następująca w efekcie zmieniającego się ciągle gniotu. Przykłady otrzymanych części niesymetrycznych osiowo pokazano na rys. 2.11.



Rys. 2.11. Części mające stopień o przekroju poprzecznym różnym od kołowego, otrzymane w próbach walcowania (po lewej) i obliczone MES (po prawej)

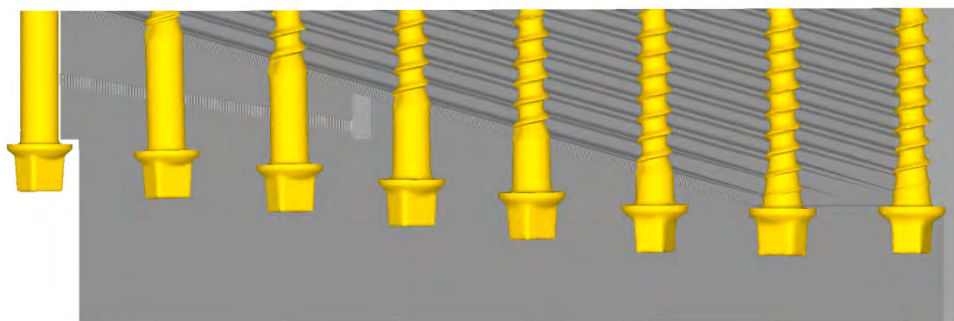
W pewnych sytuacjach można zastosować w procesie WPK wsady o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. I tak przy produkcji odkuwek wydłużonych, które mają na przeważającej długości przekrój kształtowy (stopień walcowy ma nieznaczną długość) nieopłacalne jest kształtowanie z wsadu walcowego. W tym przypadku przebieg projektowania narzędzi klinowych jest identyczny jak w procesach typowych realizowanych z wsadu walcowego. Należy jednak pamiętać, że w takich przypadkach kształtowania przerób plastyczny materiału należy opisywać za pomocą redukcji względnej R_p , a nie stopniem gniotu δ . Przykłady wyrobów walcowanych z wsadów kształtowych pokazano na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Części otrzymane z wsadów niecyldrycznych, otrzymane w próbach walcowania (po lewej) i obliczone MES (po prawej)

Inne często występujące w przemyśle maszynowym wyroby, nie spełniające warunków symetrii osiowej, to części maszyn mające stopnie z: gwintem, ślimakami, uzębieniami. Takie części można również walcować poprzecznie [52, 58, 91]. Wykonuje się

wówczas na powierzchni narzędzi rowki, które mają za zadanie kształtować uzwojenia. Przykładem może być tutaj nowa metoda wytwarzania wkrętów szynowych, opracowana w Politechnice Lubelskiej. Polega ona na zastosowaniu dwóch operacji. Pierwszą z nich jest bezwypływkowe kucie na gorąco łbów w układzie podwójnym na końcach pręta o przekroju kołowym. W tej operacji nagrzewane są tylko końcówki pręta; środkowa część nie jest nagrzewana. Kolejną operacją jest walcowanie poprzeczno-klinowe części gwintowej i rozdzielenie w fazie końcowej procesu dwóch walcowanych wyrobów. Nowatorski w skali światowej sposób walcowania gwintu (od środka ku końcom wyrobu) zilustrowany został na rys. 2.13, przedstawiającym wyniki symulacji numerycznej. Otrzymywane w tym procesie wkręty szynowe mają dobrą jakość, właściwy układ włókien i korzystne zakończenie stożkowe – rys. 2.14.



Rys. 2.13. Obliczona MES (w programie Deform 3D) progresja kształtu wkręta kolejowego w trakcie walcowania gwintu

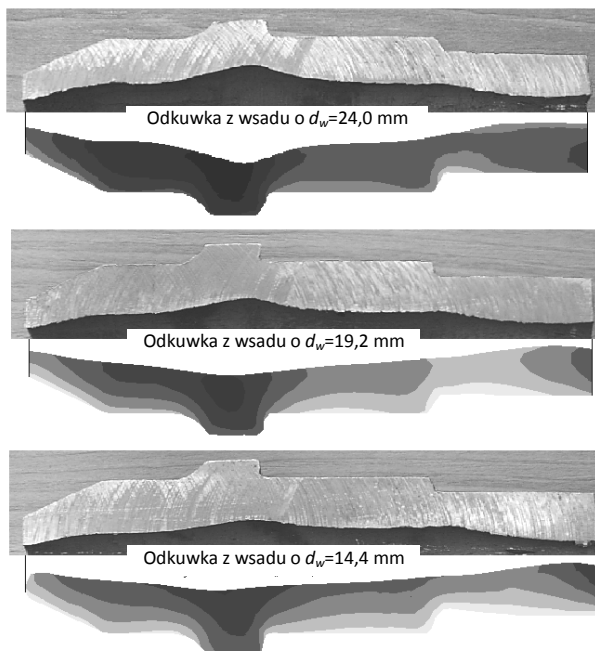


Rys. 2.14. Widok przekroju osiowego wkręta szynowego otrzymanego w procesie WPK

2.2.3. Walcowanie wyrobów drążonych

Elementy drążone są coraz częściej stosowane w budowie maszyn. Głównym odbiorcą części tego typu jest przede wszystkim przemysł motoryzacyjny, w którym zmniejszenie masy konstrukcji może być przełożone bezpośrednio na poprawę dynamiki pojazdów, zmniejszenie zużycia paliwa oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń. W ostatnich latach do wytwarzania osiowo-symetrycznych elementów drążonych zaczęto wykorzystywać także metody walcowania poprzecznego – rys. 2.15. W wyniku wykonanych w tym zakresie dość licznych prac badawczych [22, 27, 50, 54, 56, 70, 91, 109] stwierdzono, że:

- Metodami WPK oraz WKR można kształtować osiowo – symetryczne odkuwki drążone, z dokładnością porównywalną do uzyskiwanej w procesach walcowania z wsadu pełnego.
- Stabilność procesów kształtowania odkuwek drążonych może być zakłócona przez niekontrolowany poślizg (zgniecenie), przewężenie (zerwanie) walcowanego stopnia oraz zdeformowanie wewnętrznej powierzchni swobodnej.
- W metodzie WPK dwoma narzędziami odkuwek drążonych występuje większa owalizacja przekroju poprzecznego, w porównaniu do procesów walcowania z wsadu pełnego. Dla usuwania owalizacji zaleca się wydłużenie strefy kalibrowania do wartości zapewniającej wykonanie przez odkuwkę $3 \div 3,5$ obrotu w fazie kalibrowania.
- Stosowanie trójnarzędziowych metod w kształtowaniu wyrobów drążonych jest w pełni uzasadnione. Metody te charakteryzuje lepsza stabilność oraz dokładność wymiarowa części drążonej (w porównaniu do uzyskiwanej w procesach dwunarzędziowych).
- Przy projektowaniu narzędzi do WPK wyrobów drążonych nie zaleca się stosowania reguł projektowych opracowanych dla procesów WPK z wsadu pełnego. Zasady opisujące sposób projektowania narzędzi do WPK odkuwek drążonych podano w opracowaniach [1, 2, 91].



Rys. 2.15. Przykłady korpusów noży obrotowych walcowanych z wsadów drążonych o średnicy wewnętrznej podanej na rysunku (w każdym przypadku zestawiono elementy otrzymane w próbach przemysłowych i uzyskane z symulacji numerycznej)

2.2.4. WPK wałków ze stopniem mimośrodowym

Zasada walcowania wałków ze stopniem mimośrodowym polega na zmianie położenia osi wsadu w trakcie wcinania się klinów (w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ruchu narzędzi) [73]. Efekt ten można uzyskać stosując w pierwszych fazach procesu WPK specjalne wkładki prowadzące (prowadnice) – tak jak pokazano to na rys. 2.16. Za-

rys wkładki prowadzącej zależy od rozmiaru mimośrodowo e oraz od promienia wsadu r_0 . Można go obliczyć (dla układu zgodnego z rys. 2.16) korzystając z następujących zależności:

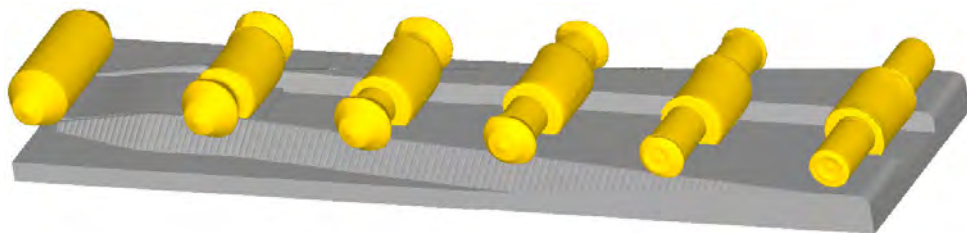
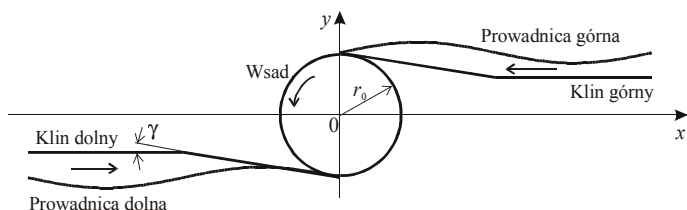
- prowadnica górna

$$y = r_0 + e \sin(x/r_0), \quad (2.5)$$

- prowadnica dolna

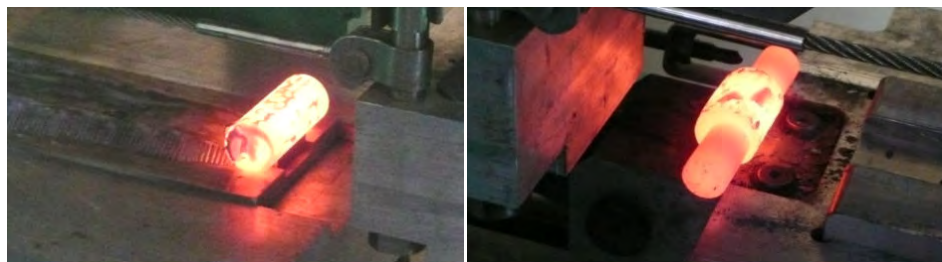
$$y = -r_0 + e \sin(-x/r_0). \quad (2.6)$$

Rys. 2.16. Schemat procesu WPK wałka ze stopniem mimośrodowym



Rys. 2.17. Obliczone zmiany kształtu wałka ze stopniem mimośrodowym w trakcie procesu WPK

Na rys. 2.17 przedstawiono zasymulowany numerycznie przebieg procesu walcowania wałka mimośrodowego, w którym zastosowano wsad ze specjalnymi zakończeniami stożkowymi. Stwierdzono, że wkładki prowadzące umożliwiają skuteczne wcięcie się klinów we wsad mimośrodowo w stosunku do jego osi. Dalszy przebieg kształtowania (po wyjściu z wkładek prowadzących) jest stabilny i nie zniekształca mimośrodowo. Stwierdzono także, iż stosowanie wsadu z zakończeniami stożkowymi jest korzystne, gdyż otrzymana w tej sytuacji powierzchnia czołowa odkuwki jest względnie prostopadła do osi stopnia odkuwki kształtowanej. Wykonane badania doświadczalne w warunkach laboratoryjnych potwierdziły trafność zastosowanego rozwiązania (rys. 2.18).



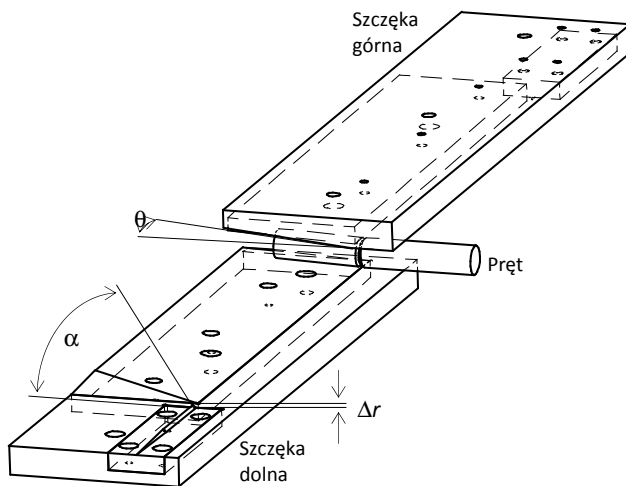
Rys. 2.18. WPK wałka mimośrodowego, przeprowadzone w Politechnice Lubelskiej

2.2.5. WPK na zimno

Pod koniec lat 80-tych XX wieku opracowano i wdrożono w przemyśle technologię WPK na zimno [91]. Zasadnicze różnice między procesami walcowania w warunkach na zimno i na gorąco (oprócz różnych temperatur materiału) stanowią:

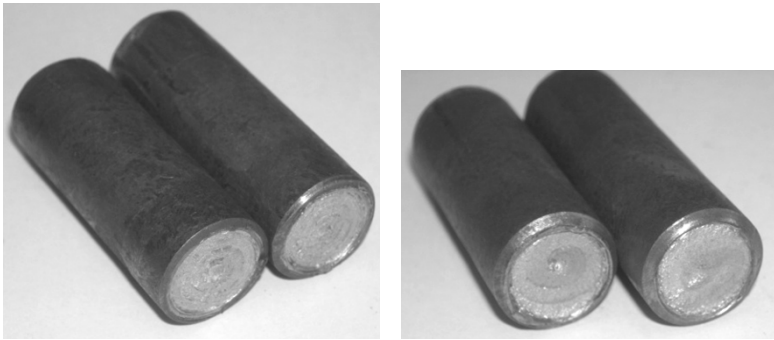
- ograniczenie technologii WPK na zimno do walcowania wyrobów osiowo-symetrycznych o małych wymiarach (o średnicy maksymalnej mniejszej niż 10 mm);
- stosowanie w procesach WPK na zimno środków chłodząco - smarujących (w celu podwyższenia trwałości narzędzi oraz dla usuwania odprysków metalu);
- brak nacięć technologicznych na powierzchniach bocznych klinów wykorzystywanych w procesach WPK na zimno;
- różnice w kątach klinów stosowanych do kształtowania (na ogół $\beta < 2^\circ$).

W ostatnim czasie w Politechnice Lubelskiej badano również proces dzielenia bezodpadowego prętów okrągłych, bazujący na procesie WPK na zimno, którego schemat pokazano na rys. 2.19. W pierwszej fazie procesu przemieszczające się przeciwnie kliny wykonują na obwodzie pręta rowek w kształcie litery V. Następnie za pomocą specjalnie ukształtowanych narzędzi wywoływane jest przeginięcie oddzielanej części pręta, który dodatkowo wykonuje ruch obrotowy. Na podstawie wykonanych badań [105] stwierdzono, że metodą tą można skutecznie oddzielać od pręta jego odcinki o długości l większej niż 1,3 średnicy d_0 pręta. Rozdzielenie metalu następowało w efekcie kruchego pękania, które można intensyfikować zwiększając kąt gięcia θ i/lub gniot bezwzględny Δr .



Rys. 2.19. Schemat procesu dzielenia bezodpadowego prętów okrągłych, bazujący na metodzie WPK

Na rys. 2.20 przedstawiono odcinki prętów oddzielone omawianą metodą. Na powierzchni rozdzielania metalu można wyróżnić dwie charakterystyczne strefy: zewnętrzną (błyszczącą) powstającą w trakcie walcowania V- rowka, oraz wewnętrzną (matową) tworzoną podczas pękania metalu. Ponadto, na podstawie wykonanych prób doświadczalnych stwierdzono, że pękanie metalu przebiega spiralnie (od zewnątrz ku osi pręta). Przy czym im większa jest wartość kąta gięcia θ tym mniej obrotów pręta (w fazie gięcia) jest potrzebnych do rozdzielania metalu.



Rys. 2.20. Odcinki prętów ze stali w gatunku C45 odcięte w procesie dzielenia bezodpadowego przebiegającego przy: $\alpha=45^\circ$, $\Delta r=2\text{ mm}$, $\theta=2^\circ$ (po lewej) oraz $\theta=3^\circ$ (po prawej)

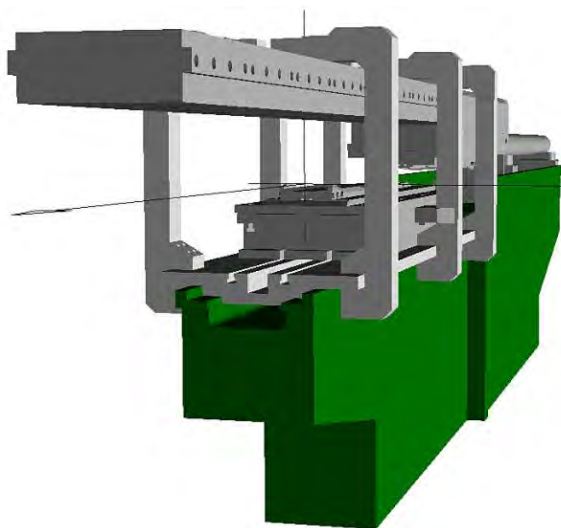
2.2.6. WPK części z metali nieżelaznych i ich stopów

Na podstawie doświadczeń własnych oraz analizy literatury specjalistycznej można stwierdzić, iż dotychczasowy rozwój technologii WPK zogniskowany był wyłącznie na kształtowaniu stali węglowych i stopowych, a tylko w nieznacznym stopniu dotyczył metali nieżelaznych i ich stopów. Jak dotychczas podjęto próby zastosowania WPK do walcowania części ze stopów tytanu [57, 97], kul z miedzi [96] oraz wałków ze stopów cynku wykorzystywanych w reaktorach atomowych [98]. Należy oczekiwać, że wykonanie obszernych prac badawczych w zakresie WPK wyrobów nieżelaznych stanowić będzie jeden z głównych trendów w najbliższej przyszłości.

2.2.7. Maszyny do WPK

Konstrukcje maszyn stosowanych w technologii WPK zostały opracowane do końca lat 80-tych XX wieku. W ostatnim dwudziestoleciu maszyny te automatyzowano, wyposażano w sterowanie numeryczne i rozbudowywano. Obecnie walcarki przemysłowe produkowane są przez następujące zakłady: Smeral [38], Lasco [37], VNIMETMASH [39], Jinan Tri-Tiger Technology Development Co., Ltd. [35], Beltechnology & M [36] oraz AMT Engineering [34]. Na stronach internetowych producentów (wyszczególnionych w bibliografii) znaleźć można szczegółowe dane techniczne walcarek.. Pozwalają one na kształtowanie części o średnicach od 5 do 190 mm i długości wynoszącej od 30 do 1000 mm. Najszerszej rozpowszechnione są walcarki z klinami płaskimi i pracujące w układzie dwóch walców roboczych.

Należy tutaj wspomnieć o jeszcze jednej możliwości, z której korzystają zakłady dysponujące odpowiednim zapleczem technologicznym. Otóż ze względu na prostą kinematykę ruchu walcarek wykonują one maszyny we własnym zakresie, bazując na posiadanym parku maszynowym. Przykład takiej walcarki opracowanej na bazie ciągarki ławowej, zaprojektowanej i wykonanej przez jeden z polskich zakładów przy współudziale autorów, pokazano na rys. 2.21. Maszyna ta obecnie z powodzeniem wykorzystywana jest w produkcji seryjnej korpusów noży obrotowych.



Rys. 2.21. Projekt wirtualny (u góry) oraz prototyp (u dołu) walcarki płaskoklinowej wykonanej w jednym z zakładów przemysłowych w Polsce

3. Analiza numeryczna procesu WPK kul

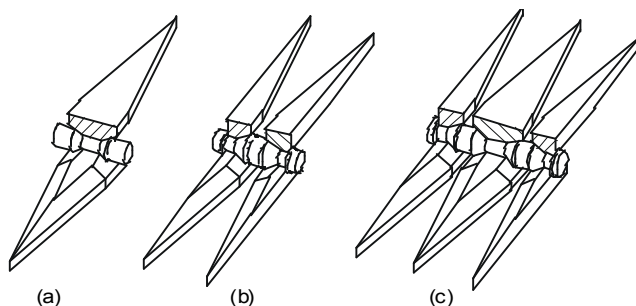
Procesy WPK wyrobów osiowo-symetrycznych, w tym kul [95, 96], można zrealizować trzema następującymi metodami:

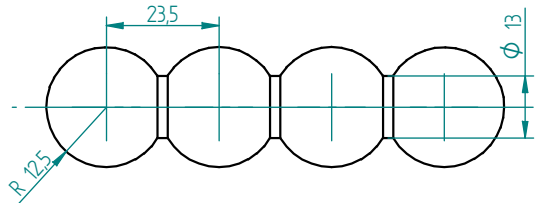
- redukcji średnic (zwykłą) – rys. 3.1.a. W początkowej fazie procesu segment klinowy wcinając się we wsad kształtuje na jego obwodzie rowek klinowy. Następnie w efekcie oddziaływania bocznych ścian narzędzi rowek ten jest rozszerzany na wymaganą długość, w kierunku od środka ku powierzchniom bocznym wyrobu. Redukcji przekroju poprzecznego odkuwki towarzyszy jej swobodne wydłużanie w kierunku osiowym;
- ze spęczaniem (wsteczną) – rys. 3.1.b. Przebieg walcowania podczas tej metody jest podobny jak w przypadku metody zwykłej. Jednakże w tym przypadku rozszerzanie rowka pierścieniowego zachodzi w kierunku od powierzchni bocznych do środka walcowanej odkuwki. W rezultacie centralna część wyrobu podlega działaniu osiowych sił ściskających. Wówczas, gdy naprężenia osiowe (wywołanych działaniem tych sił) osiągną wartość naprężenia uplastyczniającego środkowa część odkuwki ulegnie spęczaniu. Stosując tę metodę WPK można ukształtować stopnie odkuwki, których średnica będzie większa od średnicy zastosowanego wsadu;
- równoległą – rys. 3.1.c. W tej metodzie odkuwka podlega jednoczesnemu kształtowaniu przez kilka par klinów, przy czym poszczególne jej stopnie mogą być kształtowane zarówno metodą zwykłą jak i wsteczną. Zastosowanie równoległego WPK pozwala nawet trzykrotnie skrócić długość narzędzia klinowego, któremu jednakże towarzyszy odpowiedni wzrost siły walcowania.

Narzędzia klinowe służące do kształtowania kul (metodami podanymi powyżej) projektuje się w sposób standardowy, szczegółowo opisany w opracowaniu [91]. W narzędziach tych można wyróżnić dwie zasadnicze części: kształtującą (odpowiadającą walcowaniu metodami zwykłą, wsteczną i równoległą) oraz rozcinającą.

Rozważając część kształtującą narzędzi klinowych założono, że powinna ona zapewnić odwalcowanie odkuwki, o kształcie pokazanym na rys. 3.2, z której w trakcie rozcinania uzyskiwane będą cztery kule $\varnothing 25$ mm.

Rys. 3.1. Klasyfikacja WPK ze względu na przebieg procesu: a) WPK metodą redukcji średnic (zwykłą); b) wsteczne (ze spęczaniem) WPK; c) równoległe WPK



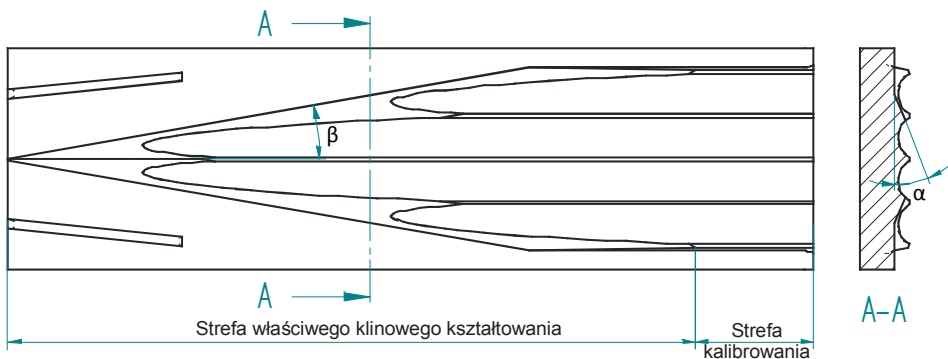


Rys. 3.2. Kształt odkuwki założony do uzyskania w procesie WPK (części kształtującą klinów)

3.1. WPK metodą zwykłą

Ogólny widok narzędzia zabezpieczającego proces WPK rozważanej odkuwki, pokazano na rys. 3.3. W narzędziu tym można wyróżnić dwie strefy tj.: właściwego klinowego kształtowania oraz kalibrowania.

Strefa właściwego klinowego kształtowania jest jednoznacznie określona przez kąty: rozwarcia klina β oraz kształtujący α . Zatem głównym zadaniem przy projektowaniu tej części narzędzia jest dobór wartości tych kątów. Do sprawdzenia w drodze symulacji numerycznych zaproponowano dwanaście zestawów kątów α i β , które dobrano arbitralnie kierując się doświadczeniem autorów w zakresie technologii WPK. Zestawy te przedstawiono w tab. 3.1.



Rys. 3.3. Kształt części kształtującej klina zabezpieczającego proces WPK kul metodą zwykłą

Z danych zamieszczonych w tab. 3.1 wynika, że szereg zestawów kątów α i β nie spełnia zależności $0,04 \leq \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \leq 0,08$, zapewniającej stabilny przebieg procesu WPK. Jednakże, ograniczenie górne wartości iloczynu tangensów kątów α i β wynika z warunku na zerwanie odkuwki walcowanej, do którego dochodzi wtedy, gdy długość walcowanego odcinka jest znacząca. W rozważanym przypadku długość szyjki łączącej kule jest nieznacząca (2,15 mm) i zerwanie nie będzie miało miejsca (może natomiast wystąpić poślizg narzędzi w czasie walcowania). Niewątpliwym zyskiem z zastosowania narzędzi o takich parametrach będzie natomiast skrócenie ich długości (mniejszy koszt wykonania narzędzi, krótszy skok narzędzi, krótszy cykl pracy, większa wydajność).

W celu zabezpieczenia przed poślizgiem na powierzchniach kształtujących narzędzi należy wykonać nacięcia technologiczne, na głębokość $0,3 \div 0,5$ mm w odstępach co 3 mm. Ponadto, narzędzia należy wyposażyć w specjalne ścieżki prowadzące, które

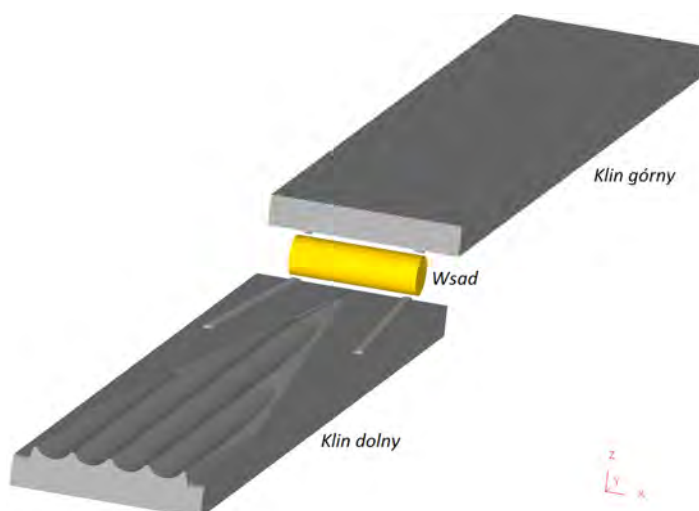
stabilizować będą położenie odkuwki w początkowej fazie procesu walcowania. Należy także zaokrąglić krawędzie narzędzi, by nie dochodziło do kaleczenia powierzchni odkuwek.

Odnosnie części kalibrującej powinna ona być tak dobrana, by zapewnić odkuwce w czasie kształtowania w tej strefie wykonanie przynajmniej 1/2 obrotu. Po przyjęciu, że promień toczny odkuwki równy jest jej promieniowi maksymalnemu (12,5 mm) z warunku tego wynika, iż minimalna długość strefy kalibrowania narzędzia wynosi 40 mm.

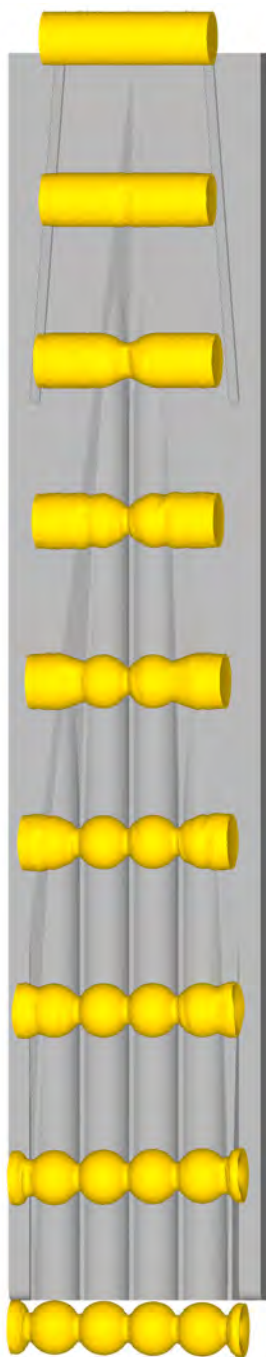
Tab. 3.1. Parametry kątowe narzędzi klinowych, przyjęte do analizy procesu WPK metodą zwykłą

Lp.	Kąt rozwarcia klina β	Kąt kształtujący α	$\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta$
1.	7°	22°	0,0496
2.	7°	25°	0,0573
3.	7°	30°	0,0709
4.	7°	40°	0,1030
5.	9°	22°	0,0640
6.	9°	25°	0,0739
7.	9°	30°	0,0914
8.	9°	40°	0,1329
9.	11°	22°	0,0785
10.	11°	25°	0,0906
11.	11°	30°	0,1122
12.	11°	40°	0,1631

W analizie numerycznej procesu WPK kul przyjęto schemat kształtowania w układzie dwóch przemieszczających się przeciwie klinów płaskich. Na potrzeby obliczeń numerycznych, stosując program Deform-3D, wykonano szereg modeli geometrycznych procesu WPK, z których jeden przedstawiono na rys. 3.4. W skład modelu wchodzi dwa identyczne narzędzia (poruszające się przeciwie z prędkością $v = 0,125$ m/s) oraz cylindryczny wsad.



Rys. 3.4. Model geometryczny procesu WPK metodą zwykłą, przyjęty w analizie MES



Rys. 3.5. Progresja kształtu odkuwki w procesie WPK metodą zwykłą

Do zamodelowania kształtowanego materiału (przyjęto, że jest to stal w gatunku 100Cr6) w programie Deform-3D stosowane są czterowęzłowe elementy czworosienne. W trakcie obliczeń siatki elementów ulega zniekształceniu, co prowadzi do zmniejszenia dokładności obliczeń. Dlatego też należy dokonywać przebudowy siatki elementów, która najczęściej następuje wówczas, gdy intensywność odkształcenia przyrośnie o zadaną arbitralnie wartość. W bieżącej analizie wartość ta wynosiła 0,6.

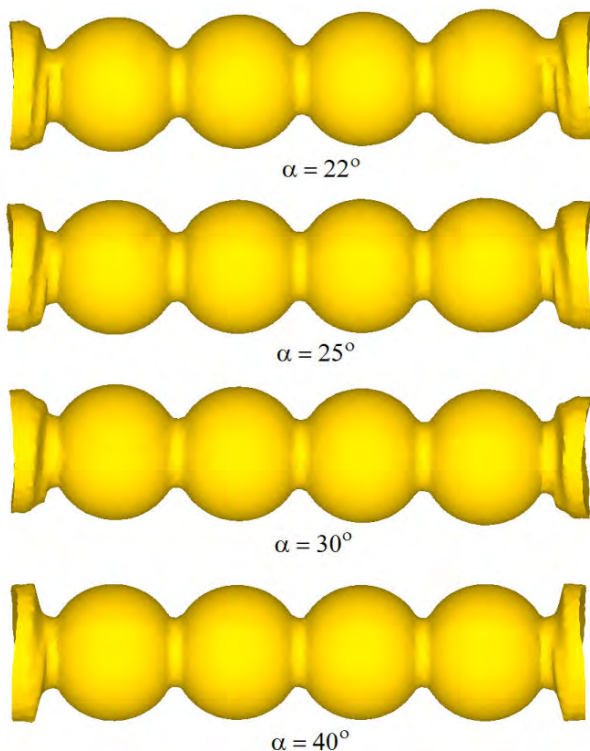
Narzędzia wykorzystane w symulacji modelowane były w programie Solid Edge, z którego eksportowane były do formatu *.stl, wczytywanego w programie Deform-3D. Przyjęto, że narzędzia są doskonale sztywne oraz mają stałą temperaturę $T = 50^{\circ}\text{C}$. Ponadto w obliczeniach założono, że: czynnik tarcia na powierzchni kontaktu wynosi $m = 1$; współczynnik wymiany ciepła między narzędziami a materiałem równa się $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, zaś między materiałem a otoczeniem $0,2 \text{ kW/m}^2\text{K}$; temperatura wsadu 1150°C .

W efekcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że we wszystkich rozważanych przypadkach walcowania odkuwka obraca się stabilnie (nie występuje niekontrolowany poślizg), a wyroby uzyskują pożądany kształt. Przebieg walcowania jest w każdym z przypadków podobny i zgodny z rys. 3.5. Najpierw klin wcina się w strefę centralną kształtując środkowe przewężenie, a następnie przemieszczając się na boki (w sposób symetryczny) kolejno kształtuje pozostałe przewężenia. W końcowej fazie procesu odkuwka podlega kalibrowaniu, mającemu na celu usunięcie niedokładności kształtu. Rozcinania kul nie modelowano na tym etapie.

Jednym z najważniejszych zadań, które starano się rozwiązać na podstawie modelowania numerycznego było stwierdzenie, jak parametry geometryczne narzędzi (kąty kształtujący α i rozwarcia klina β) wpływają na dokładność walcowania. Rozważono użycie narzędzi charakteryzowanych kątami α w zakresie $22^{\circ}\div 40^{\circ}$ oraz β w zakresie $7^{\circ}\div 11^{\circ}$. Ogółem przeanalizowano 12 przypadków walcowania metodą zwykłą.

Na rys. 3.6 pokazano w widoku od przodu (w kierunku walcowania) kształt wybranych odkuwek, uzyskanych w analizowanych numerycznie przypadkach walcowania. We wszystkich przypadkach kształt ten jest poprawny. Materiał wypełnił wykroje (oddające zarys kuli) w sposób właściwy. Jedyne mało zauważalne niewypełnienia wystąpiły przy kształtowaniu klinami o najmniejszych kątach

$\alpha = 22^\circ$ oraz $\beta = 11^\circ$. Jednak te niedokładności kształtu mieszczą się w tolerancjach wykonawczych walcowania poprzeczno-klinowego.



Rys. 3.6. Widok (w kierunku walcowania) odkuwek ukształtowanych w procesie WPK metodą zwykłą przy użyciu klinów z $\beta=11^\circ$ i α podanym na rysunku

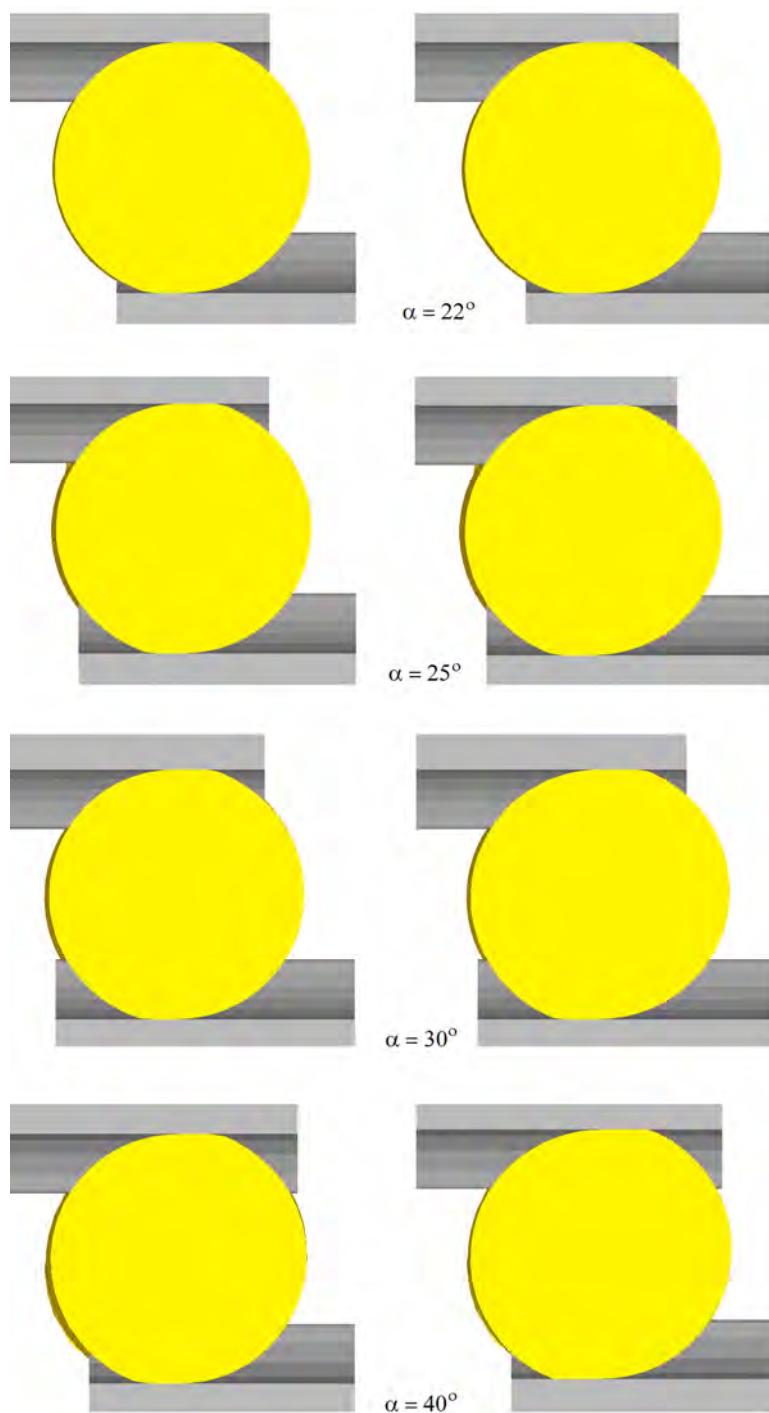
Więszym problemem, który może wystąpić podczas WPK metodą zwykłą jest nadmierna owalizacja przekroju poprzecznego, będąca efektem zgromadzenia w wykrojach objętości metalu większej od wartości wymaganej (równej objętości kuli). W efekcie czego wyrób w przekroju poprzecznym przyjmuje niepożądany kształt owalny. Jest to dobrze widoczne na kolejnym rysunku 3.7, przedstawiającym przekroje poprzeczne kul otrzymanych w procesach walcowania, przebiegających przy $\beta=9^\circ$.

Analizując wyniki obliczeń zauważono, że bardziej właściwy kształt (zbliżony do kołowego) mają kule centralne. Walcowane są one w początkowej fazie procesu WPK, dzięki czemu na dłuższej drodze narzędzi (niż kule skrajne) podlegają kalibrowaniu usuwającemu nieprawidłowości kształtu, w tym owalizację przekroju poprzecznego.

Odnosnie wpływu parametrów kątowych na owalizację przekroju poprzecznego stwierdzono, że zwiększanie kąta rozwarcia klina β oraz kąta kształtującego α powoduje wzrost owalizacji. Efekt ten można wytłumaczyć w sposób następujący. Zwiększenie kąta β powoduje wydłużenie narzędzi, co w konsekwencji zwiększa liczbę cykli odkształcenia, w trakcie których usuwana jest owalizacja. Natomiast zwiększenie kąta kształtującego α jest równoznaczne z tym, że większa ilość materiału płynie w kierunku promieniowym (zwiększa owalizację) a nie osiowym.

Dla ilościowego określenia wielkości owalizacji wprowadzono parametr Δd , który definiowany jest zależnością

$$\Delta d = d_{max} - d, \quad (3.1)$$



Rys. 3.7. Przekroje poprzeczne kul, centralnej (z lewej) i skrajnej (z prawej), otrzymane w procesie WPK metodą zwykłą klinami o kątach $\beta=9^\circ$ i α podanym na rysunku

gdzie: d_{max} – średnica maksymalna przekroju poprzecznego, d – średnica nominalna. Średnicę d_{max} określano wczytując przekroje poprzeczne kulek do programu CAD, w którym dokonywano stosownego pomiaru. W efekcie określono parametr Δd dla każdego z analizowanych przypadków walcowania. Wyniki tych obliczeń zebrano w tabeli 3.2.

Analiza danych zamieszczonych w tabeli 3.2 wykazuje, że we wszystkich przypadkach kształtowania uzyskano dokładność wystarczającą do wytwarzania kul na mielniki (patrz tab. 1.1). Najlepsze rezultaty odnotowano dla narzędzia, dla którego $\alpha = 25^\circ$ i $\beta = 7^\circ$. Tę parę kątów można zatem rekomendować do praktycznego stosowania.

Tab. 3.2. Wartości parametru owalizacji Δd dla kul kształtowanych metodą zwykłą WPK, wyznaczone dla przekroi poprzecznych, z których wybrane pokazano na rys. 3.7

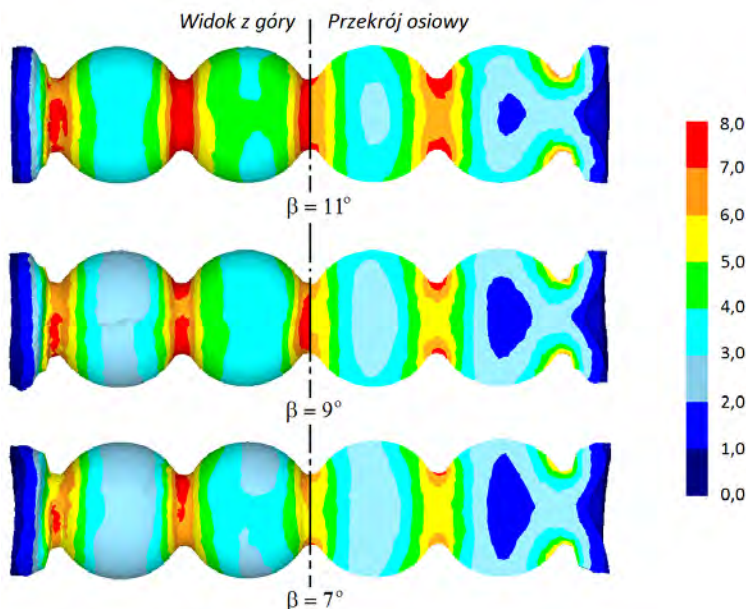
Lp.	Kąt β	Kąt α	Δd Kula centralna	Δd Kula skrajana
1.	7°	22°	0,67 mm	0,70 mm
2.	7°	25°	0,62 mm	0,50 mm
3.	7°	30°	0,68 mm	0,87 mm
4.	7°	40°	0,59 mm	1,09 mm
5.	9°	22°	0,61 mm	0,77 mm
6.	9°	25°	0,71 mm	0,75 mm
7.	9°	30°	0,75 mm	1,02 mm
8.	9°	40°	0,61 mm	1,45 mm
9.	11°	22°	0,68 mm	0,79 mm
10.	11°	25°	0,86 mm	1,08 mm
11.	11°	30°	0,72 mm	1,34 mm
12.	11°	40°	1,02 mm	1,45 mm

Należy tutaj zauważyć, że odnotowaną owalizację można łatwo usunąć zwiększając nieznacznie (w sposób postępowy) średnicę wykroju. Kula wówczas będzie miała w przekroju poprzecznym pożądaną kształt kołowy, o średnicy nieco większej od zadanej.

W trakcie obliczeń MES prognozowano rozkłady intensywności odkształcenia w używanych wyrobach. Analizowano wpływ kąta rozwarcia klina β (rys. 3.8) oraz kąta kształtującego α (rys. 3.9) na wielkość tego parametru. We wszystkich przeanalizowanych przypadkach największe odkształcenia występowały w obszarach przewężeń (łączników) rozdzielających poszczególne kule. Jest to oczywiste, gdyż w tej strefie wyrobu narzędzia najintensywniej oddziaływały na materiał redukując jego średnicę. Co ciekawe, znaczne odkształcenia wystąpiły również wewnątrz kul, nawet w przekroju centralnym, w którym nie redukowano średnicy. Odkształcenia te są efektem płynięcia metalu w kierunku stycznym, występującym w całej objętości odkuwki i będącym następstwem opisanej uprzednio owalizacji.

W efekcie wykonanych obliczeń zauważono (rys. 3.8), że zmniejszenie kąta rozwarcia klina β powodowało wzrost intensywności odkształcenia w ukształtowanym przewężeniu. Niewątpliwie jest to skutek wydłużenia narzędzi, prowadzącego do zwiększenia

czasu oddziaływania na materiał sił tarcia, wywołujących jego płynięcie w kierunku obwodowym (stycznym). Można zatem stwierdzić, że zwiększanie kąta β powoduje wzrost odkształceń zbędnych.



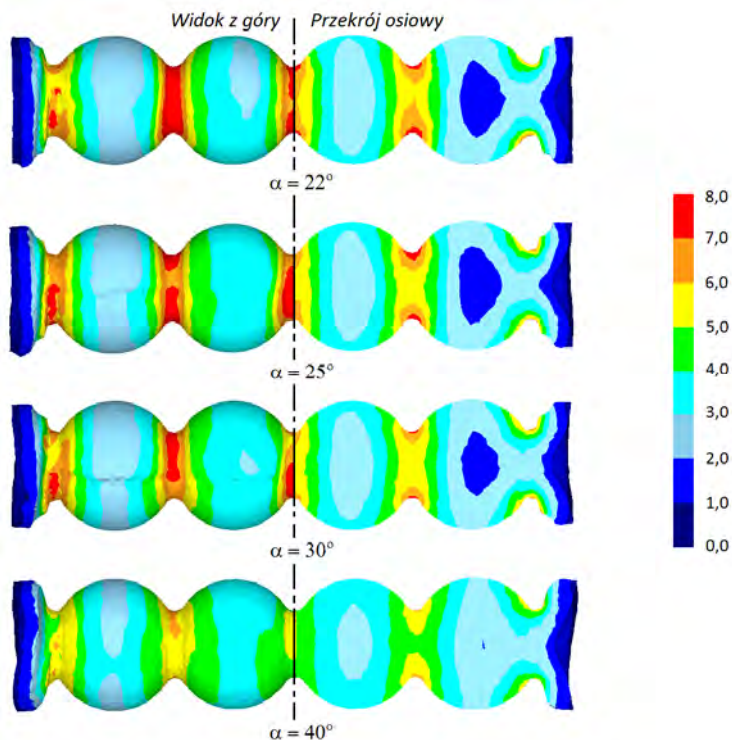
Rys. 3.8. Rozkład intensywności odkształcenia na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwki, otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą klinami charakteryzowanymi kątem $\alpha=25^\circ$

Podobny efekt (zwiększenie intensywności odkształcenia) uzyskuje się zmniejszając kąt kształtujący α (rys. 3.9). Również w tym wypadku pociąga to za sobą wzrost długości narzędzi. Ponadto, zmniejszenie α powoduje zwiększenie płynięcia metalu w kierunku promieniowym, podlegającego obciskaniu obrotowemu przez klin.

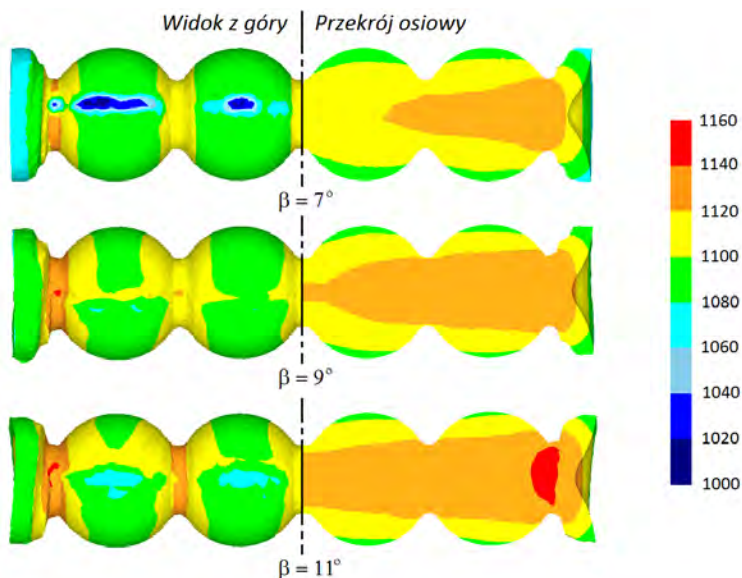
Na kolejnych rys. 3.10 i 3.11 przedstawiono rozkłady temperatur na powierzchni oraz w przekrojach osiowych wyrobów otrzymanych w analizowanych procesach WPK.

Ogólnie można stwierdzić, iż pomimo stosunkowo długiego czasu procesu, materiał ma nadal temperaturę właściwą dla procesów obróbki plastycznej na gorąco. Mało tego, w niektórych przypadkach (np. WPK przy $\alpha = 25^\circ$ i $\beta = 11^\circ$) odnotowano nawet wzrost temperatury materiału w stosunku do temperatury wsadu $T = 1150^\circ\text{C}$. Oznacza to, że w procesie WPK kul generowane są duże ilości ciepła (w wyniku zamiany pracy odkształcenia i pracy tarcia), które rekompensują ciepło odprowadzane do narzędzi w drodze wymiany. Należy przy tym zauważyć, że materiał ma najmniejszą temperaturę na powierzchni zewnętrznej a największą wewnątrz odkuwki. Przy czym różnice między wartościami temperatur na ogół mieszczą się w zakresie 100°C .

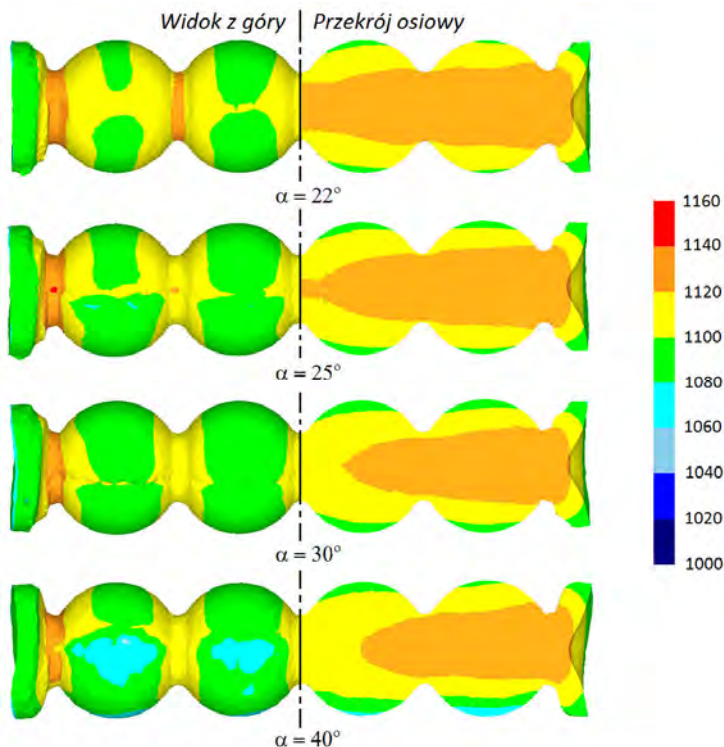
Odnosnie wpływu parametrów kątowych α i β na temperaturę metalu w wyrobie odwalcowanym należy podać, że stosowanie narzędzi o większych α i mniejszych kątach β sprzyja zmniejszeniu temperatury materiału. Jednakże odnotowane różnice w rozkładach temperatur mieszczą się w zakresie około 20°C i nie są istotne ze względu na praktyczny przebieg procesu walcowania kul stalowych.



Rys. 3.9. Rozkład intensywności odkształcenia na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwek otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą klinami charakteryzowanymi kątem $\beta=9^\circ$



Rys. 3.10. Rozkład temperatury (w $^\circ\text{C}$) na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwek, otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą klinami charakteryzowanymi kątem $\alpha=25^\circ$

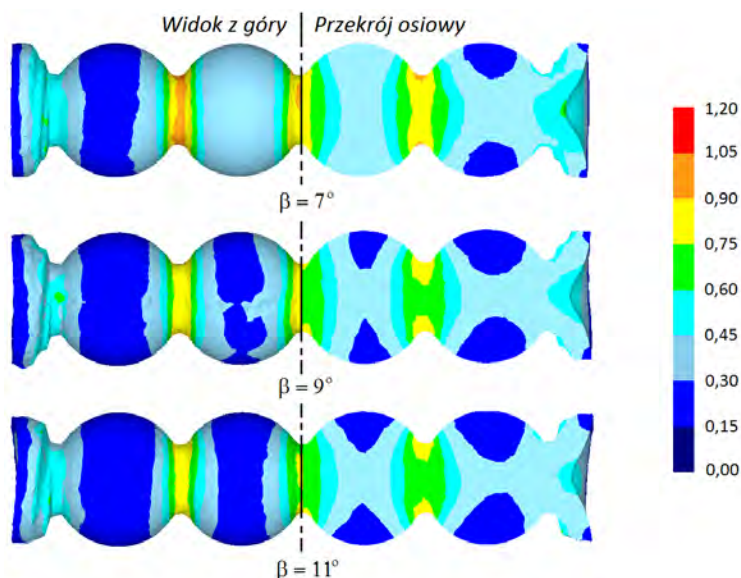


Rys. 3.11. Rozkład temperatury (w $^\circ\text{C}$) na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwek otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą klinami charakteryzowanymi kątem $\beta=9^\circ$

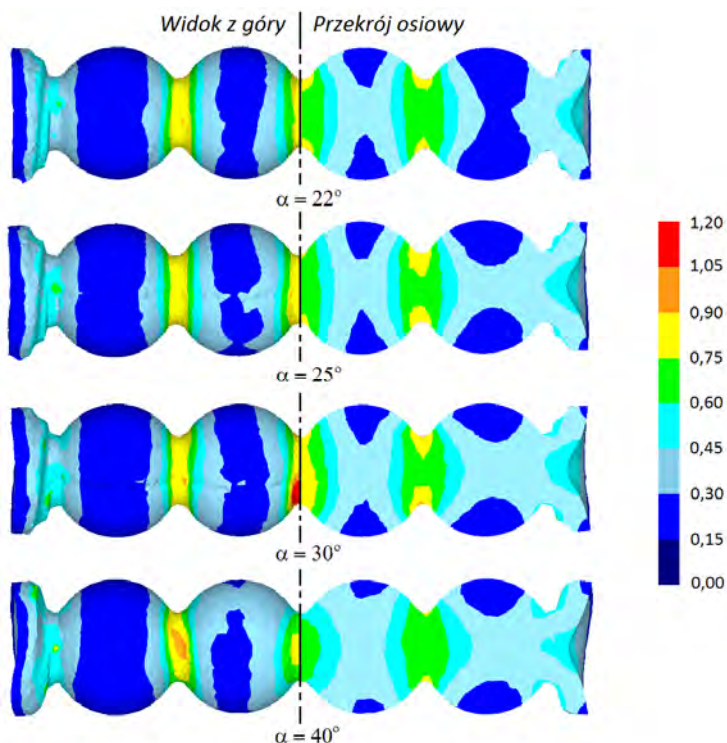
Rozkłady funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama), wyznaczone na powierzchni zewnętrznej i w przekrojach wzdłużnych (osiowych) wyrobów odwalcowanych pokazano na kolejnych rysunkach 3.12-3.13. Analiza danych zamieszczonych na tych rysunkach pokazuje, że największe wartości funkcji zniszczenia uzyskuje w przewężeniach pomiędzy kształtowanymi kulami. Jednakże wartości te są na ogół mniejsze od wartości krytycznych (dla stali 100Cr6 w warunkach obróbki plastycznej na gorąco wartość ta wynosi 0,6 [97]), przy których materiał pęka. Zresztą w tym miejscu wyrobów planowane jest rozdzielanie kul i z tego względu wystąpienie tutaj pęknięć można uznać za dopuszczalne. Najważniejsze jest to, że funkcja zniszczenia przyjmuje małe wartości w środku odwalcowanych kul.

Analizując wpływ kątów narzędzi na wartość funkcji zniszczenia, zauważa się, że wraz ze zmniejszeniem kąta rozwarcia klina β zwiększa się wartość tej funkcji. Jest to wynikiem wydłużonego oddziaływania narzędzi na kształtowany materiał w efekcie wzrostu długości klinów. Natomiast wpływ kąta kształtującego α na kryterium zniszczenia nie jest już tak jednoznaczny. Uogólniając można jednak podać, że wzrost kąta α powoduje zwiększenie funkcji zniszczenia, prawdopodobnie w efekcie wzrostu wartości naprężeń rozciągających, działających w kierunku osiowym wyrobu.

W trakcie obliczeń MES monitorowano również parametry siłowo - energetyczne procesu WPK. Na rys. 3.14 i 3.15 przedstawiono rozkłady sił stycznych (w kierunku walcowania) i rozporowych (prostopadłych do podstawy narzędzi). Zauważono, że obie re-

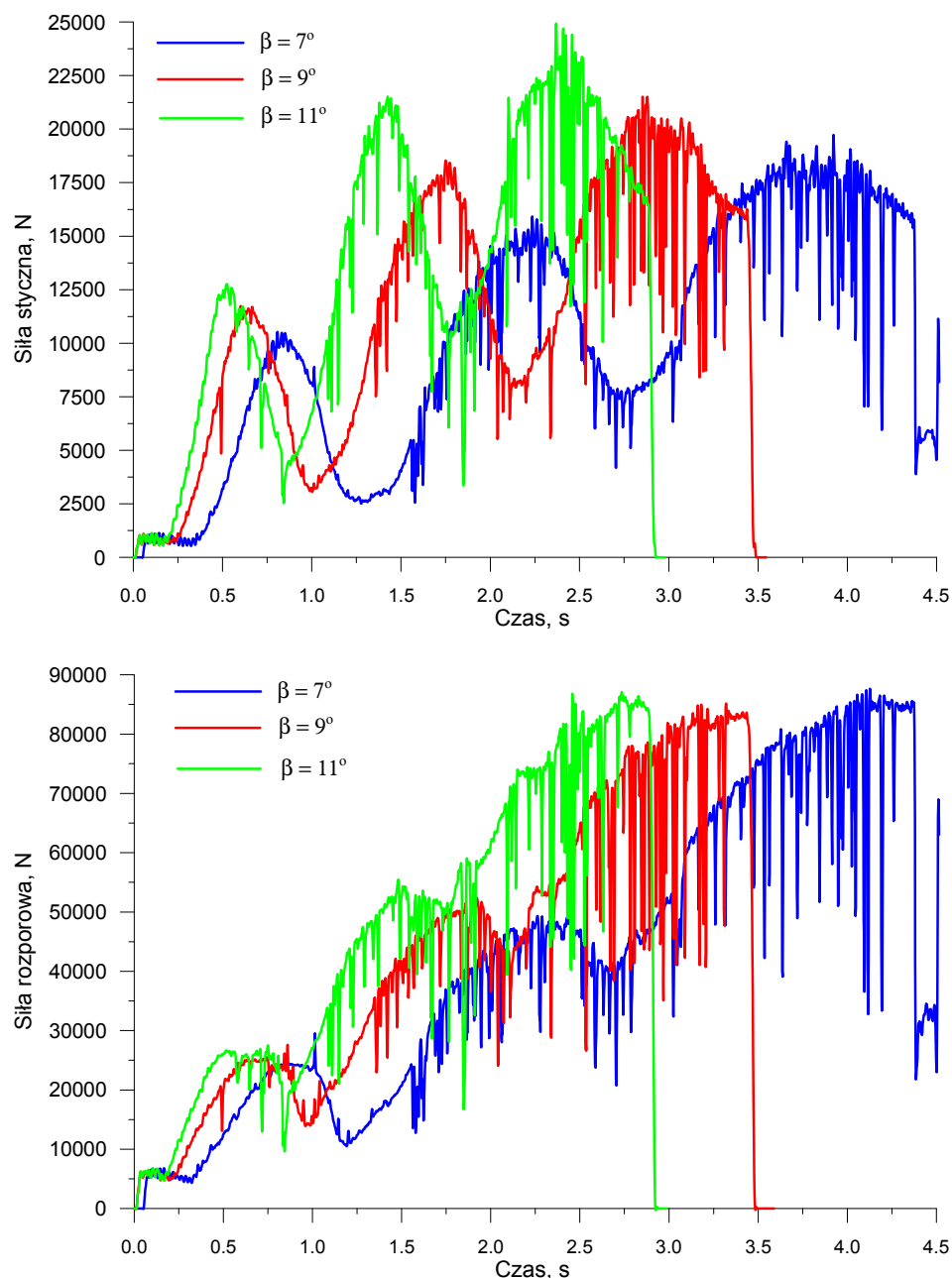


Rys. 3.12. Rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwkach, otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą klinami charakteryzowanymi kątem $\alpha=25^\circ$

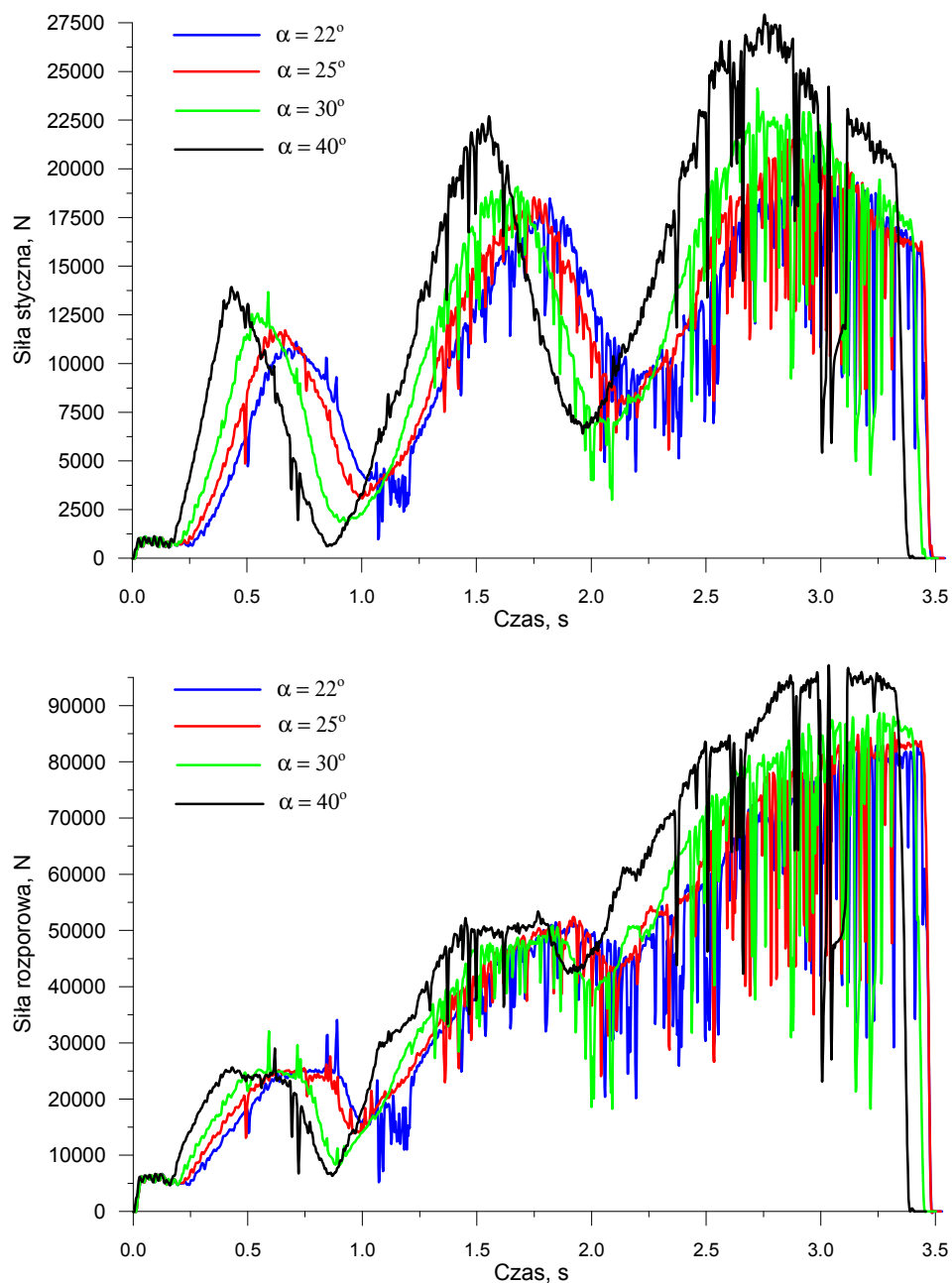


Rys. 3.13. Rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwkach, otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą klinami charakteryzowanymi kątem $\beta=9^\circ$

jestrowane siły ulegają cyklicznym wahaniom, które związane są ze zmianą głębokości, na którą wcinają się narzędzia w materiał (zmiana gniotu bezwzględnego). Te wahania należy uznać za cechę charakterystyczną procesu WPK kul metodą zwykłą.



Rys. 3.14. Rozkłady składowych siły walcowania w procesie WPK metodą zwykłą, w zależności od kąta rozwarcia klina β , przy stałej wartości kąta kształtującego $\alpha=25^\circ$



Rys. 3.15. Rozkłady składowych siły walcowania w procesie WPK metodą zwykłą, w zależności od kąta kształtującego α , przy stałej wartości kąta rozwarcia klina $\beta=9^\circ$

Siła styczna (wciskająca klin) przyjmuje wartości około 3 ÷ 4 razy mniejsze od siły rozporowej. Taka proporcja mieści się w zakresie rejestrowanym dla typowych procesów WPK. Ważne jest również, że w żadnym z rozważanych przypadków składowa styczna

nie przekroczyła wartości 30 kN. Oznacza to, że każdy z tych przypadków kształtowania może być zrealizowany w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej.

Analizując wpływ kąta rozwarcia klina β na siły w procesie WPK metodą zwykłą stwierdzono, że parametr ten jest nieistotny ze względu na wartość siły rozporowej. Natomiast zwiększenie β wyraźnie wpływa na wzrost składowej stycznej. Jest to efektem zwiększonego oporu stawianego przez materiał narzędziu, głównie w kierunku osiowym. Odnośnie kąta kształtującego α zauważono, że jego wzrost powoduje zwiększenie zarówno składowej osiowej jak i stycznej. Wydaje się, że jest to następstwem szybszego wcinania się narzędzia w materiał (przy zachowanej wartości kąta β), prowadzącego również do większej owalizacji przekroju poprzecznego.

Ostatnim parametrem branym pod uwagę w wykonanej analizie była praca wykonana przez narzędzie klinowe w trakcie procesu walcowania. Praca ta rośnie w trakcie całego procesu, ale przyrost ten nie jest monotoniczny, co jest konsekwencją wahań sił odnotowanych procesie WPK kul metodą zwykłą.

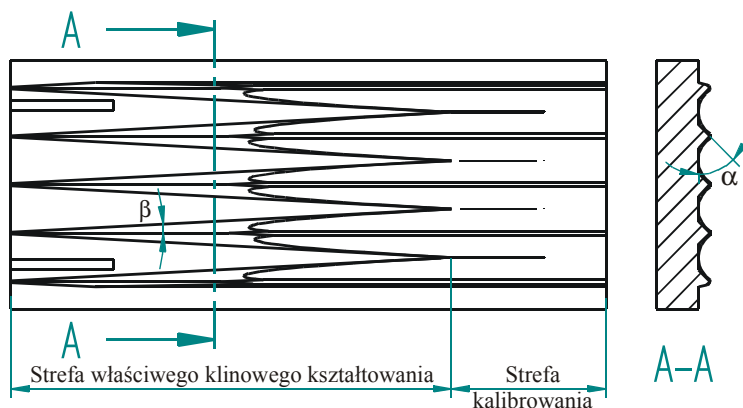
W tabeli 3.3 zestawiono wartości pracy odnotowane dla wszystkich rozważanych przypadków walcowania. Okazało się, że duży wpływ na energochłonność procesu ma wartość zastosowanych parametrów kątowych, tj α i β . Największą pracę (6,15 kJ) odnotowano dla kształtowania klinami z $\beta = 11^\circ$ i $\alpha = 40^\circ$, a najmniejszą (4,60 kJ) dla $\beta = 11^\circ$ i $\alpha = 22^\circ$ (różnica 25%). Generalnie stwierdzono, że zmniejszanie kąta kształtującego α i zwiększanie kąta rozwarcia klina β powoduje zmniejszenie pracy niezbędnej do ukształtowania półwyrobów kul połączonych mostkami.

Tab. 3.3. Praca wykonana przez narzędzie klinowe w analizowanych numerycznie przypadkach WPK metodą zwykłą

Lp.	Kąt β	Kąt α	Praca wykonana przez klin
1.	7°	22°	5754,9 J
2.	7°	25°	5536,4 J
3.	7°	30°	6018,1 J
4.	7°	40°	6377,6 J
5.	9°	22°	4623,1 J
6.	9°	25°	4850,2 J
7.	9°	30°	4894,5 J
8.	9°	40°	5545,0 J
9.	11°	22°	4601,9 J
10.	11°	25°	4702,7 J
11.	11°	30°	5056,4 J
12.	11°	40°	6157,5 J

3.2. WPK ze spęczaniem

Projektując narzędzia do WPK ze spęczaniem (rys. 3.16) przyjęto założenie, że wszystkie kule kształtowane są jednocześnie, a kliny położone są równoległe do kierunku ich ruchu. W takim przypadku sąsiednie kliny zamykają między sobą objętość materiału, która równa jest objętości kuli. Konsekwencją tego jest, że średnica materiału wsadowego, dla wyrobów o kształcie zgodnym z rys. 3.1 równa jest 21,55 mm.



Rys. 3.16. Schematyczny widok narzędzia klinowego, zabezpieczającego proces WPK kul ze spęszczaniem (wstecznego)

W rozważanym procesie WPK geometria narzędzia klinowego określona jest jednoznacznie przez wartości kątów α i β , podobnie jak w przypadku kształtowania metodą zwykłą. Jednakże w procesie WPK ze spęszczaniem kliny sąsiednie powinny przemieszczać objętości materiału w kierunku przeciwnym, w efekcie czego powinien on podlegać ścisnaniu w kierunku osiowym. Takiej kinematyce płynięcia metalu sprzyja stosowanie klinów o małych kątach rozwarcia klina β i dużych kątach kształtujących α . Przy czym wartości tych kątów powinny być tak dobrane, by spełniona była zależność $0,04 \leq \tan \alpha \tan \beta \leq 0,08$.

Bazując na doświadczeniach własnych, z zakresu technologii WPK, zaproponowano rozważenie procesów kształtowania kul metodą ze spęszczaniem narzędziami charakteryzowanymi kątami rozwarcia klina β w zakresie $2,5^\circ \div 5^\circ$ oraz kątami kształtującymi α w zakresie $30^\circ \div 60^\circ$. Szczegółowe zestawienie proponowanych par parametrów kątowych przedstawiono w tabeli 3.4, w której podano także charakterystyczną dla procesu WPK wartość iloczynu $\tan \alpha \tan \beta$.

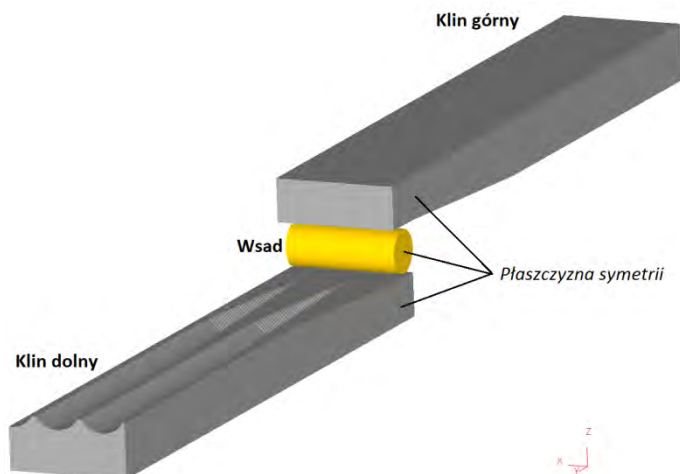
Dla zmniejszenia ryzyka wystąpienia poślizgu na powierzchniach bocznych klinów (w strefie właściwego klinowego kształtowania) powinny być wykonane nacięcia technologiczne (na głębokość ok. 0,35 mm w odstępach co 3 mm). Ponadto, ostre krawędzie narzędzi winny być zaokrąglone, by nie dochodziło do kaleczenia powierzchni kształtowanych kul.

W procesie WPK ze spęszczaniem nie wymaga się stosowania ścieżek prowadzących, gdyż wszystkie kliny w tym samym czasie wcinają się we wsad, przez co doskonale pozycjonują jego położenie.

Analizując proces WPK ze spęszczaniem przyjęto, że kule $S\emptyset 25$ kształtowane będą z wsadu o średnicy $\emptyset 21,55$ mm. Ze względu na symetrię procesu w analizie numerycznej ograniczono się do zamodelowania kształtowania tylko dwóch kul, w sposób zgodny z pokazanym na rys. 3.17. Takie podejście pozwoliło na znaczące skrócenie czasu obliczeń. W obliczeniach numerycznych wszystkie parametry procesu kształtowania (model materiałowy, model tarcia, kinematyka ruchu narzędzi, parametry termiczne) przyjęto identycznie jak w procesie WPK metodą zwykłą. Jediną różnicą było narzucenie warunków brzegowych na płaszczyznę centralną, które wynikały z symetrii procesu walcowania.

Tab. 3.4. Parametry kątowe narzędzi klinowych, przyjęte do analizy procesu WPK metodą ze spęszczaniem

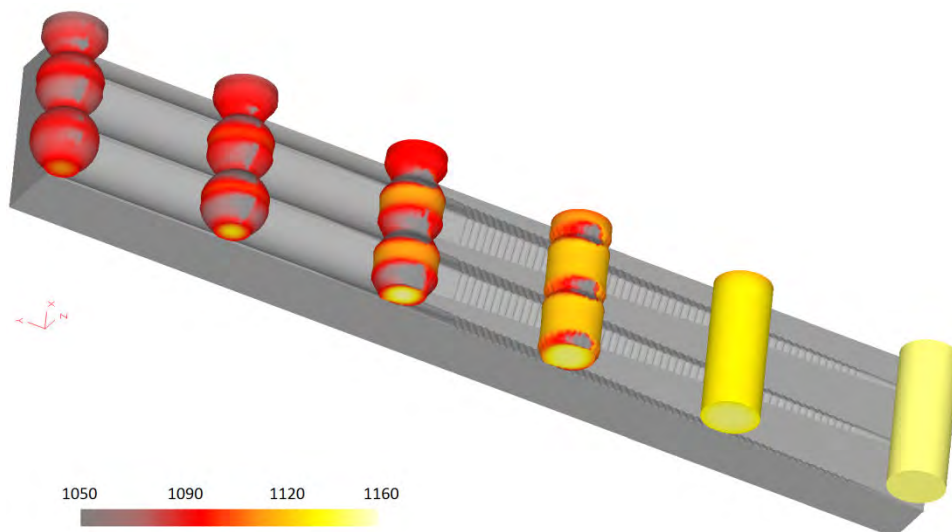
Lp.	Kąt rozwarcia klina β	Kąt kształtujący α	$\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta$
1.	2,5°	30°	0,0252
2.	2,5°	45°	0,0437
3.	2,5°	60°	0,0756
4.	3°	30°	0,0303
5.	3°	45°	0,0524
6.	3°	60°	0,0908
7.	4°	30°	0,0404
8.	4°	45°	0,0699
9.	4°	60°	0,1211
10.	5°	30°	0,0505
11.	5°	45°	0,0875
12.	5°	60°	0,1515

**Rys. 3.17.** Model procesu WPK ze spęszczaniem, wykorzystujący symetrię kształtowania

Wykonano obliczenia 12 przypadków walcowania, realizowanych zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3.17, których dane wyspecyfikowano w tabeli 3.4. W efekcie uzyskano możliwość prześledzenia wpływu głównych parametrów narzędzi klinowych, tj. kąta kształtującego α (w zakresie $30^\circ \div 60^\circ$) i kąta rozwarcia klina β (w zakresie $2,5^\circ \div 5^\circ$) na przebieg walcowania - rys. 3.18.

W procesie WPK ze spęszczaniem kliny wcinają się w materiał równocześnie. Przemieszczają one na boki materiał, który ulega spęczeniu, doprowadzając do wypełnienia wykroju (bruzdy) i ukształtowania kuli. Nacięcia technologiczne wykonane na powierzchniach bocznych powodują, że odkuwka w trakcie kształtowania obraca się w sposób pewny (w żadnym z 12 analizowanych przypadków WPK nie odnotowano niekontrolowanego poślizgu). W efekcie oddziaływania klinów powstają kule oraz dwa odpady końcowe, zmniejszające uzysk materiałowy. Dla zmniejszenia ilości odpadów końcowych należy zwiększać ilość kul walcowanych w jednym przejściu narzędzi (w przy-

padku walcowania 8 kul odpad materiału będzie dwukrotnie mniejszy niż podczas kształtowania 4 kul).

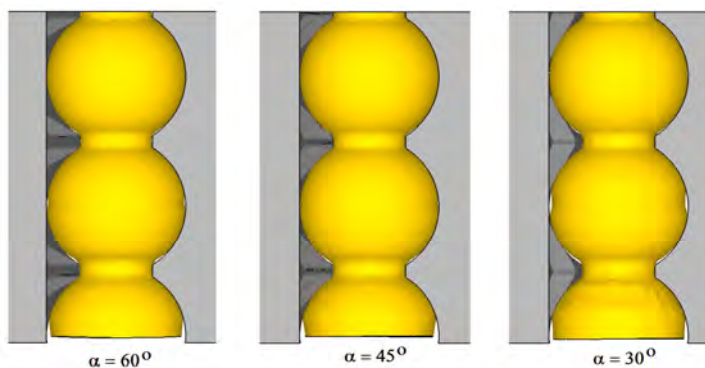


Rys. 3.18. Progresa kształtu odkuwki, z zaznaczonym rozkładem temperatury (w °C), w procesie WPK ze spęczaniem przy $\beta=2,5^\circ$, $\alpha=30^\circ$

Jednym z głównych celów obliczeń numerycznych było określenie wpływu kątów α i β na dokładność wykonania kul. Na rys. 3.19 i 3.20 pokazano widok (w kierunku walcowania) odkuwek otrzymanych w analizowanym procesie WPK. Generalnie zauważa się, że dokładność wykonania kul wewnętrznych (centralnych) jest lepsza niż kul zewnętrznych (skrajnych). Jest to efektem niepożądanego płynięcia metalu w kierunku osiowym, doprowadzającego w konsekwencji do niewypełnienia przez metal wykroju odwzorowującego kształt kuli. Jasnym jest, że odpływ materiału z kuli skrajnej (do odpadu) jest większy niż z kuli centralnej do zewnętrznej.

Z analizy danych zamieszczonych na rys. 3.19 i 3.20 wynika, że dokładność wykonania kul zależy od wartości zastosowanych kątów α i β , charakteryzujących geometrię klina kształtującego. Dla określenia ilościowego dokładności wykonania poszczególnych kul wykonano przekroje poprzeczne (poprowadzone przez ich środek), z których wybrane przedstawiono na rys. 3.21. Przekroje te wprowadzano do programu CAD w celu określenia średnicy kuli. Zauważono przy tym, iż kule walcowane metodą wsteczną praktycznie nie ulegały owalizacji (przekroje mają pożądaną kształt kołowy), co niewątpliwie jest zaletą metody walcowania ze spęczaniem.

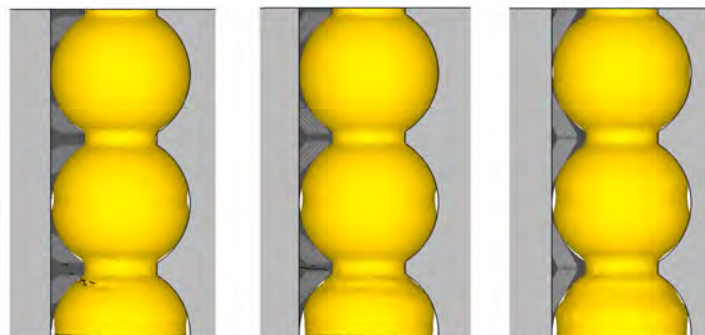
Wyznaczone wymiary średnicowe kul zestawiono w tabeli 3.5. Przyjmując, na podstawie [42], że odchyłka dolna wykonania kuli - przeznaczonej na elementy toczne łożysk - wynosi -0,3 mm, a odchyłka górna 0,7 mm można dokonać oceny dokładności wykonania kul. I tak w przypadku kul centralnych stwierdza się, że zadowalający rezultat uzyskano stosując wszystkie kliny z kątami α równymi 45° i 60° oraz klin z $\beta=2,5^\circ$ i $\alpha=30^\circ$. Natomiast tylko stosowanie klinów o kątach $\beta=2,5^\circ$ oraz $\alpha=45^\circ$ lub 60° gwarantowało uzyskanie kul skrajnych o prawidłowym kształcie.



$\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 45^\circ$

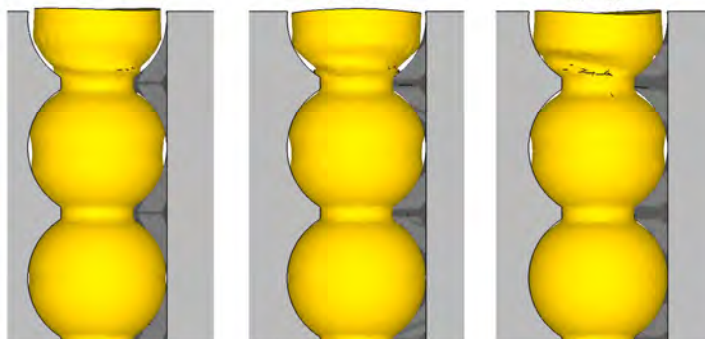
$\alpha = 30^\circ$



$\alpha = 30^\circ$

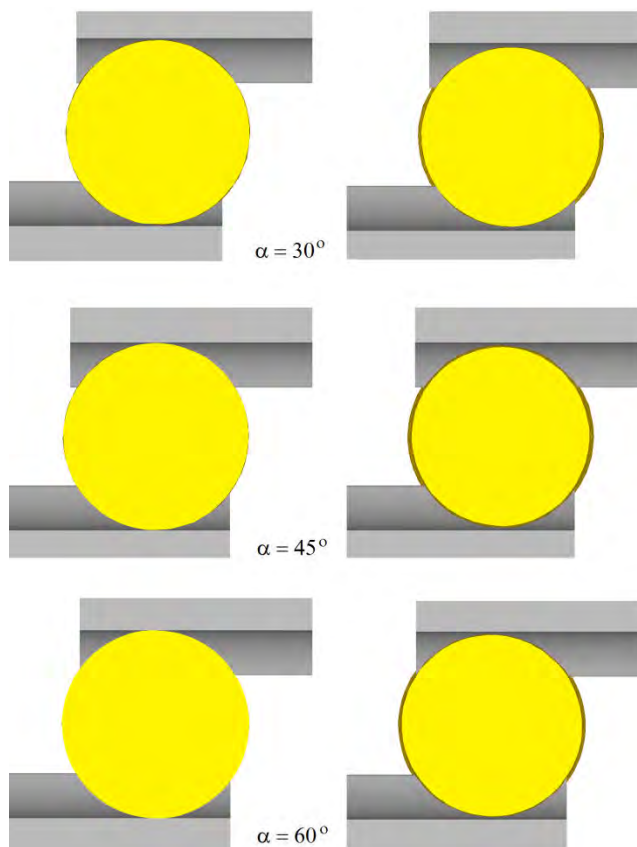
$\alpha = 45^\circ$

$\alpha = 60^\circ$



Rys. 3.19. Widok odkuwek (w kierunku walcowania) otrzymanych w procesach WPK ze spęszczaniem narzędziami klinowymi charakteryzowanymi kątem rozwarcia klina β równym $2,5^\circ$ (wiersz górny) i 3° (wiersz dolny)

Rys. 3.20. Widok odkuwek (w kierunku walcowania) otrzymanych w procesach WPK ze spęzczaniem narzędziami klinowymi charakteryzowanymi kątem rozwarcia klina β równym 4° (wiersz górny) i 5° (wiersz dolny)



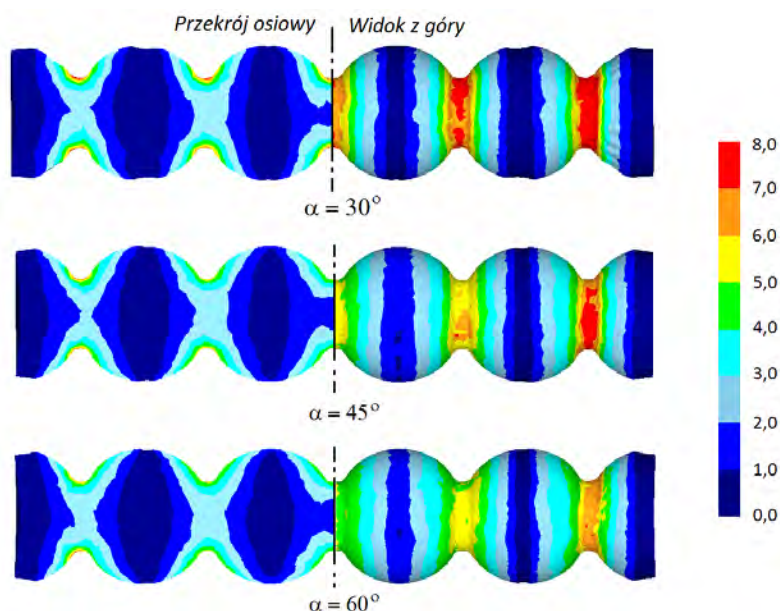
Rys. 3.21. Przekroje poprzeczne kul, centralnej (z lewej) i skrajnej (z prawej), otrzymanych w procesach WPK ze spęszczaniem klinami charakteryzowanymi kątem rozwarcia klina $\beta=3^\circ$ oraz kątem kształtującym α podanym na rysunku

Tab. 3.5. Maksymalne wymiary średnicowe kul, kształtowanych metodą WPK ze spęszczaniem, wyznaczone dla przekroi poprzecznych, z których wybrane pokazano na rys. 3.21

Lp.	Kąt β	Kąt α	Kula centralna	Kula skrajana
1.	$2,5^\circ$	25°	24,84 mm	24,06 mm
2.	$2,5^\circ$	45°	25,23 mm	24,84 mm
3.	$2,5^\circ$	60°	25,28 mm	24,70 mm
4.	3°	25°	24,44 mm	23,84 mm
5.	3°	45°	24,88 mm	23,96 mm
6.	3°	60°	25,06 mm	24,28 mm
7.	4°	25°	24,65 mm	23,64 mm
8.	4°	45°	25,05 mm	24,11 mm
9.	4°	60°	25,11 mm	24,11 mm
10.	5°	25°	24,59 mm	23,65 mm
11.	5°	45°	24,74 mm	23,68 mm
12.	5°	60°	25,05 mm	23,83 mm

Generalnie stwierdzono, że zmniejszanie kąta rozwarcia klina β i zwiększanie kąta kształtującego α sprzyjało poprawie dokładności wykonania kul. Należy przy tym zauważyć, że najlepsze rezultaty dawało zastosowanie narzędzi długich o kątach $\beta = 2,5^\circ$ i $\alpha = 45^\circ$. Jednakże w przypadku produkcji masowej bardziej korzystne jest stosowanie narzędzi krótszych (ze względu na wydajność procesu). W przypadku walcowania kul do młynów, gdzie odchyłki wymiarowe są mniejsze (± 3 mm) można z powodzeniem stosować nawet kliny z kątami rozwarcia β wynoszącymi 5° .

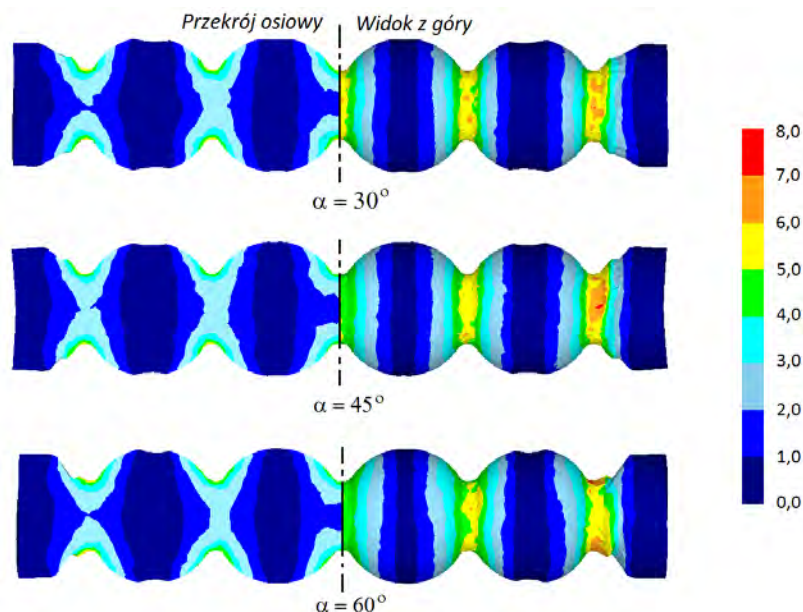
W efekcie wykonanych obliczeń MES wyznaczono także rozkłady intensywności odkształcenia. Przedstawiono je na kolejnych rys. 3.22÷3.23. Zilustrowano przy tym rozkład intensywności odkształcenia zarówno w przekroju wzdłużnym (osiowym) odkuwki, jak i na jej powierzchni. Stwierdzono, że największe odkształcenia występują w miejscach, w których kliny wcinają się w materiał. Ponadto, zauważono, że w obszarze kształtowanego przewężenia odkształcenia mają charakter warstwowy i przyjmują wartości największe przy powierzchni, co jest skutkiem oddziaływania sił tarcia.



Rys. 3.22. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju wzdłużnym i na powierzchni odkuwek otrzymanych w procesie WPK ze speczaniem klinami najdłuższymi, o kącie $\beta = 2,5^\circ$

Analizując wpływ parametrów kątowych narzędzi na rozkład intensywności odkształcenia zauważa się, że zmniejszenie wartości kąta kształtującego α i kąta rozwarcia klina β prowadzi do wzrostu intensywności odkształcenia. Takiego efektu można się było spodziewać. Zmniejszenia kąta β przekłada się bezpośrednio na zwiększenie długości narzędzi, co oznacza, że wzrasta czas oddziaływania na materiał sił stycznych (tarcia) wywołujących płynięcie w kierunku obwodowym (stycznym). Takie płynięcie metalu nie wpływa na zmianę kształtu odkuwki, a jest przyczyną powstawania odkształceń zbędnych. Z kolei zmniejszenie kąta kształtującego α oprócz wydłużenia narzędzi (w mniejszym zakresie niż kąt β) powoduje zwiększenie objętości metalu przemieszczanej w kie-

runku promieniowym, która następnie jest odkształcana przez klin w celu usunięcia owalizacji przekroju poprzecznego.

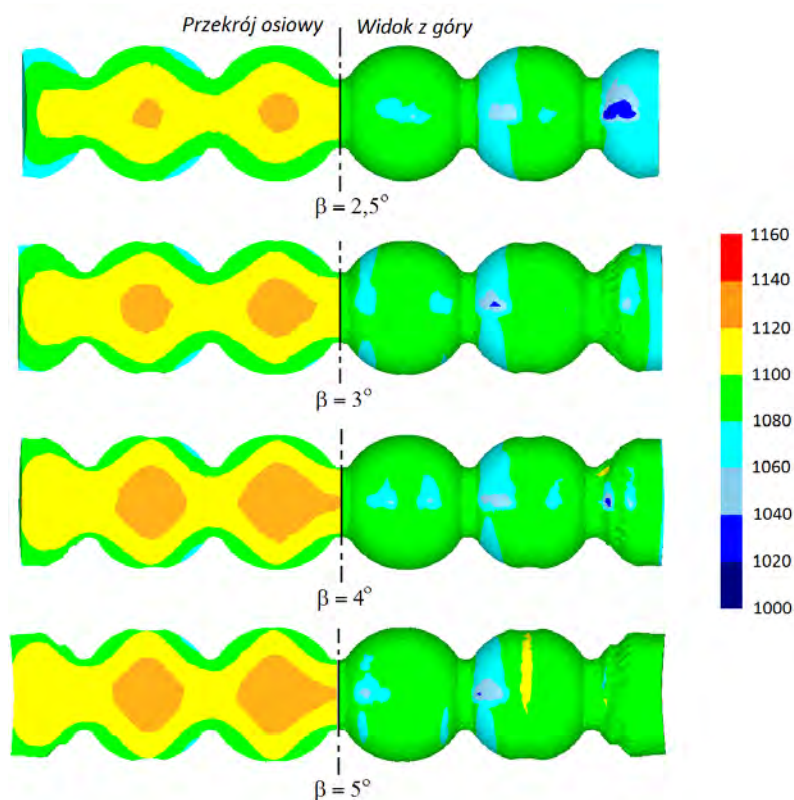


Rys. 3.23. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju wzdłużnym i na powierzchni odkuwek otrzymanych w procesie WPK ze spęczaniem klinami najkrótszymi, o kącie $\beta=5^\circ$

W trakcie procesu walcowania gorący materiał (temperatura wsadu 1150°C) styka się z narzędziami o znacznie niższej temperaturze (150°C). Kontakt ten powoduje, że część ciepła (w drodze wymiany) odprowadzana jest z odkuwki do narzędzi klinowych. W efekcie zmniejsza się temperatura materiału w warstwach przypowierzchniowych. Opisane zjawisko jest dobrze widoczne na rys. 3.18, przedstawiającym przebieg jednego z przeanalizowanych numerycznie przypadków WPK ze spęczaniem. Jednakże pomimo stosunkowo długiego czasu procesu spadek temperatury nie jest znaczny i materiał ciągle ma temperaturę właściwą dla procesów obróbki plastycznej na gorąco. Jest to skutkiem dużych ilości ciepła generowanych w trakcie walcowania (w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia), które częściowo rekompensują ciepło odprowadzane do narzędzi. Ponadto, w drodze przewodzenia następuje przepływ ciepła z obszarów materiału o większej temperaturze do tych miejsc, w których temperatura jest mniejsza.

Zmiana temperatury w wyrobach walcowanych zależy również od zastosowanych parametrów kątowych narzędzi klinowych. O wpływie kątów α i β na rozkłady temperatury materiału można wnioskować w oparciu o dane przedstawione na kolejnych rysunkach 3.24 i 3.25.

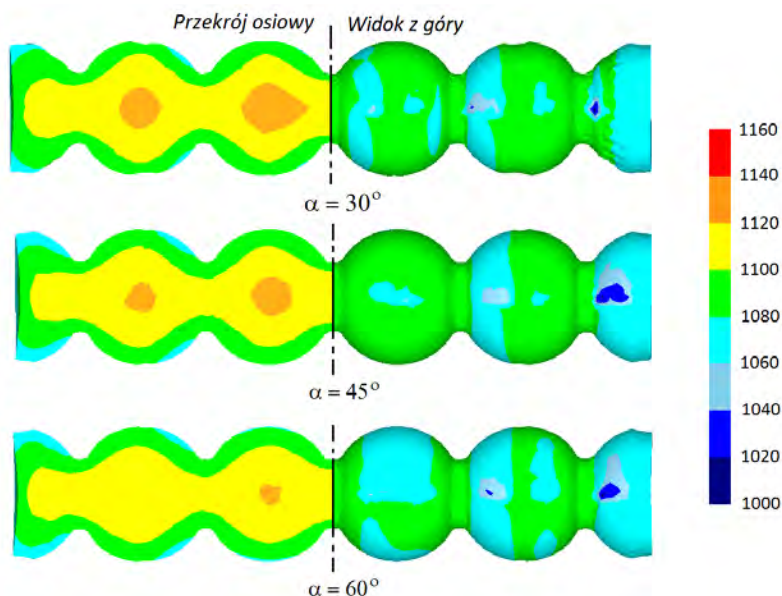
Zmniejszenie kąta rozwarcia klina β powoduje, że wewnątrz odkuwki zmniejsza się temperatura. Jest to efektem dłuższego czasu, w którym przebiega kształtowanie i występuje możliwość odprowadzenia większych ilości ciepła ze stref centralnych (osiowych) do stref zewnętrznych, w których ma miejsce kontakt metalu z narzędziami.



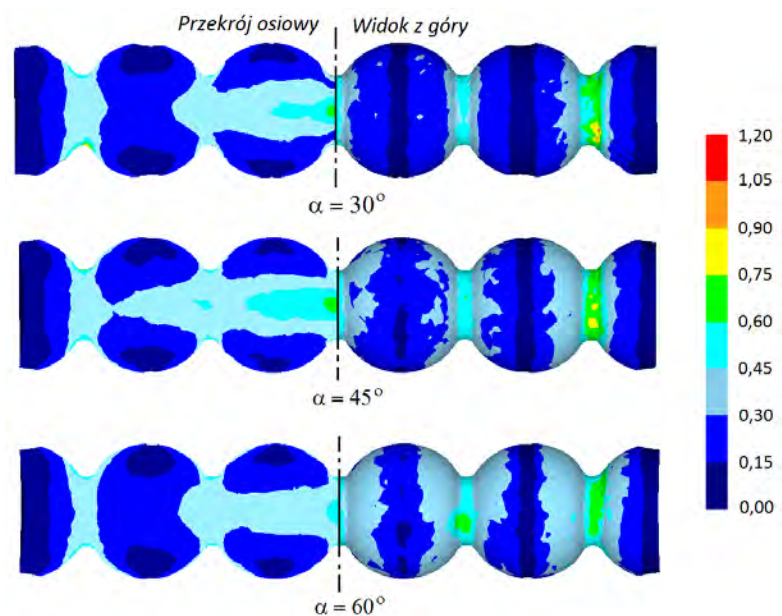
Rys. 3.24. Wpływ kąta rozwarcia klina β na rozkład temperatury (w °C) w przekroju wzdłużnym oraz na powierzchni próbek kształtowanych metodą WPK ze spęczaniem, przy stałej wartości kąta kształtującego $\alpha = 45^\circ$

Z kolei zmniejszenie kąta kształtującego α wywołuje efekt przeciwny. Stosowanie mniejszych kątów α pociąga za sobą wzrost obszarów, w których materiał ma temperaturę większą. Efekt ten należy tłumaczyć zwiększonym płynięciem materiału w kierunku osiowym, powodującym przyrost pracy odkształcenia plastycznego (zamienianej na ciepło). Większe są również obszary intensywnego działania sił tarcia, których praca również zamieniana jest na ciepło.

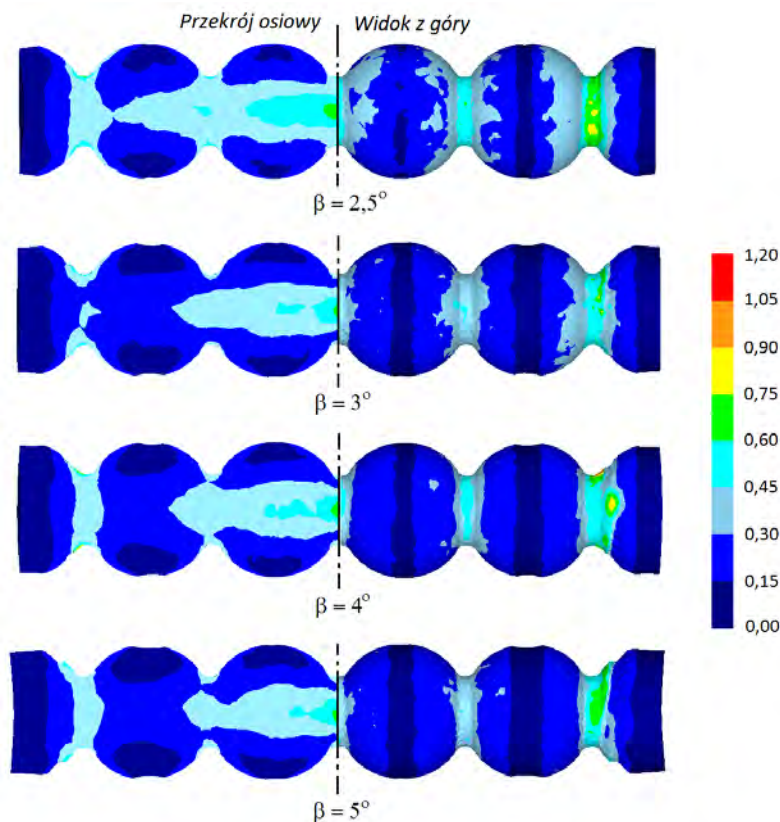
Zastosowanie metody elementów skończonych umożliwiło również wyznaczenie funkcji zniszczenia, liczonej według z kryterium energetycznego Cockrofta-Lathama. Zgodnie z wynikami wcześniej wykonanych prac badawczych, w przypadku stali w gatunku 100Cr6 kształtowanej na gorąco, z pękaniem materiału możemy mieć do czynienia, gdy wartość funkcji (całki) zniszczenia przekroczy wartość graniczną równą 0,6. Jak wynika z rozkładów pokazanych na rys. 3.26 i 3.27 taka sytuacja praktycznie nie ma miejsca w analizowanych procesach WPK. Zatem można stwierdzić, że w rozpatrywanych procesach WPK ze spęczaniem nie powinno dochodzić do pęknięcia materiału.



Rys. 3.25. Wpływ kąta kształtującego α na rozkład temperatury (w $^{\circ}\text{C}$) w przekroju wzdłużnym oraz na powierzchni próbek kształtowanych metodą WPK ze spęszczaniem, przy stałej wartości kąta rozwarcia klina $\beta = 2,5^{\circ}$



Rys. 3.26. Wpływ kąta kształtującego α na rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Latham) w przekroju wzdłużnym oraz na powierzchni próbek kształtowanych metodą WPK ze spęszczaniem, przy stałej wartości kąta rozwarcia klina $\beta = 2,5^{\circ}$

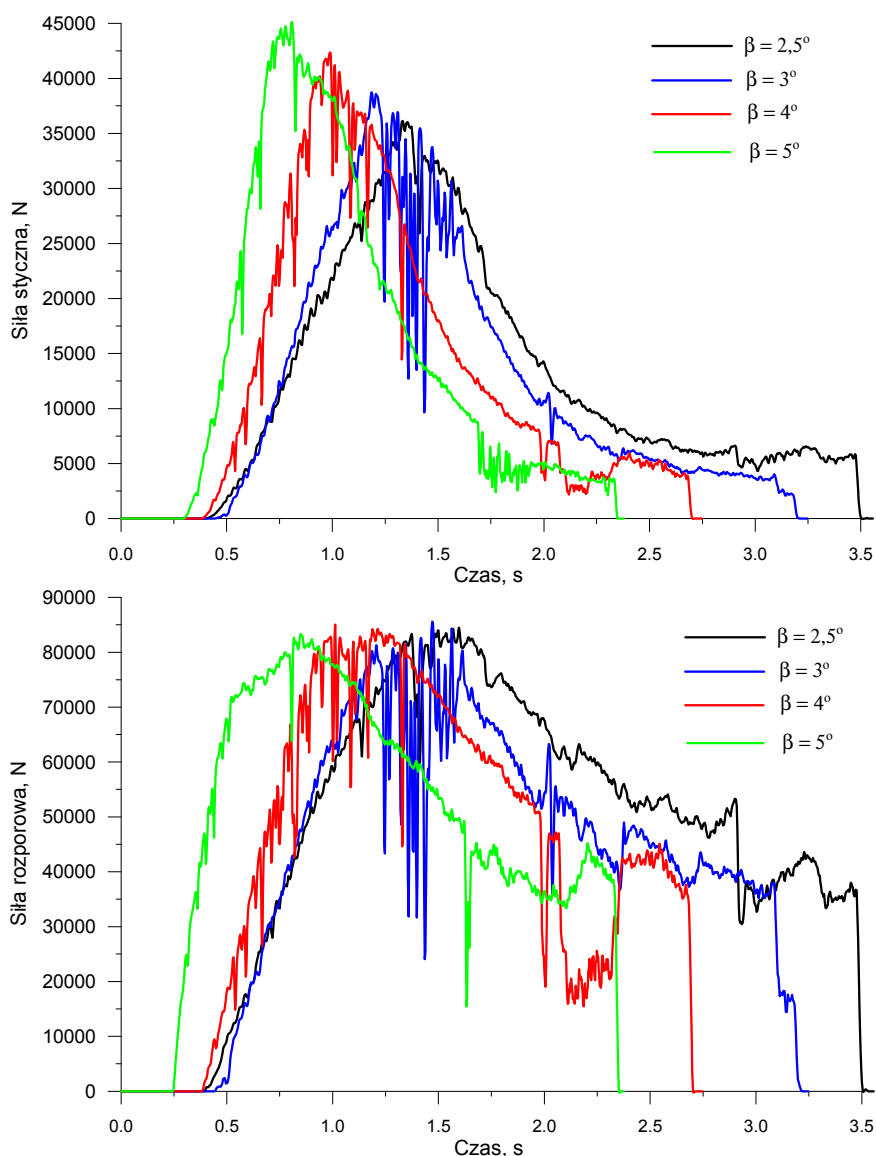


Rys. 3.27. Wpływ kąta rozwarcia klina β na rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w przekroju wzdłużnym oraz na powierzchni próbek kształtowanych metodą WPK ze spęszczaniem, przy stałej wartości kąta kształtującego $\alpha = 45^\circ$

Odnosnie wpływu kąta rozwarcia klina β na wartość funkcji zniszczenia (rys. 3.27) należy podać, że zmniejszenie β zwiększa wielkość obszarów, w których funkcja ta ma większe wartości. Jest to prawdopodobnie wywołane wzrostem ilości cykli odkształcenia niezbędnych do ukształtowania odkuwki, przekładających się bezpośrednio na ilość zmieniających się stanów naprężenia (ze ściskających na rozciągające i odwrotnie), doprowadzających do powstania pęknięcia o charakterze zmęczeniowym. W przypadku kąta kształtującego α nie można już mówić o jednoznacznym wpływie tego parametru na rozkład funkcji zniszczenia. W wyniku obliczeń stwierdzono, że stosowanie narzędzi z kątami $\alpha=45^\circ$ (z grupy analizowanych wartości tego parametru) powoduje zwiększenie obszarów materiału, w których funkcja ta ma większe wartości (nieprzekraczające jednak wartości granicznej).

W procesach WPK ze spęszczaniem siły kształtowania (rys. 3.28 i 3.29) rozkładają się inaczej niż podczas walcowania metodą zwykłą. I tak siła styczna (wciskająca klin) wzrasta szybko do wartości maksymalnej, którą przyjmuje w momencie, gdy narzędzia wetną się w materiał na maksymalną głębokość. Następnie równie gwałtownie siła ta spada, by ostatecznie przyjąć względnie stałą wartość w fazie kalibrowania. Podobny rozkład

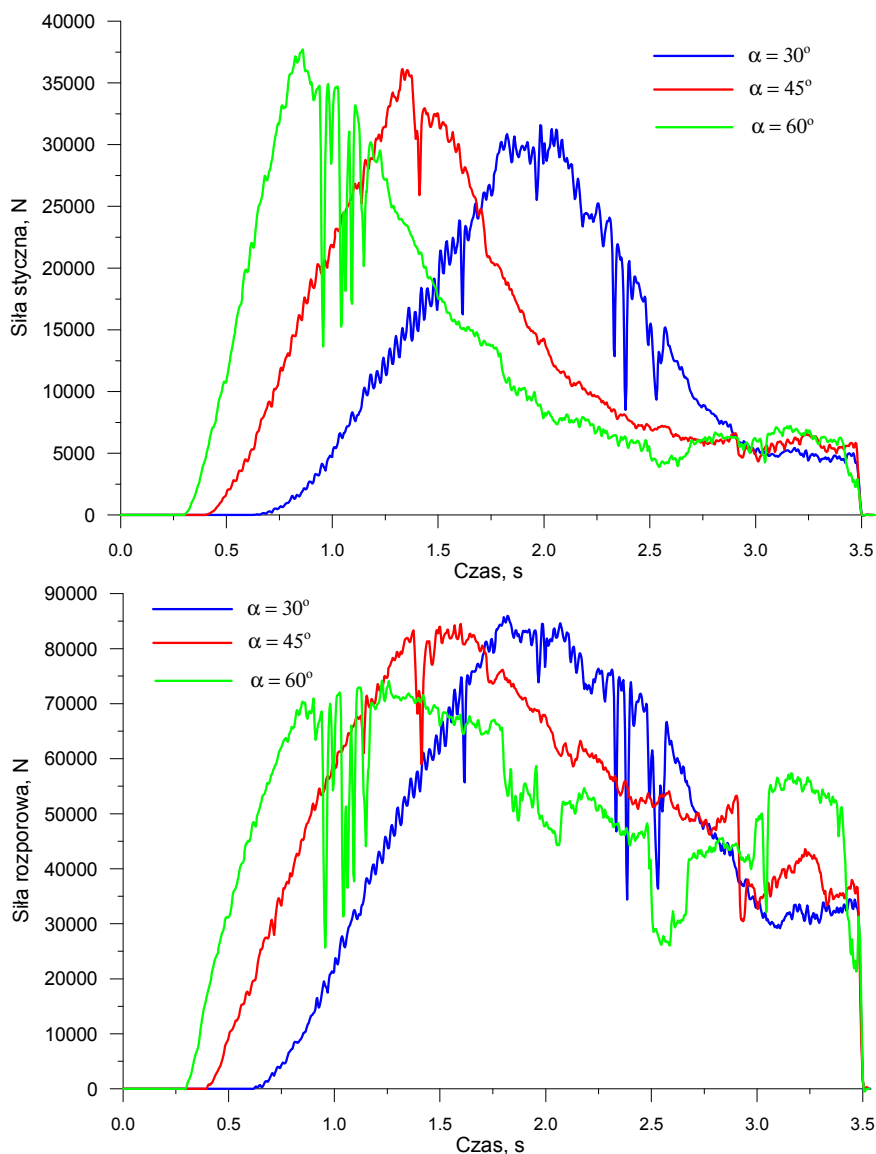
ma siła rozporowa. Jednakże w jej przypadku spadek siły od wartości maksymalnej nie jest już tak intensywny. Widoczne jest również, że siły rozporowe są około dwóch razy większe od siły stycznej.



Rys. 3.28. Rozkłady sił w procesie WPK ze spęczaniem, realizowanym przy kącie kształtującym $\alpha=45^\circ$ oraz kącie β podanym na rysunku

Korzystając z rys. 3.28 można prześledzić wpływ kąta rozwarcia klina β na wartości sił kształtowania. Widoczne jest, że zmniejszenie kąta β powoduje zmniejszenie siły stycznej i jednocześnie nie wywiera wpływu na wartość maksymalną siły rozporowej.

Można zatem stwierdzić, że zmiana kąta β nie będzie miała wpływu na tolerancje wykonawcze oduwek, gdyż odkształcenie sprężyste korpusu walcarki (przekładające się na odchyłki) będzie jednakowe.



Rys. 3.29. Rozkłady sił w procesie WPK ze spęczaniem, realizowanym przy kącie rozwarcia klina $\beta=2,5^\circ$ oraz kącie kształtującym α podanym na rysunku

Natomiast na podstawie rys. 3.29 można wnioskować o wpływie kąta kształtującego α na wielkość sił w procesie WPK ze spęczaniem. Widoczne jest, że zwiększanie kąta α powoduje zmniejszenie siły rozporowej i zwiększenie siły stycznej. Przypuszcza się, że za

wzrost siły rozporowej odpowiada zwiększenie powierzchni styku materiał - narzędzie, na którą działają naciski kontaktowe. Natomiast zmniejszenie siły stycznej jest efektem mniej intensywnego wcinania się narzędzia klinowego w materiał (wydłuża się strefa wcinania), które zawsze towarzyszy zmniejszeniu w procesie WPK wartości kąta α lub β . Można zatem wnioskować, że stosowanie narzędzi o większych kątach α będzie z korzyścią dla dokładności (tolerancji) wykonania odkuwki, kształtowanej metodą WPK ze spęczaniem.

W ramach analizy numerycznej badano także, jak zmienia się w trakcie procesu WPK praca wykonywana przez jedno z narzędzi kształtujących. Zauważono, że największy przyrost pracy następował w czasie, gdy narzędzia wcinają się w materiał. W tej chwili procesu maksymalne wartości osiągała siła styczna, i wymagana była największa moc walcarki.

Ilościowej oceny na temat wpływu parametrów kątowych (α i β) na wielkość pracy wykonywanej przez narzędzie kształtujące można dokonać analizując dane zestawione w tabeli 3.6. Uogólniając można stwierdzić, że zwiększenie kąta kształtującego α oraz zmniejszenie kąta rozwarcia klina β powoduje wzrost pracy wykonywanej przez narzędzie klinowe.

Tab. 3.6. Praca wykonana przez narzędzie klinowe w analizowanych numerycznie przypadkach WPK ze spęczaniem

Lp.	Kąt β	Kąt α	Praca wykonana przez klin
1.	2,5°	25°	3840,2 J
2.	2,5°	45°	4253,7 J
3.	2,5°	60°	4288,8 J
4.	3°	25°	3283,1 J
5.	3°	45°	3710,2 J
6.	3°	60°	3740,2 J
7.	4°	25°	3402,1 J
8.	4°	45°	3568,0 J
9.	4°	60°	3692,4 J
10.	5°	25°	3402,9 J
11.	5°	45°	3518,1 J
12.	5°	60°	3722,7 J

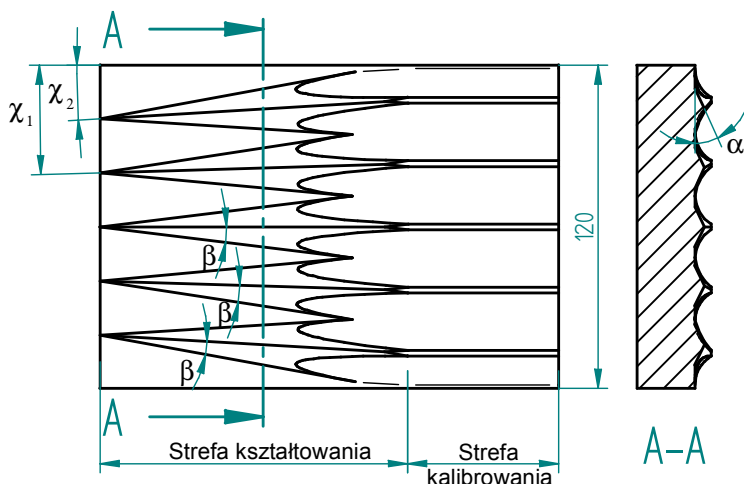
3.3. WPK metodą równoległą

Narzędzia zabezpieczające proces WPK metodą równoległą mają bardziej skomplikowaną budowę niż w dwóch rozważanych uprzednio metodach. Ich wykonawstwo wymaga zastosowania obrabiarek sterowanych numerycznie, co bez wątpienia zwiększa koszty wykonawcze.

W procesie WPK metodą równoległą średnica wsadu jest mniejsza niż podczas walcowania metodą zwykłą (redukcji średnic) i jednocześnie większa niż w procesie WPK ze spęczaniem. Na potrzeby bieżącej analizy przyjęto, że średnica ta wynosić będzie 22,8 mm (w przypadku kul $S\varnothing 25$ mm dobrana średnica powinna mieścić się w przedziale od 21,55 mm do 25 mm).

W rozważanym procesie WPK kliny wcinają się jednocześnie w materiał, który podlega płynięciu również w kierunku osiowym. To płynięcie materiału musi być uwzględnione w konstrukcji kolejnych klinów, które nachylone są do kierunku przemieszczania narzędzi pod kątem zwiększającym się wraz z oddalaniem się od centrum odkuwki (wynika to z konieczności uwzględnienia płynięcia osiowego materiału w strefie centralnej).

Kształt klinów w procesie WPK metodą równoległą opisany jest trzema kątami: rozwarcia klina β , kształtującym α i nachylenia klina χ do osi walcowania – pokazanymi schematycznie na rys. 3.30. Wartości kątów α i β dobierane są w sposób analogiczny jak w procesie WPK metodą zwykłą. Natomiast wartość kąta χ wynika z wydłużania się odkuwki w jej strefie centralnej (kąt ten zwiększa się z oddaleniem klinów od środka narzędzia, $\chi_1 < \chi_2$).



Rys. 3.30. Widok ogólny klina zabezpieczającego proces WPK metodą równoległą, z zaznaczonymi ważniejszymi parametrami

W ramach analizy procesu walcowania kul metodą równoległą rozważono 9 przypadków kształtowania, bazujących na takim samym wsadzie o średnicy $\varnothing 22,8$ mm, w których wykorzystano narzędzia o parametrach kątowych podanych w tab. 3.7. Podobnie jak w poprzednio analizowanych przypadkach kliny w części wejściowej miały wykonane nacięcia technologiczne (dla zapobiegania niekontrolowanemu poślizgowi), a ostre krawędzie zostały zaokrąglone.

W obliczeniach przyjęto, że proces kształtowania przebiega zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3.31. Uwzględniono symetrię procesu oraz przyjęto parametry identyczne, jak we wcześniej rozważanych przypadkach WPK, realizowanych metodami zwykłą i ze spęczaniem.

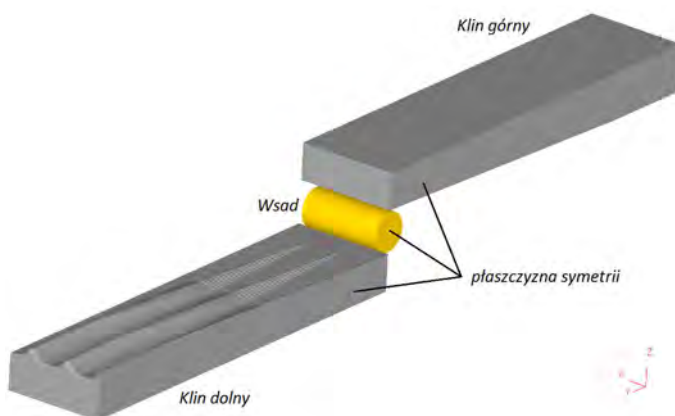
W efekcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że w siedmiu (z 9 rozważonych) przypadkach WPK kształtowanie przebiega w sposób prawidłowy. Odkuwka obraca się wówczas pewnie i nie ma miejsca niekontrolowany poślizg – rys. 3.32. Takie zakłócenie stabilności WPK odnotowano w dwóch z rozważanych przypadków, w których zastosowano narzędzia o parametrach: $\beta=9^\circ$ i $\alpha=25^\circ$ oraz $\beta=9^\circ$ i $\alpha=30^\circ$. Ciekawostką jest, że dla pierw-

szej przytoczonej pary kątów iloczyn ich tangensów wynosi 0,0738 i jest mniejszy od wartości maksymalnej (0,08), zalecaniej do stosowania w procesach WPK metodą zwykłą.

Tab. 3.7. Parametry kątowe narzędzi klinowych, przyjęte w analizie procesu WPK kul metodą równoległą

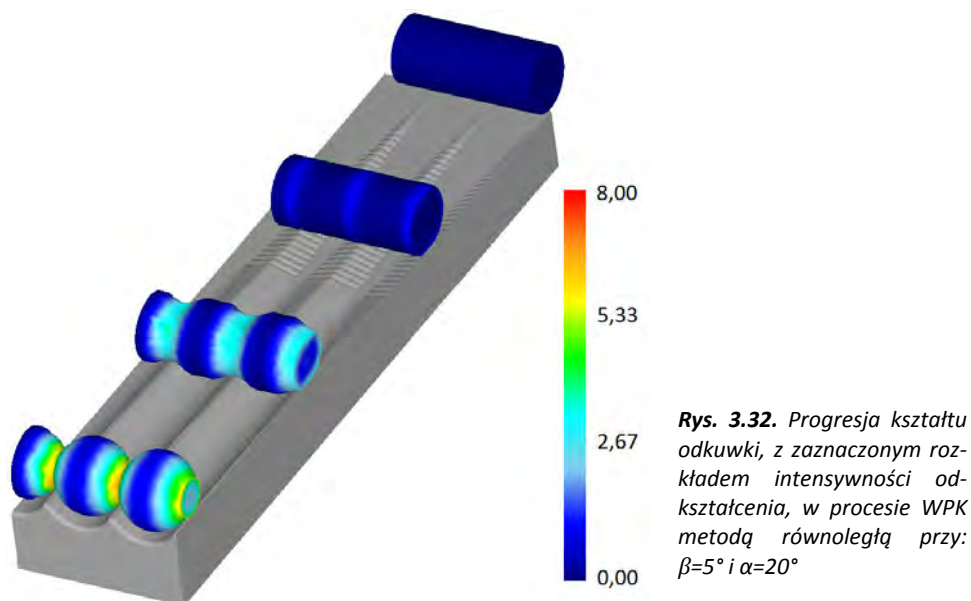
Lp.	Kąt rozwarcia klina β	Kąt kształtujący α	$\text{tg}\alpha \text{ tg}\beta$
1.	5°	20°	0,0318
2.	5°	25°	0,0408
3.	5°	30°	0,0505
4.	7°	20°	0,0447
5.	7°	25°	0,0572
6.	7°	30°	0,0709
7.	9°	20°	0,0576
8.	9°	25°	0,0738
9.	9°	30°	0,0914

Rys. 3.31. Model geometryczny procesu WPK kul metodą równoległą, wykorzystujący symetrię procesu



Podobnie jak w poprzednio rozważanych przypadkach WPK głównym celem analizy było oszacowanie dokładności wykonania kul. Na rys. 3.33 zestawiono widoki (w kierunku walcowania) wszystkich odkuwek uzyskanych w procesach stabilnych. Widoczne jest, że w każdym z nich materiał dokładnie wypełnił wykroje i nie mają miejsca niedowalcowania, zauważone w procesie WPK ze spęczaniem. Wręcz przeciwnie w analizowanych przypadkach może mieć dochodzić do przepełnienia wykrojów, skutkującego nadmierną owalizacją przekroju poprzecznego.

Celem stwierdzenia dokładności walcowania kul wykonano ich przekroje poprzeczne, z których wybrane przedstawiono na rys. 3.34. Analiza kształtu uzyskanych przekroi wykazała, że lepiej wykonane są kule skrajne. Mają one mniej zowalizowany przekrój poprzeczny, co jest następstwem odpływu materiału (zamkniętego w wykroju skrajnym) do odpadu bocznego. Natomiast kule centralne są mocno zowalizowane, a poprawa ich wykonania wymaga wręcz przekonstruowania narzędzi (klinów) w taki sposób, by zmniejszona była objętość metalu zamykanego w wykrojach centralnych.

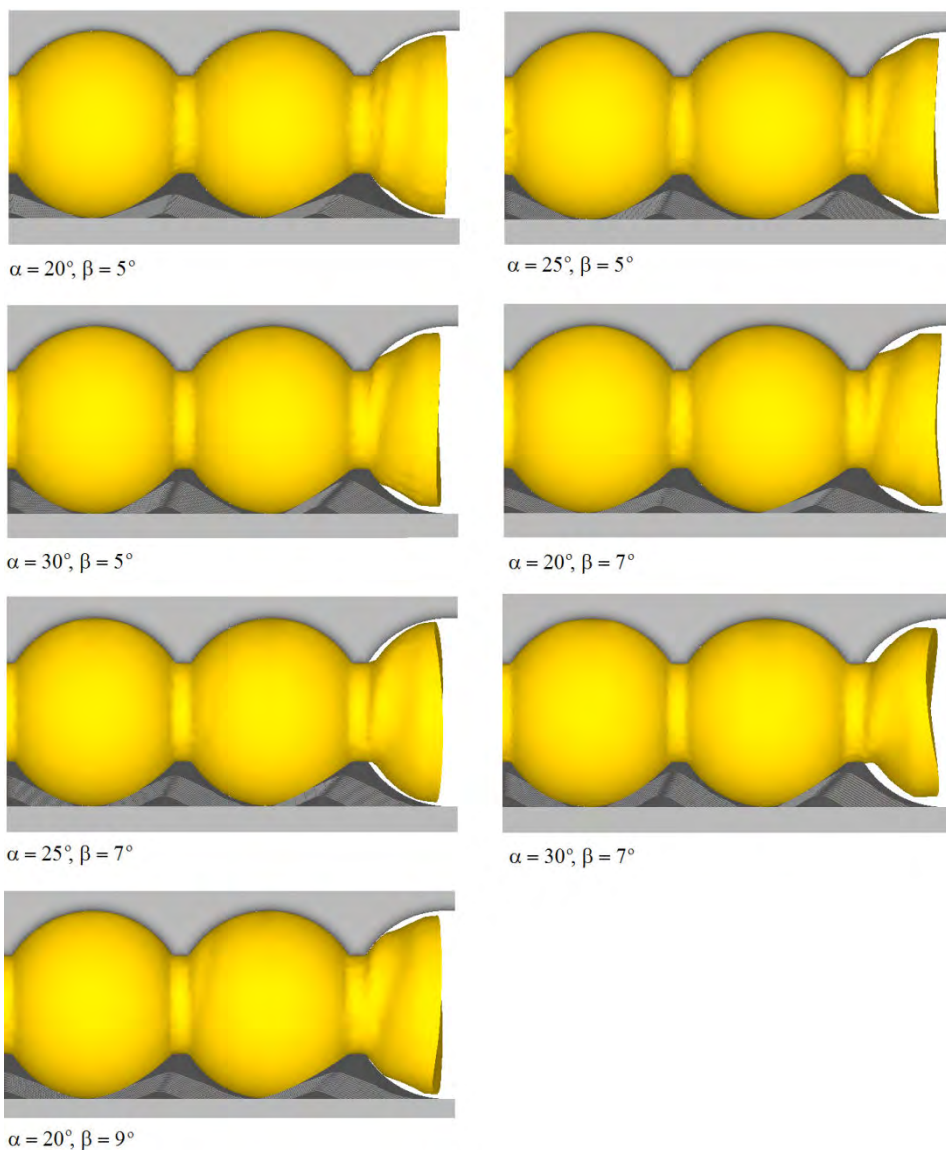


Dla ilościowej oceny dokładności wykonania kul w tablicy 3.8 zestawiono wartości parametru owalizacji Δd , określanego zgodnie z zależnością 3.1. Niezbędne do wyznaczenia Δd wymiary wyznaczono w programie Solid Edge, do którego wczytano wyniki z obliczeń MES. Stwierdzono, że z grupy rozważanych narzędzi najlepsze rezultaty otrzymuje się podczas kształtowania realizowanego przy: $\beta=7^\circ$ oraz $\alpha=25^\circ$ lub 30° .

Tab. 3.8. Wartości parametru owalizacji Δd dla kul kształtowanych metodą zwykłą WPK, wyznaczone dla przekroi poprzecznych, z których wybrane pokazano na rys. 3.34

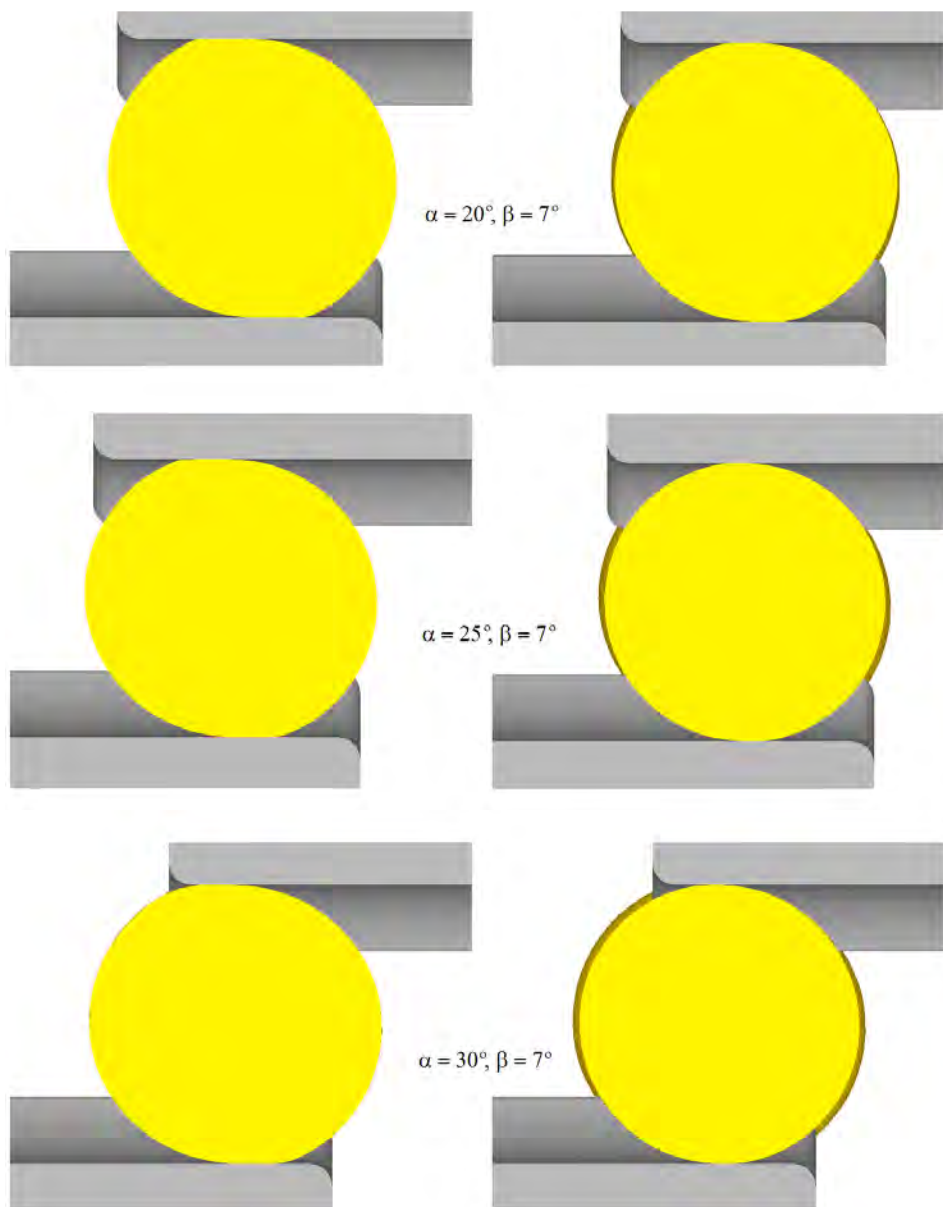
Lp.	Kąt β	Kąt α	Δd Kula centralna	Δd Kula skrajana
1.	5°	20°	1,14 mm	0,67 mm
2.	5°	25°	1,52 mm	1,04 mm
3.	5°	30°	1,99 mm	0,85 mm
4.	7°	20°	1,73 mm	0,46 mm
5.	7°	25°	1,24 mm	0,13 mm
6.	7°	30°	1,11 mm	0,23 mm
7.	9°	20°	1,64 mm	0,32 mm
8.	9°	25°	Niekontrolowany poślizg	
9.	9°	30°	Niekontrolowany poślizg	

Oprócz analizy dokładności wykonania odkuwek dokonano również oceny wpływu parametrów kątowych narzędzi na intensywność odkształcenia, funkcję zniszczenia i temperaturę wyrobu kształtowanego.



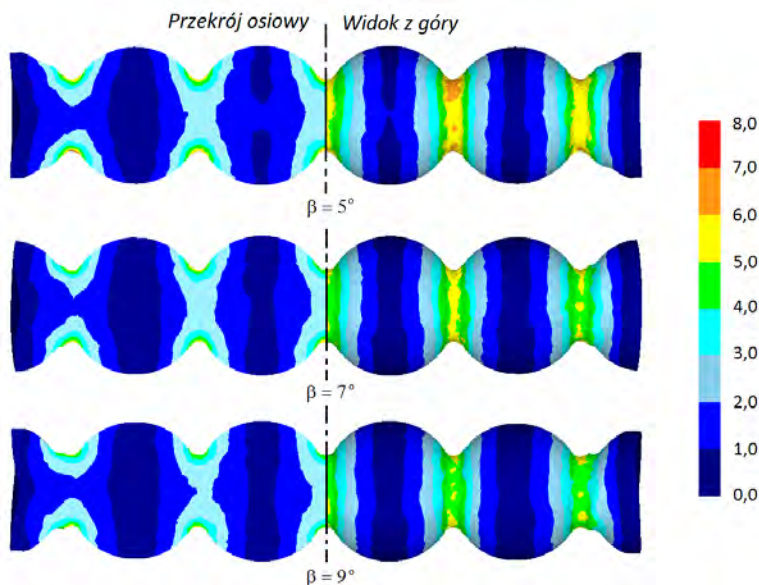
Rys. 3.33. Widok odkuwek (w kierunku walcowania) otrzymanych w rozważanych procesach WPK metodą równoległą

Na rys. 3.35 i 3.36 przedstawiono mapy intensywności odkształcenia, uzależnione od wartości zastosowanego kąta rozwarcia klina β (rys. 3.35) oraz kąta kształtującego α (rys. 3.36). Widoczne jest, że materiał najintensywniej płynie w obszarze kształtowanych przewężeń. Odnotowane odkształcenie ma charakter warstwowy (w kształcie klepsydry). Największe odkształcenia występują przy powierzchni, a najmniejsze w strefie osiowej odkuwki. Taki rozkład odkształceń jest typowy dla procesów walcowania poprzeczno-klinowego.

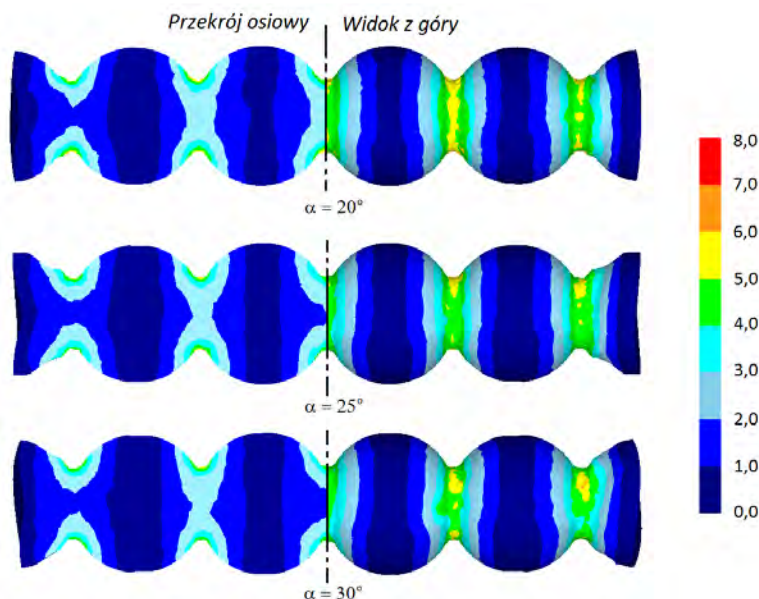


Rys. 3.34. Przekroje poprzeczne kul centralnych (kolumna po lewej) i skrajnych (kolumna po prawej), otrzymanych w procesie WPK metodą równoległą klinami o kącie $\beta=7^\circ$

Zmiana parametrów kątowych narzędzi tylko w nieznacznym stopniu wpływa na wartość maksymalnych odkształceń (charakter rozkładu w ogóle nie ulega zmianie). Odkształcenia te zwiększają się wraz ze zmniejszeniem kąta rozwarcia klina β (wydłużenie narzędzi) oraz kąta kształtującego α (mniejsze rozciąganie w kierunku osiowym). Jednak wpływ kątów α i β na rozkład intensywności odkształcenia z praktycznego punktu widzenia należy uznać za nieistotny.



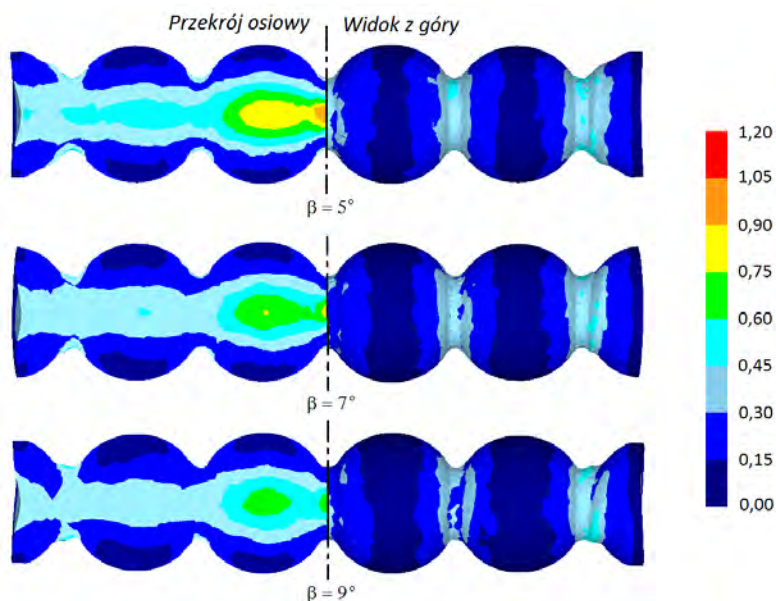
Rys. 3.35. Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwkach ukształtowanych metodą równoległą WPK, przy stałym kącie kształtującym $\alpha=20^\circ$



Rys. 3.36. Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwkach ukształtowanych metodą równoległą WPK, przy stałym kącie rozwarcia klina $\beta=7^\circ$

Na rys. 3.37 i 3.38 pokazano rozkłady funkcji zniszczenia (według kryterium Cockrofta-Lathama) w wyrobach walcowanych. Rozkład funkcji zniszczenia w odkuwkach nie

odbiega znacząco od tego, jaki uzyskano w procesach WPK ze spęszaniem (rys. 3.26 i 3.27). Duże wartości funkcja zniszczenia przyjmuje w warstwach centralnych (osiowych) podlegających naprzemiennemu oddziaływaniu naprężeń rozciągających i ściskających. Co ciekawe wartość maksymalną funkcja zniszczenia przyjmuje w środku kuli centralnej, gdzie materiał nie podlega dużym odkształceniom plastycznym. Tam też występuje niebezpieczeństwo pęknięcia metalu, które stanowi realne zagrożenie przy kształtowaniu narzędziami z kątami $\beta=5^\circ$ i $\alpha=20^\circ$.

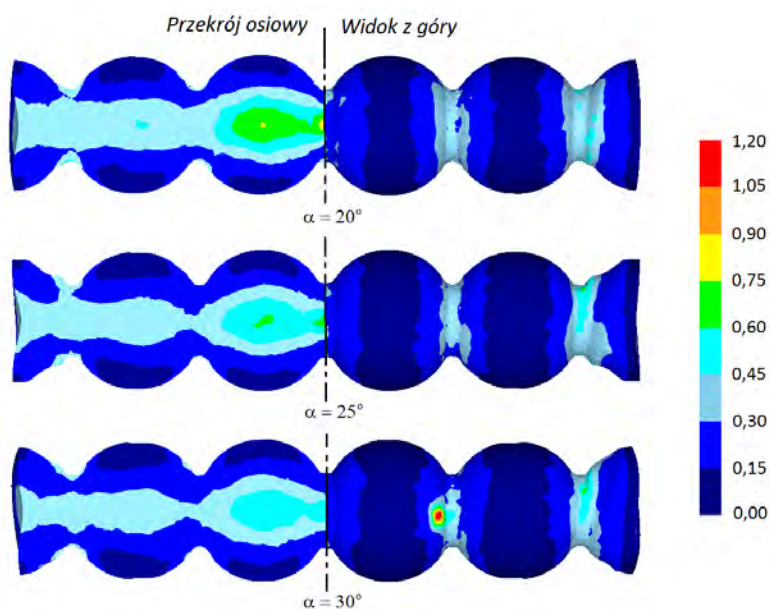


Rys. 3.37. Rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwkach ukształtowanych metodą równoległą WPK, przy stałym kącie kształtującym $\alpha=20^\circ$

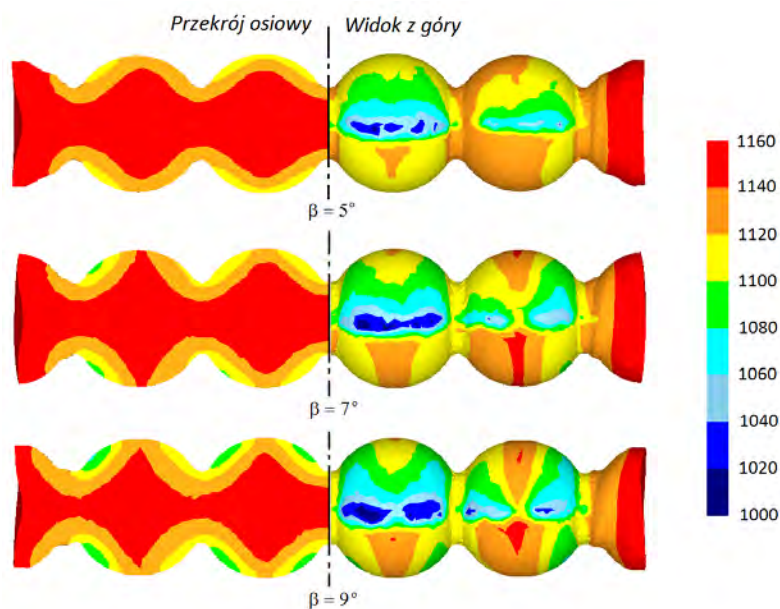
Oceniając wpływ kątów narzędzi na rozkłady funkcji zniszczenia stwierdza się, że jest on istotny. Zmniejszenie kąta rozwarcia klina β powoduje wzrost funkcji zniszczenia, prawdopodobnie w następstwie zwiększenia ilości cykli odkształcenia, którym podlega materiał podczas walcowania. Podobny efekt przynosi stosowanie narzędzi z mniejszymi kątami kształtującymi α . W tym przypadku przyczyną wzrostu funkcji zniszczenia jest zwiększenie naprężeń w strefie osiowej odkuwek.

Podobnie jak w poprzednio rozważanych przypadkach WPK podczas walcowania metodą równoległą materiał utrzymuje temperaturę właściwą dla obróbki plastycznej na gorąco (rys. 3.39 i 3.40). Rdzeń wyrobów ukształtowanych ma temperaturę na poziomie temperatury wsadu (1150°C). Ochłodzeniu podlegają warstwy zewnętrzne odkuwek, kontaktujące się z narzędziami.

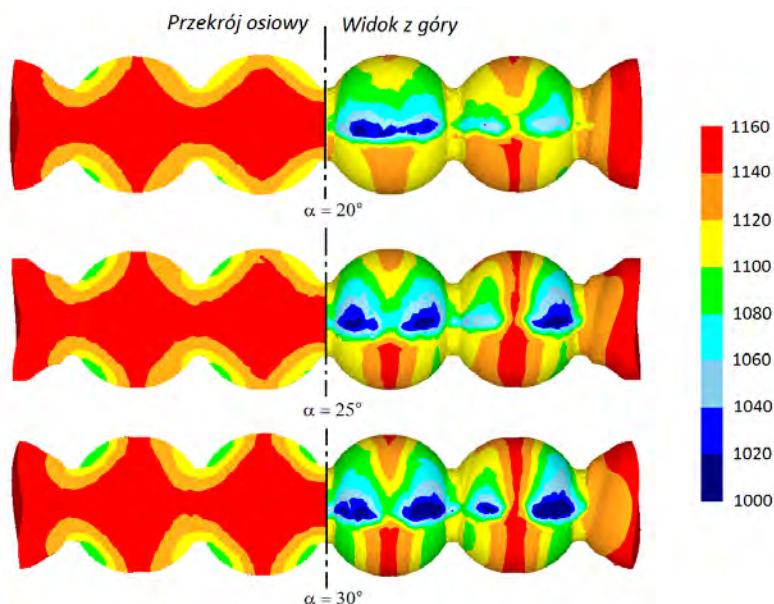
Odnosnie wpływu parametrów narzędzi na temperaturę można podać, że stosowanie klinów z mniejszymi kątami β i α powoduje, że spadek temperatury metalu w warstwach przypowierzchniowych jest mniejszy. Jednak z praktycznego punktu widzenia wpływ tych parametrów na rozkład temperatury jest pomijalny.



Rys. 3.38. Rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Lathama) w odkuwkach ukształtowanych metodą równoległą WPK, przy stałym kącie rozwarcia klina $\beta=7^\circ$



Rys. 3.39. Rozkład temperatury (w $^\circ\text{C}$) w odkuwkach ukształtowanych metodą równoległą WPK, przy stałym kącie kształtującym $\alpha=20^\circ$

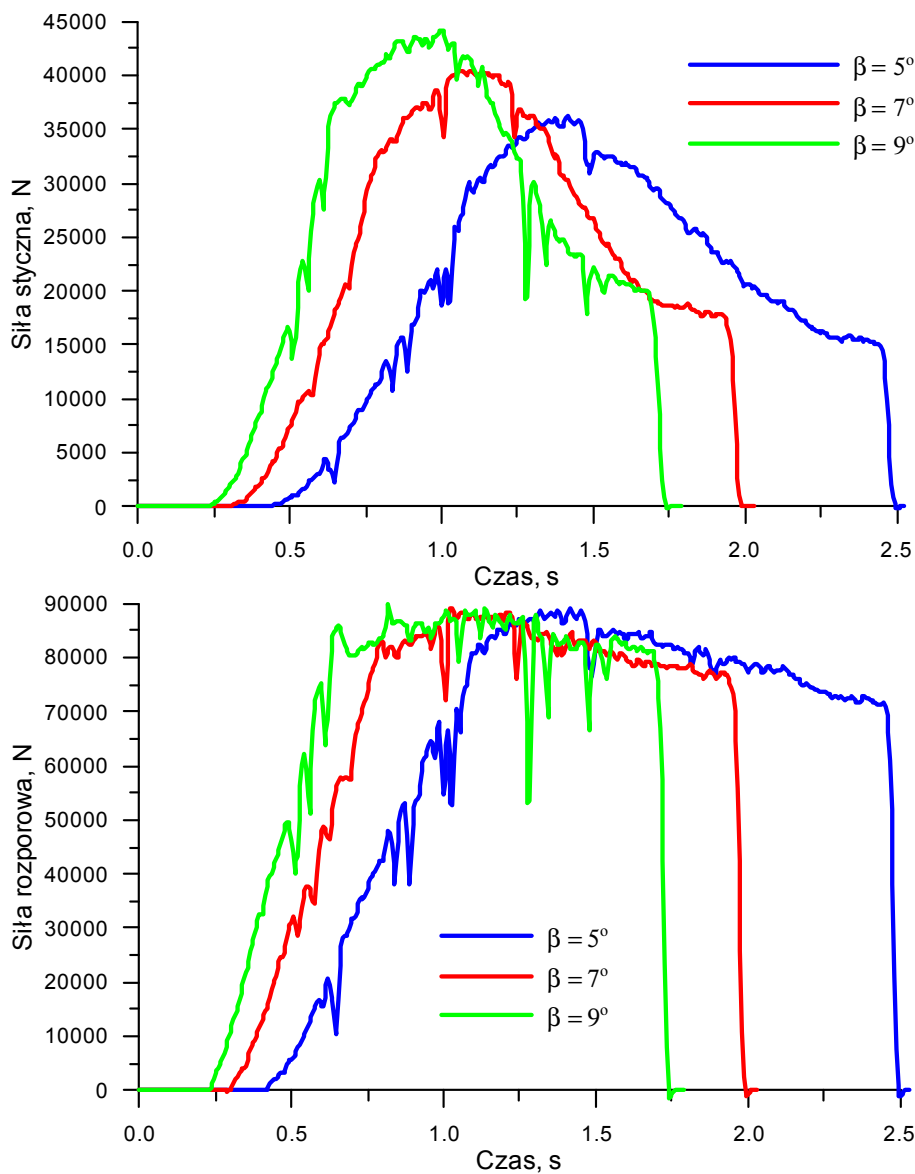


Rys. 3.40. Rozkład temperatury (w $^\circ\text{C}$) w odkuwkach ukształtowanych metodą równoległą WPK, przy stałym kącie rozwarcia klina $\beta=7^\circ$

Na kolejnych rysunkach 3.41 i 3.42 przedstawiono rozkłady składowych stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (decydującej o dokładności kształtowania). Obie składowe w sposób monotoniczny zwiększają się w strefie wcinania klinów w materiał i przyjmują wartości największe w momencie przejścia do fazy kalibrowania. Następnie siła styczna wyraźnie zmniejsza swą wartość (o ok. 50%), a siła rozporowa praktycznie nie ulega zmianie. Wartość maksymalnej siły stycznej jest około dwukrotnie mniejsza od siły rozporowej (dla typowych procesów WPK ta relacja wynosi zwykle 1:4).

Odnosnie wpływu parametrów kątowych na wartość maksymalną sił można stwierdzić, że jest on pomijalny w przypadku składowej rozporowej. Zatem można ocenić, że odchyłki wykonawcze wyrobów (wynikające z relacji siły rozporowej do sztywności maszyny kuźniczej) będą takie same, przy różnych klinach. Natomiast wyraźnie widać, że zwiększenie kątów rozwarcia klina β i kształtującego α powoduje zwiększenie składowej stycznej siły walcowania, decydującej o mocy walcarki kuźniczej. Niestety, analizowanych przypadków WPK metodą równoległą nie będzie można zrealizować w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej, gdyż siły styczne przyjmują wartości większe niż 30 kN.

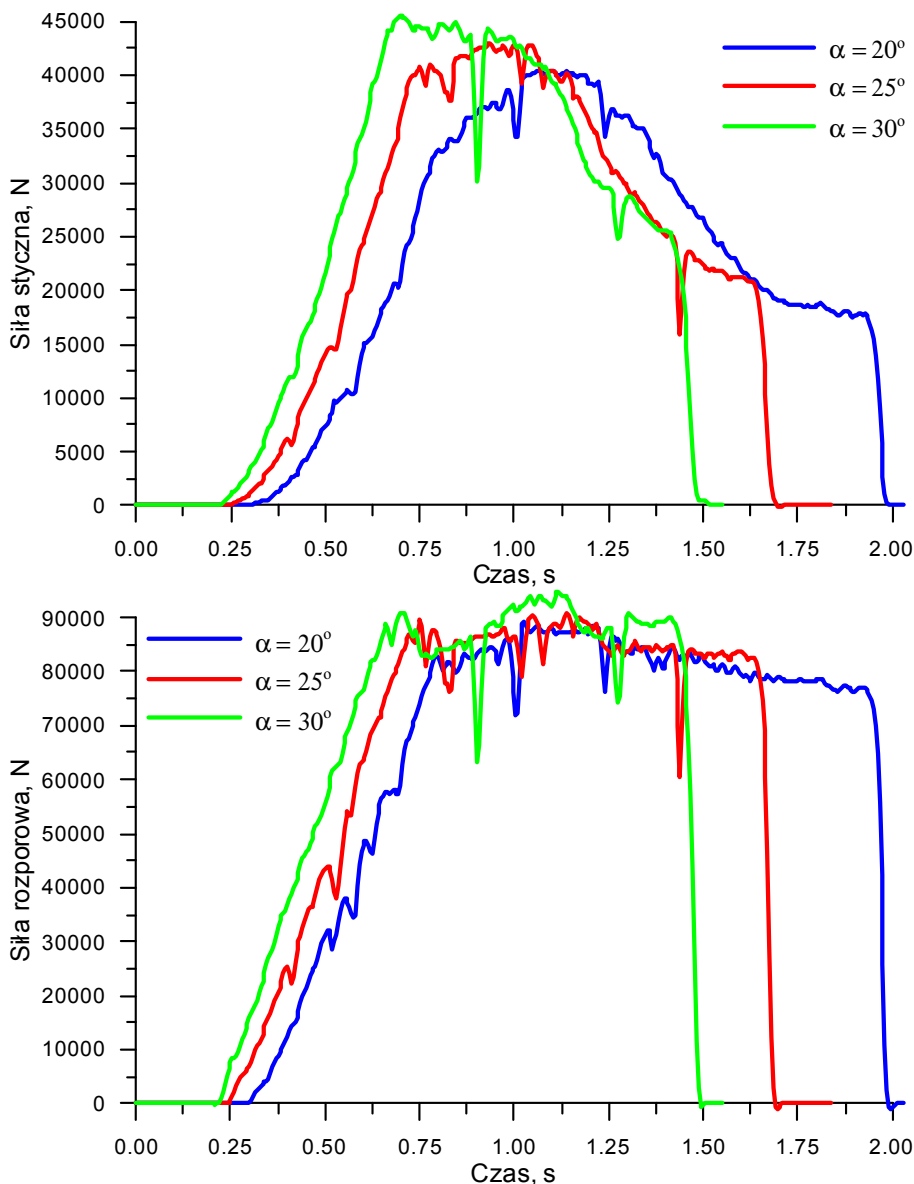
W dwóch z analizowanych przypadków WPK metodą równoległą odnotowano wystąpienie niekontrolowanego poślizgu. Jeden z tych procesów pokazano na rys. 3.43. Jak widać odkuwka podlegała obrotowi w strefie wcinania klinów. Niewątpliwie było to zasługą zastosowania nacięć technologicznych na powierzchniach bocznych klinów. W momencie, gdy w kontakt z materiałem weszła gładka powierzchnia kalibrująca narzędzi siły tarcia były niewystarczające do obrotu odkuwki, która zaczęła się ślizgać po powierzchni narzędzi.



Rys. 3.41. Rozkłady sił w procesach WPK metodą równoległą, realizowanych przy $\alpha=20^\circ$ i β podanym na rysunku

W efekcie poślizgu odkuwka nie uzyskuje zakładanego kształtu osiowo-symetrycznego. Ulega ona zdeformowaniu w sposób pokazany na rys. 3.43.

Cechą charakterystyczną procesów WPK, w których wystąpił niekontrolowany poślizg są zaburzenia wartości sił walcowania. Przykładem jest tutaj rozkład sił pokazany na rys. 3.44, odnoszący się do procesu WPK realizowanego przy $\beta=9^\circ$ i $\alpha=25^\circ$. Ta właściwość może być wykorzystana do automatycznej kontroli przebiegu walcowania.

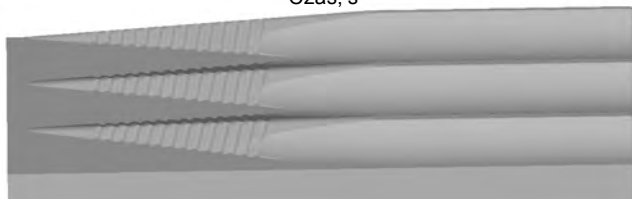
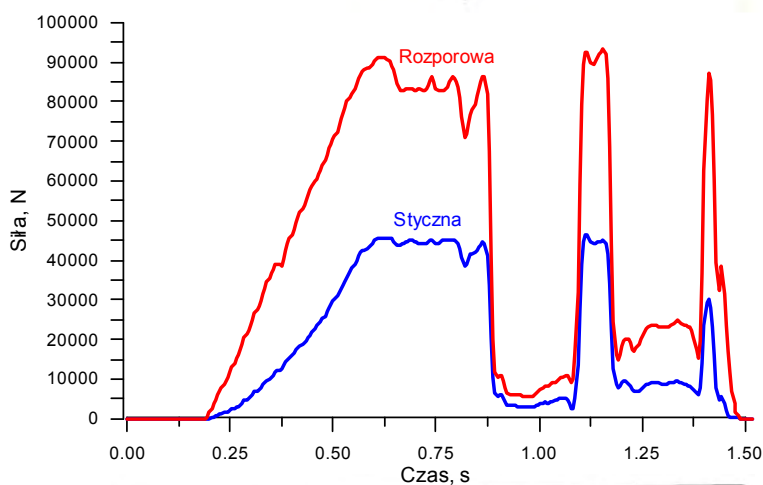
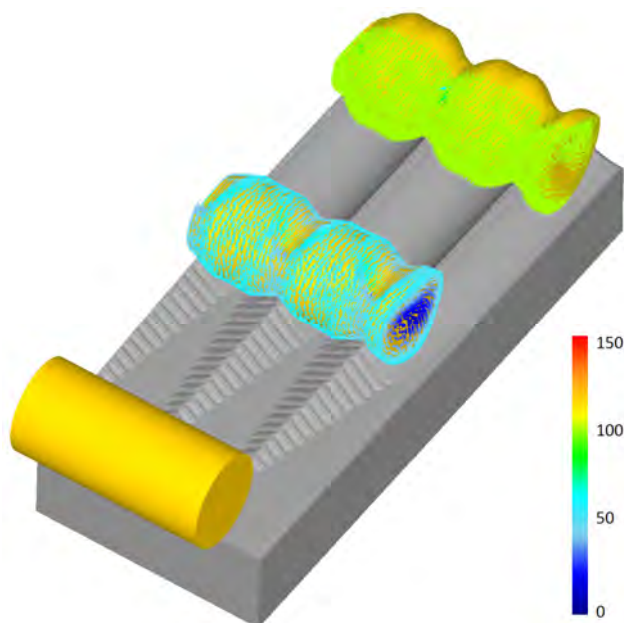


Rys. 3.42. Rozkłady sił w procesach WPK metodą równoległą, realizowanych przy $\beta=7^\circ$ i α podanym na rysunku

Odnosząc się do energochłonności procesów WPK metodą równoległą w tabeli 3.9 zestawiono informacje na temat pracy wykonanej przez narzędzia klinowe w analizowanych przypadkach kształtowania, w których uzyskano prawidłowo wykonany wyrób. Praca ta jest znacznie mniejsza niż w procesie WPK metodą zwykłą (tab. 3.3) i porównywalna do odnotowanej w procesach WPK ze spęszczaniem (tab. 3.6). Odnosnie wpływu kątów narzędzi na pracę widać, że zmniejszenie kąta β i wzrost kąta α powoduje jej

zwiększenie. Zatem wpływ tych parametrów na energochłonność procesu WPK metodą równoległą jest identyczny jak podczas WPK ze spęczaniem.

Rys. 3.43. Rozkład prędkości przemieszczania materiału (w mm/s) w procesie WPK metodą równoległą, realizowanym przy $\beta=9^\circ$ i $\alpha=25^\circ$, w którym wystąpił niekontrolowany poślizg



Rys. 3.44. Rozkłady składowych siły walcowania wyznaczone dla procesu WPK metodą równoległą (przy $\beta=9^\circ$ i $\alpha=25^\circ$), w którym wystąpił niekontrolowany poślizg

Tab. 3.9. Praca wykonana przez narzędzie klinowe w analizowanych numerycznie przypadkach WPK metodą równoległą

Lp.	Kąt β	Kąt α	Praca wykonana przez klin
1.	5°	20°	4287,3 J
2.	5°	25°	4722,1 J
3.	5°	30°	40,98,6 J
4.	7°	20°	4048,0 J
5.	7°	25°	3811,8J
6.	7°	30°	3810,3J
7.	9°	20°	4042,9 J
8.	9°	25°	Niekontrolowany poślizg
9.	9°	30°	Niekontrolowany poślizg

3.4. Rozcinanie półwyrobów kul

Kule wykonane zgodnie z rys. 3.1 muszą być rozdzielone, co następuje w strefie rozcinania. W praktyce przemysłowej walcowane są równocześnie najwyżej dwa wyroby. Wówczas nóż rozdzielający umieszcza się na końcu klinów. W rozważanym przypadku kształtowane są jednocześnie cztery kule (może być ich znacznie więcej). W trakcie ich rozdzielania musi nastąpić ukształtowanie wyrobów w obszarze łączących je mostków. Należy to uwzględnić na etapie projektowania narzędzi, podobnie jak i następujące wówczas wydłużenie półwyrobów. Ponadto, narzędzia w tej strefie nie mogą mieć nacięć technologicznych, gdyż kałczyłyby one powierzchnie kul.

Narzędzie w strefie rozcinania można zaprojektować na szereg sposobów. W bieżącej analizie zaproponowano rozważenie dwóch metod rozcinania.

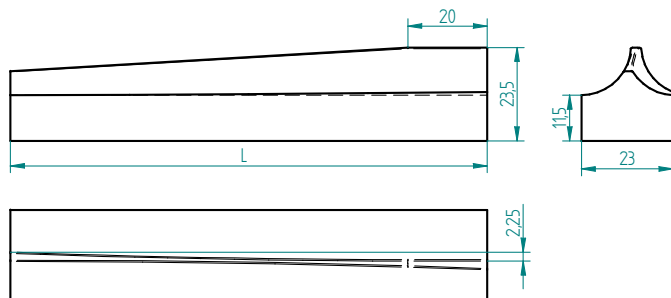
Rozcinanie etapowe. Ponieważ w trakcie rozcinania ma miejsce wydłużenie wyrobów, które komplikuje konstrukcję narzędzi to rozdzielanie można przeprowadzić etapami (w każdym z nich oddzielane są dwa wyroby leżące po bokach). W przypadku (jak na rys. 3.1), gdy rozdzielana jest parzysta liczba kul w ostatnim etapie następuje rozcięcie dwóch kul środkowych, które przebiega przy zastosowaniu noża o oddzielnej konstrukcji.

Na kolejnych rys. 3.45 i 3.46 pokazano noże służące do rozcinania kul wg omawianego sposobu. Wyróżnia się tutaj dwa rodzaje noży, tj. boczny (rys. 3.45) - wykonywany jako prawy i lewy - oraz środkowy (rys. 3.46).

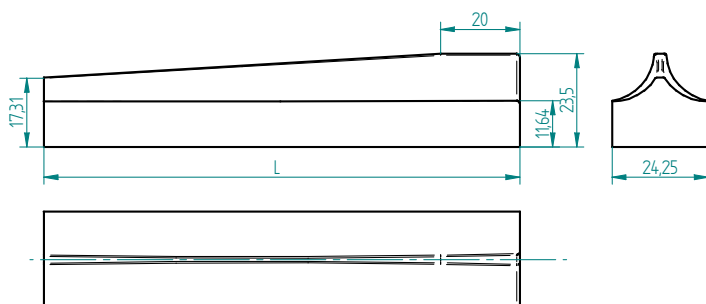
Noże wykorzystywane w procesie rozcinania etapami mają podobną budowę. Różnią się one tylko tym, że noże boczne odchylone są na bok w celu uwzględnienia wydłużenia odkuwki w następstwie procesu walcowania, zaś nóż środkowy wykonywany jest jako symetryczny. Ważnym parametrem przedstawionych noży jest ich długość L , która w sposób jednoznaczny warunkuje wielkość strefy rozdzielania.

Rozcinanie jednoczesne. W procesie rozcinania jednoczesnego wszystkie kule rozdzielane są w tym samym czasie. Narzędzie wykorzystywane w takim procesie rozdzielania jest znacznie krótsze niż podczas rozdzielania etapami. Jednakże jego konstrukcja musi uwzględniać wydłużenie wyrobu następujące w procesie rozcinania, co znacznie komplikuje proces rozdzielania.

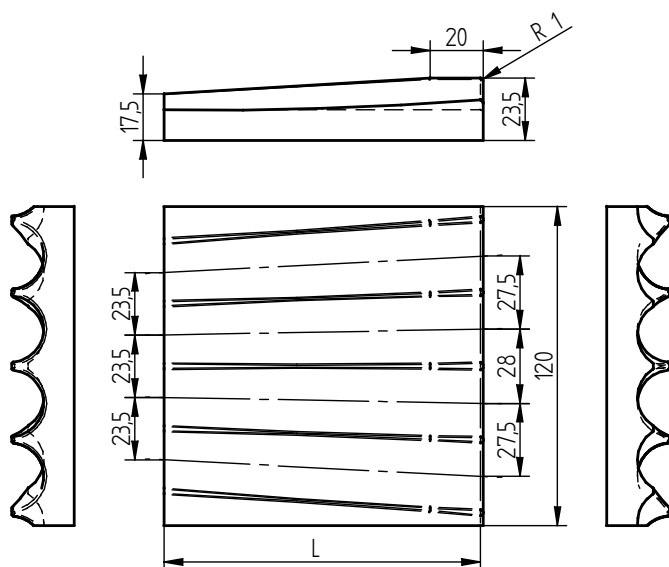
Rys. 3.45. Nóż boczny wykorzystywany w procesie rozdzielania kul etapami



Rys. 3.46. Nóż środkowy wykorzystywany w procesie rozcinania dwóch ostatnich kul



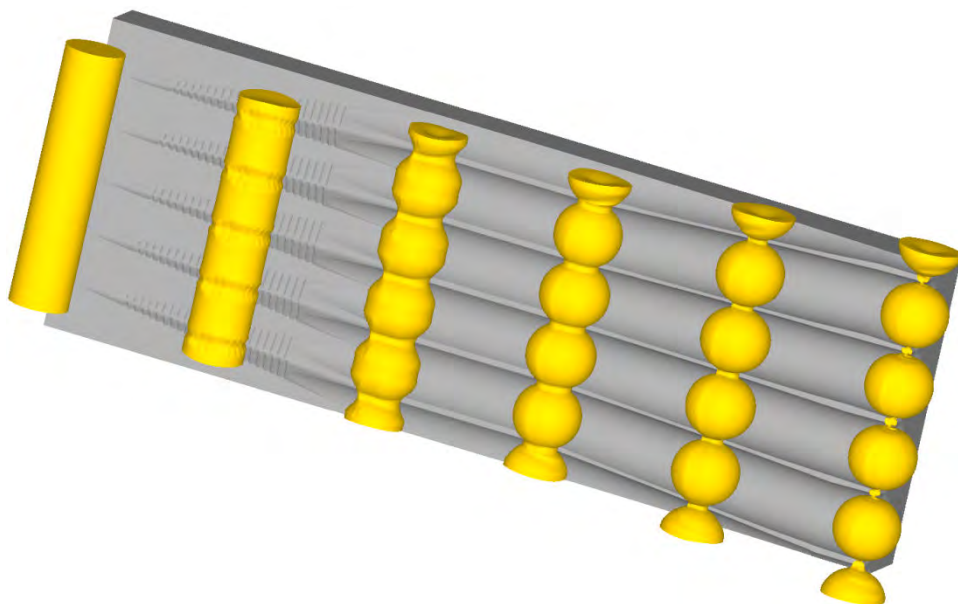
Na rys. 3.47 pokazano narzędzie do rozcinania równoległego w rzutach, na których zaznaczono również podstawowe wymiary. W tym przypadku długość całego narzędzia równa jest długości jednego noża stosowanego w rozcinaniu etapami. W przypadku rozcinania równoległego wraz z oddaleniem noża od środka narzędzia wzrasta jego kąt nachylenia do kierunku walcowania, który musi uwzględniać zmianę długości wyrobów walcowanych.



Rys. 3.47. Segment rozcinający, z zaznaczonymi podstawowymi wymiarami

W ramach analizy MES wykonano symulacje numeryczne czterech przypadków walcowania, w których uwzględniono rozcinanie kul. Uwzględniono przy tym oba opracowane schematy cięcia. Narzędzia klinowe tworzą łącznie ze sobą części kształtujące i rozdzielające.

Na rys. 3.48 przedstawiono progresję kształtu odkuwek walcowanych metodą równoległą (przy $\beta=5^\circ$ i $\alpha=30^\circ$) i rozcinanych jednocześnie. Proces cięcia polegał na zmniejszeniu średnicy przewężenia łączącego poszczególne kule, a następnie na jego rozciąganiu aż do zerwania.



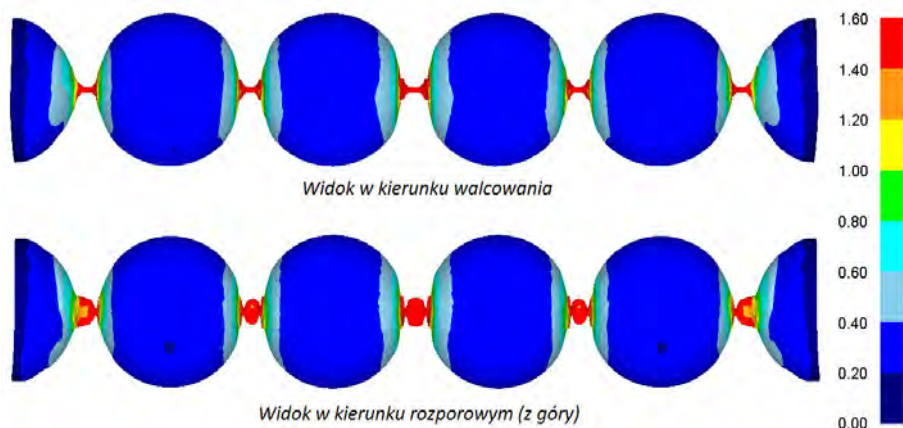
Rys. 3.48. Progresja kształtu odkuwki walcowanej metodą równoległą (przy $\alpha=30^\circ$ i $\beta=5^\circ$), z zastosowaniem jednoczesnego rozcinania kul

Na rys. 3.49 pokazano w widoku kule otrzymane w analizowanym procesie walcowania. Widać, że podczas cięcia doszło do nieznacznego zdeformowania powierzchni bocznych kul, które uległy spłaszczeniu. Taka niedokładność kształtu nieistotna w przypadku walcowania kul dla młynów, może dyskwalifikować tę metodę kształtowania wówczas, gdy wytwarzane są kule do łożysk tocznych.



Rys. 3.49. Kształt kul (w widoku w kierunku walcowania) otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.48

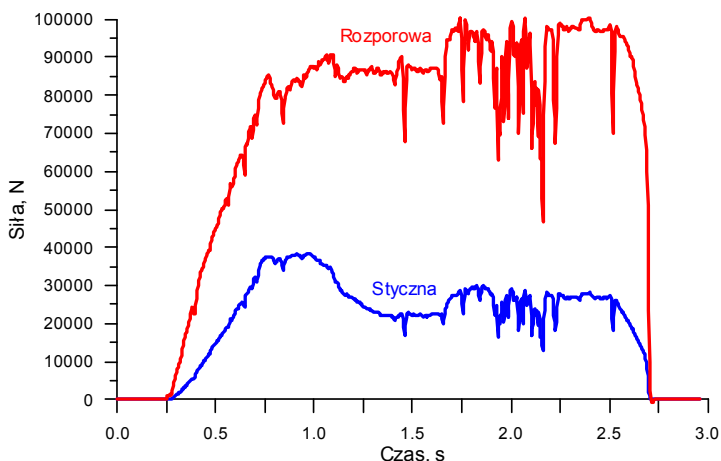
W obszarze utworzonego przewężenia nie powinno być problemów z zerwaniem łączników, gdyż funkcja zniszczenia osiąga tam bardzo duże wartości ($>1,6$) - rys. 3.50. Jednakże po rozdzieleniu kul na ich powierzchni bocznej mogą pozostać ostre występy, których usunięcie może wymagać zastosowania oddzielnej operacji. Zwiększy to jednak czas i koszt wytwarzania kul.



Rys. 3.50. Rozkłady funkcji zniszczenia w odkuwkach otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.48

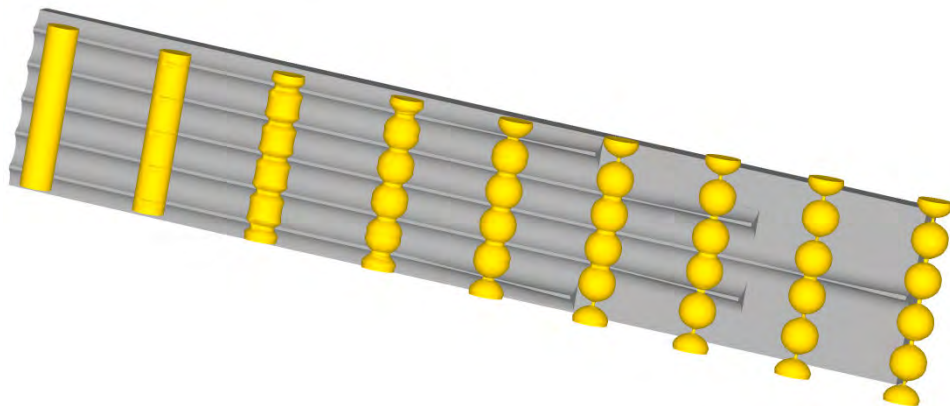
W procesie cięcia równoczesnego występują dość znaczne siły rozporowe (rys. 3.51), które w tej fazie procesu przyjmują wartości maksymalne. Wydaje się, że jest to następstwem nie tylko rozcinania, ale również ciągłego przewalcowywania materiału w kulach. Siła styczna przyjmuje w tej fazie procesu wartości około trzykrotnie mniejsze od siły rozporowej.

Rys. 3.51. Rozkłady składowych siły walcowania stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (prostopadłej do powierzchni kalibrującej narzędzi) w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.48.



Inny schemat rozcinania zastosowano w drugim przeanalizowanym przypadku WPK kul, którego przebieg pokazano na rys. 3.52. Zastosowano w nim narzędzia do walcowania ze spęczaniem o stałym zarysie przekroju poprzecznego (charakteryzowane kątem

wzniosu wykrojów $\gamma=2^\circ$) oraz noże rozdzielające kule etapami. W pierwszej kolejności oddzieleniu ulegają odpady końcowe, następnie kule skrajne i ostatecznie kule centralne. W tym schemacie cięcia znacznemu wydłużeniu ulegają narzędzia kształtujące, co niewątpliwie przekłada się na czas i efektywność procesu wytwarzania.



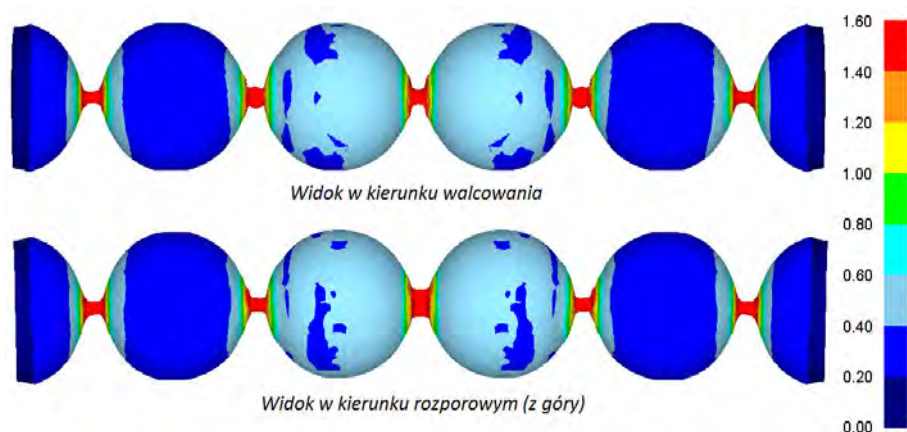
Rys. 3.52. Progresja kształtu odkuwki walcowanej metodą ze spęczaniem (narzędziem o stałym zakresie przekroju poprzecznego i $\gamma=2^\circ$), z zastosowaniem rozcinania kul etapami

Zastosowanie tego schematu cięcia przyniosło poprawę wykonania kul w strefie łączników (rys. 3.53). Jednocześnie pogorszyła się dokładność ich wykonania w centrum (powierzchnia zewnętrzna uległa spłaszczeniu i przyjęła kształt walcowy). Wydaje się, że to pogorszenie kształtu nie powinno mieć miejsca w procesie rzeczywistym, gdy odcięte kule nie będą już przewalcowywane przez narzędzia. W analizie numerycznej niemożliwa była dokładna symulacja takiego schematu cięcia, gdyż w momencie utraty spójności metalu następowało automatyczne zakończenie obliczeń.



Rys. 3.53. Kształt kul (w widoku w kierunku walcowania) otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.52

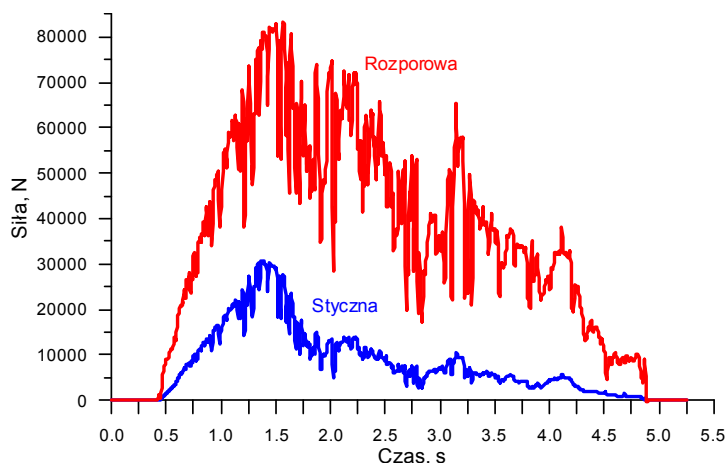
Kolejny rys. 3.54 przedstawia rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta-Latham) w kulach rozdzielanych etapami. Również w tym przypadku funkcja ta przyjmuje bardzo duże wartości w łącznikach, świadczące o naruszeniu spójności. Równocześnie widoczne jest, że w łącznikach tych nadal zlokalizowana jest dość znaczna objętość metalu, która po rozdzieleniu tworzyć będzie ostre występy na powierzchni kul. Występy te będą musiały być usunięte metodami obróbki ubytkowej.



Rys. 3.54. Rozkłady funkcji zniszczenia w odkuwkach otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.52

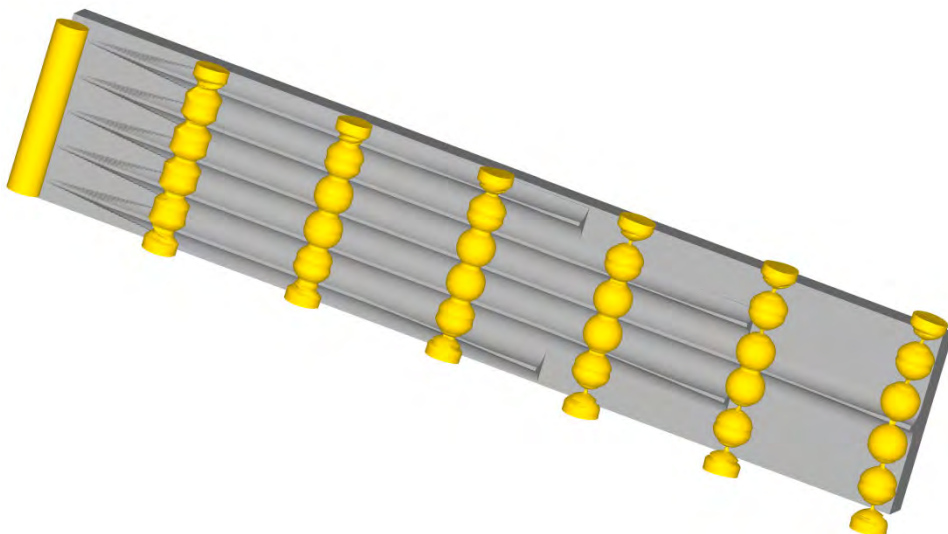
Rozkład sił kształtowania występujących w procesie WPK, przebiegającym zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3.52, podany jest na rys. 3.55. Analiza rozkładów sił pokazuje, że w procesie cięcia etapami obie składowe siły walcowania (styczna i rozporowa) przyjmują bardzo małe wartości. Jest to następstwem nie tylko ograniczenia liczby cięć przebiegających jednocześnie. Równie ważne jest wyeliminowanie problemów z usuwaniem objętości metalu wyciskanego przez noże. W tym przypadku po prostu kule rozsuwają się na boki (patrz rys. 3.53). Natomiast przy cięciu jednoczesnym materiał ten wciskany jest do wykrojów, które dla zrekompensowania wydłużenia wyrobów muszą odchyłać się od kierunku walcowania (patrz rys. 3.49).

Rys. 3.55. Rozkłady składowych siły walcowania stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (prostopadłej do powierzchni kalibrującej narzędzi) w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.52



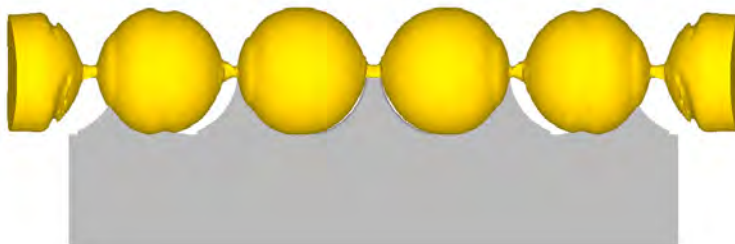
Trzeci z rozważonych przypadków kształtowania kul powstał w wyniku połączenia procesów WPK ze spęczaniem (przy $\beta=5^\circ$ i $\alpha=60^\circ$) i cięcia etapami. Zasymulowany numerycznie przebieg tego procesu kształtowania pokazano na rys. 3.56. Widoczne jest, że realizacja tego przypadku kształtowania wymaga zastosowania narzędzi o bardzo

znaczej długości, co jest następstwem głównie długiej strefy rozcinania. Fakt ten wpłynie negatywnie na wydajność (efektywność) procesu kształtowania kul.



Rys. 3.56. Progresja kształtu odkuwki walcowanej metodą ze spęcaniem (przy $\beta=5^\circ$ i $\alpha=60^\circ$), z zastosowaniem rozcinania kul etapami

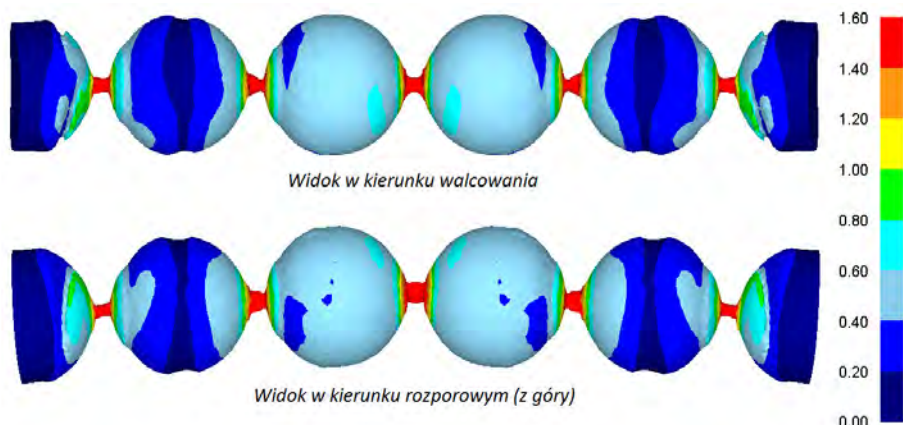
W tym przypadku kształt uzyskanych kul wykazywał największe niedoskonałości (rys. 3.57). Wyraźnie widoczne jest, że kule skrajne mają zmniejszoną średnicę. Jest to konsekwencja niewypełnienia przez materiał wykroi skrajnych podczas walcowania. Ponadto, zastrzeżenia można mieć do kształtu powierzchni bocznych kul w strefie łączników, od strony skrajnej. Występuje tam nawarstwienie metalu (przypominające kształtem muszlę żółdzia), które niewątpliwie powstaje w fazie rozcinania. Podsumowując, należy stwierdzić, że w tym przypadku walcowania kule mają najmniejszą dokładność wykonania i taki proces nie powinien być rekomendowany do zastosowania praktycznego.



Rys. 3.57. Kształt kul (w widoku w kierunku walcowania) otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.56

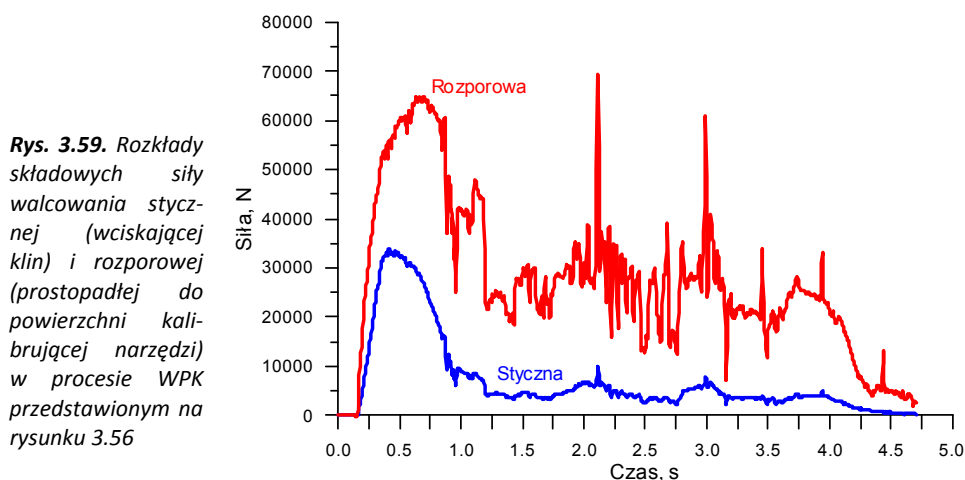
Rozkład funkcji zniszczenia (rys. 3.58) odnotowany dla przypadku WPK z rysunku 3.56 nie odbiega od tego, który uzyskano dla poprzednio rozważanego procesu walcowania.

wania połączonego z cięciem etapami (rys. 3.54). Funkcja zniszczenia przyjmuje duże wartości w obszarze łączników, które powinny ulec zerwaniu. Podobnie jak w poprzednio rozważanych procesach kształtowania po wytworzeniu kul pozostanie do rozwiązania problem usunięcia z ich powierzchni ostrych występow (zadziorów).



Rys. 3.58. Rozkłady funkcji zniszczenia w odkuwkach otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.56

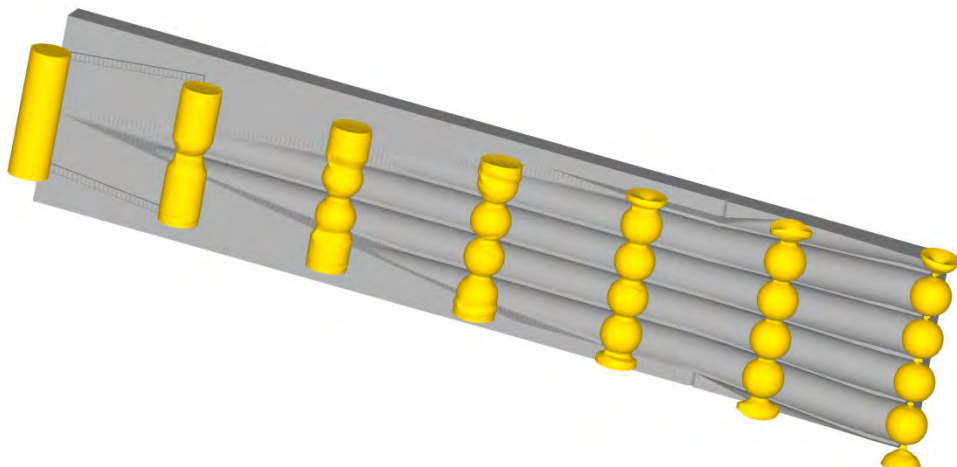
Podobne wnioskowanie można przedstawić na temat rozkładów sił stycznej i rozporowej, przedstawionych na rys. 3.59. Widoczne jest, że po procesie kształtowania siły te zmniejszają się kilkukrotnie (składowa styczna aż o ok. 7x) po przejściu do strefy rozcinania. Zatem realizacja cięcia z punktu widzenia mocy walcarki nie będzie stwarzać najmniejszych problemów.



Rys. 3.59. Rozkłady składowych sił walcowania stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (prostopadłej do powierzchni kalibrującej narzędzi) w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.56

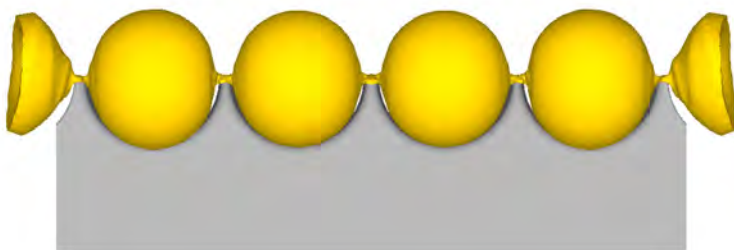
Ostatni z rozważanych przypadków kształtowania powstał z połączenia metody zwykłej WPK oraz cięcia jednoczesnego. Segment narzędziowy stosowany w tym procesie ma zwartą budowę i charakteryzowany jest przez kąty $\beta=9^\circ$ i $\alpha=30^\circ$. Na rys. 3.60 pokazano progresję kształtu kul. Widać jest, że uzyskują one pożądany kształt sferyczny,

a rozdzielenie metalu następuje na krótkim odcinku narzędzia. Ten schemat kształtowania będzie odznaczać się największą efektywnością (wydajnością). Ponadto, jego realizacja nie będzie wymagać stosowania wsadu o ściśle ustalonej średnicy, co jest charakterystyczne dla procesów WPK metodami równoległą i ze spęczaniem.



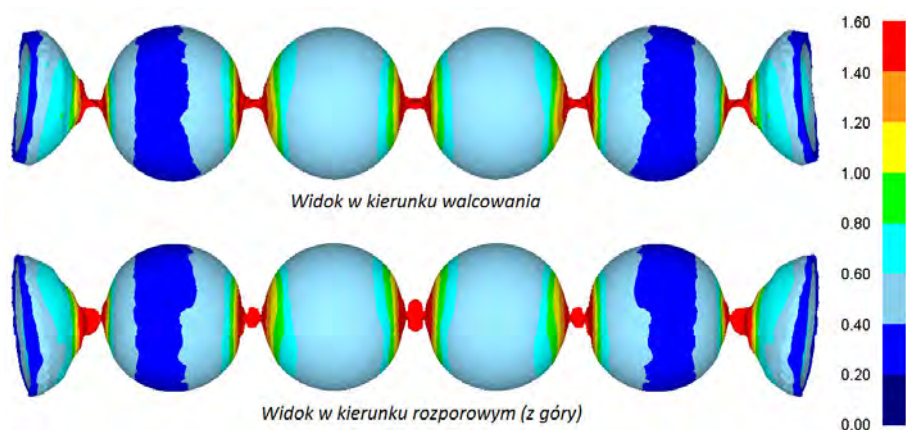
Rys. 3.60. Progresja kształtu odkuwki walcowanej metodą zwykłą ($\beta=9^\circ$ i $\alpha=30^\circ$), z zastosowaniem jednoczesnego rozcinania kul

Kształt kul otrzymanych w procesie WPK metodą zwykłą, rozcinanych jednocześnie (rys. 3.61) budzi najmniejsze zastrzeżenia. Wprawdzie występują niewielkie niewypełnienia metalu w kulach skrajnych (od strony kul centralnych), ale mogą być one zmniejszone w efekcie dodatkowego zukosowania w tym miejscu powierzchni noży celem zwiększenia objętości metalu zamykanej w wykroju skrajnym. Kule wytwarzane tą metodą będą mogły znaleźć zastosowanie zarówno w młynach, jak i po dodatkowej obróbce skrawaniem w łożyskach tocznych.



Rys. 3.61. Kształt kul (w widoku w kierunku walcowania) otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.60

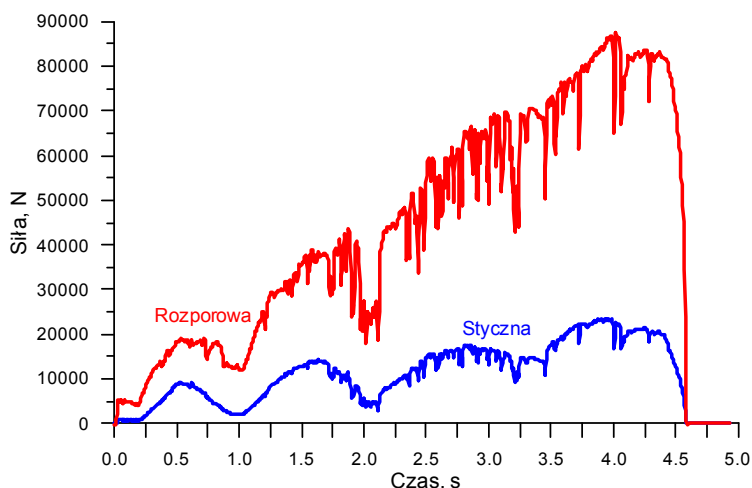
Rozkład funkcji zniszczenia, przedstawiony na rys. 3.62 jest podobny do poprzednio omawianych. Największe wartości funkcja ma w obszarze łączników i tamże powinno dojść do naruszenia spójności metalu. Jednakże także w tym przypadku kształtowania realne jest wystąpienie ostrych zadziórów, jako pozostałości po łącznikach.



Rys. 3.62. Rozkłady funkcji zniszczenia w odkuwkach otrzymanych w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.60

Na rys. 3.63 przedstawiono rozkłady składowych siły walcowania wyznaczone dla procesu WPK kul, realizowanego zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3.60. Widać, że w procesie tym rozkład sił ma inny charakter niż w poprzednio rozważanych przypadkach. Siły wzrastają przez cały czas trwania procesu i przyjmują wartości największe podczas rozcinania kul. Przy tym wzrost sił następuje w sposób wahadłowy, niewątpliwie w następstwie zmiany gniotu, wraz z wchodzeniem w kontakt z materiałem kolejnych wykroi.

Rys. 3.63. Rozkłady składowych siły walcowania stycznej (wciskającej klin) i rozporowej (prostopadłej do powierzchni kalibrującej narzędzi) w procesie WPK przedstawionym na rysunku 3.60



Należy zauważyć, że w tym schemacie walcowania maksymalna siła styczna osiągnęła wartość około 22 kN. Zatem proces ten może być bez problemu zrealizowany w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej, dysponującej walcarką umożliwiającą kształtowanie z siłami stycznymi do 30 kN.

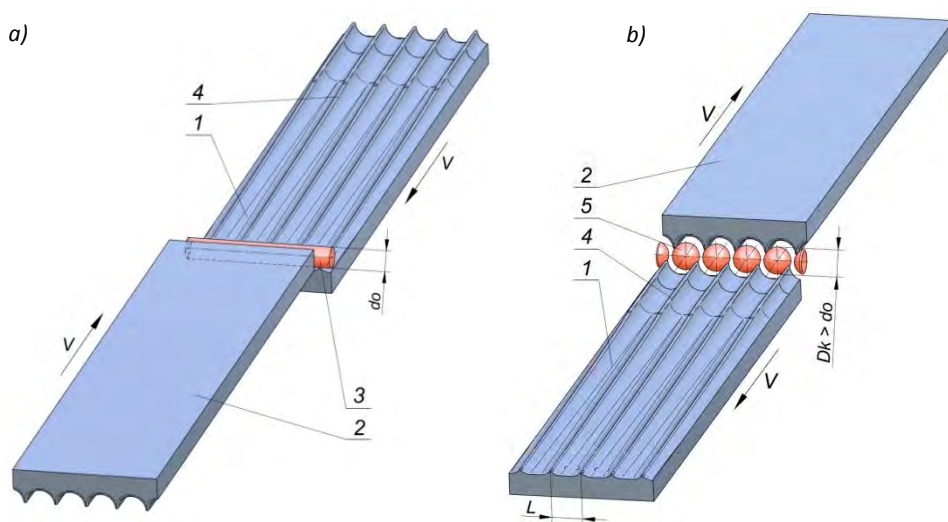
4. Próby doświadczalne procesu WPK kul

Rozwijając technologię walcowania poprzeczno – klinowego półfabrykatów w Politechnice Lubelskiej opracowano trzy nowe metody kształtowania plastycznego kul. Są to: walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) metodą zwykłą, wieloklinowe walcowanie poprzeczne (WWPK) oraz walcowanie poprzeczne ze spęczaniem. Metoda zwykła WPK polega na zastosowaniu dwóch narzędzi w kształcie klinów, które przemieszczając się przeciwbieżnie wcinają się we wsad (o średnicy równej średnicy kuli), wprawiając go w ruch obrotowy i kształtują kule. Cechą charakterystyczną tego procesu jest to, że kule kształtowane są kolejno jedna po drugiej poczynawszy od środka pręta, a skończywszy na jego końcach. W metodzie WWPK na wsad w postaci pręta oddziałuje jednocześnie szereg par klinów, w wyniku czego wszystkie kule (może być ich nawet kilkanaście) kształtowane są w tym samym czasie. Z kolei metoda walcowania ze spęczaniem polega na tym, że wsad (odcinek pręta o średnicy mniejszej od średnicy kul) kształtowany jest dwoma narzędziami płaskimi posiadającymi występy, które przemieszczając się przeciwbieżnie rozcinają wsad na części (o objętości równej objętości kuli), a następnie spęczają je, w wyniku czego otrzymuje się kule o średnicy większej od średnicy wsadu. Szczegółowo procesy walcowania poprzeczno-klinowego półfabrykatów kul opisano w rozdziale 3. W bieżącej części przedstawiono również wyniki prowadzonych symulacji numerycznych kształtowania odkuwek trzema opracowanymi metodami walcowania, które potwierdziły trafność przyjętych założeń. Dlatego też w celu zweryfikowania wyników numerycznych przeprowadzono próby doświadczalne walcowania kul.

4.1. Walcowanie poprzeczne kul z jednoczesnym spęczaniem materiału

Jedną z efektywniejszych metod kształtowania odkuwek kul, którą opracowano w ramach prowadzonych badań jest proces walcowania poprzecznego z jednoczesnym spęczaniem materiału [63, 66, 67]. Cechą charakterystyczną opracowanej technologii jest możliwość walcowania wyrobów z półfabrykatu o średnicy mniejszej od wymiaru kształtowanej kuli. Istota opracowanej metody walcowania odkuwek kul bazuje na tradycyjnych procesach WPK, przy czym zasadnicza różnica w stosunku do konwencjonalnych metod walcowania poprzeczno - klinowego polega na zastosowaniu narzędzi, na powierzchniach których wykonane są równoległe do siebie kołnierze (występy) o wklęsłych powierzchniach bocznych. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul ze spęczaniem przedstawiono na rysunku 4.1. Półfabrykat 3 w kształcie odcinka pręta o średnicy d_0 mniejszej od średnicy D_k kształtowanej kuli 5 umieszczany jest między dwoma płaskimi narzędziami 1 i 2. Na powierzchniach roboczych narzędzi wykonane są kołnierze 4, rozdzielające bruzdy o wklęsłych

powierzchniach bocznych, których promień równy jest połowie średnicy walcowanych kul. Kołnierze rozmieszczone są równoległe do siebie w odległości L większej od średnicy D_k kształtowanej kuli 5, co umożliwia rozdzielanie wyrobów w końcowym etapie walcowania. Następnie narzędzia 1 i 2 wprawiane są w przeciwny ruch postępowy z takimi samymi prędkościami v . W wyniku czego następuje zagłębienie się kołnierzy 4 w półfabrykat 3 i wprawienie go w ruch obrotowy. Zwiększając swoją wysokość kołnierze, które znajdują się na przemieszczających się narzędziach, kształtują na obwodzie wsadu pierścieniowe rowki, rozdzielając półfabrykat na jednakowe objętości materiału równe objętości walcowanej kuli.



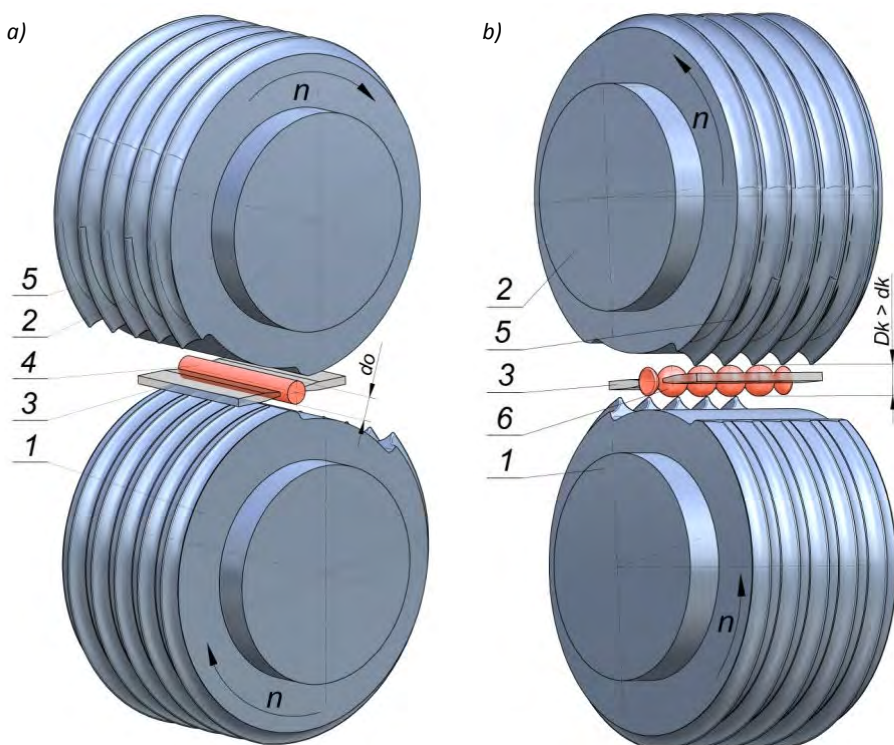
Rys. 4.1. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul ze spęcaniem narzędziami płaskimi:
a) początek procesu, b) koniec procesu (opis w tekście)

W dalszym etapie procesu zamknięty w wykrojach materiał podlega spęcaniu w wyniku oddziaływania wklęsłych powierzchni bocznych kołnierzy. W efekcie uzyskuje się wyroby – odkuwki kul o średnicy większej od wymiaru zastosowanego wsadu. Proces może być również zrealizowany w układzie, w którym tylko jedno z narzędzi 1 lub 2 jest przemieszczane, zaś drugie pozostaje nieruchome. Takie rozwiązanie pozwala znacznie uprościć konstrukcję walcarki.

Opracowana technologia walcowania poprzecznego odkuwek kul odznacza się szeregiem zalet, do których można zaliczyć między innymi możliwość jednoczesnego kształtowania kilku kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie odcinka pręta o średnicy mniejszej od wymiaru wyrobu. Nie bez znaczenia jest również prosta konstrukcja oprzyrządowania (narzędzi), co przekłada się na znacznie niższe koszty ich wykonania w stosunku do narzędzi klinowych. Dodatkowo kształt powierzchni roboczych segmentów zapewnia znacznie większą trwałość, a ich regeneracja jest stosunkowo prosta do przeprowadzenia. Natomiast głównym ograniczeniem procesu jest wielkość

kształtowanych kul, która wynika z mocy i sztywności zastosowanej walcarki. Występuje tutaj również ruch jałowy narzędzi, który obniża wydajność procesu.

Walcowanie poprzeczne odkuwek kul ze spęczaniem może być również zrealizowane za pomocą narzędzi obrotowych (rys. 4.2). Eliminuje się wtedy jałowy ruch powrotny narzędzi. Kołnierze robocze narzędzi 5 o wklęsłych powierzchniach bocznych umieszczone są wtedy na powierzchniach walców 1 i 2. Sam przebieg procesu jest zbliżony do opisywanego poprzednio. Po umieszczeniu półfabrykatu 3 w przestrzeni roboczej, pomiędzy dwiema prowadnicami 4, wprawia się narzędzia w ruch obrotowy, które obracając się ze stałą prędkością n w tym samym kierunku kształtują kule 6 o średnicy D_k większej od średnicy wsadu d_o . Proces walcowania kul narzędziami obrotowymi charakteryzuje się większą wydajnością w stosunku do kształtowania narzędziami płaskimi, jednak przy takim rozwiązaniu niezbędne jest stosowanie prowadnic, które utrzymują wsad w przestrzeni roboczej agregatu.



Rys. 4.2. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul ze spęczaniem narzędziami w kształcie walców: a) początek procesu, b) koniec procesu.

4.2. Stanowisko badawcze i narzędzia do WPK odkuwek kul

4.2.1. Stanowisko badawcze

Próby laboratoryjne procesów walcowania poprzecznego kul wykonano na płasko-klinowej walcarce laboratoryjnej LUW-2 (rys. 4.3), znajdującej się na wyposażeniu

Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej w Politechnice Lubelskiej.

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

Ruch suwaków realizowany jest za pomocą dwóch siłowników hydraulicznych, o skoku maksymalnym 630 mm. Siłowniki napędzane są zasilaczem hydraulicznym, wyposażonym w silnik elektryczny o mocy 11 kW. Maksymalne ciśnienie robocze w układzie hydraulicznym wynosi 20 MPa. Przy tej wartości ciśnienia uzyskiwana jest maksymalna siła wciskająca klin, wynosząca 30 kN dla każdego z siłowników. W celu pomiaru wartości siły stycznej (wciskającej kliny w materiał), jeden z siłowników zaopatrzono w dwa przetworniki ciśnienia typu PT – 5261, dzięki którym można w sposób pośredni wyznaczyć wartość tej siły.



Rys. 4.3. *Walcarka laboratoryjna LUW-2, pracująca w układzie dwóch przemieszczających się przeciwnie klinów płaskich*

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

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

4.2.2. Narzędzia płasko-klinowe do WPK odkuwek kul

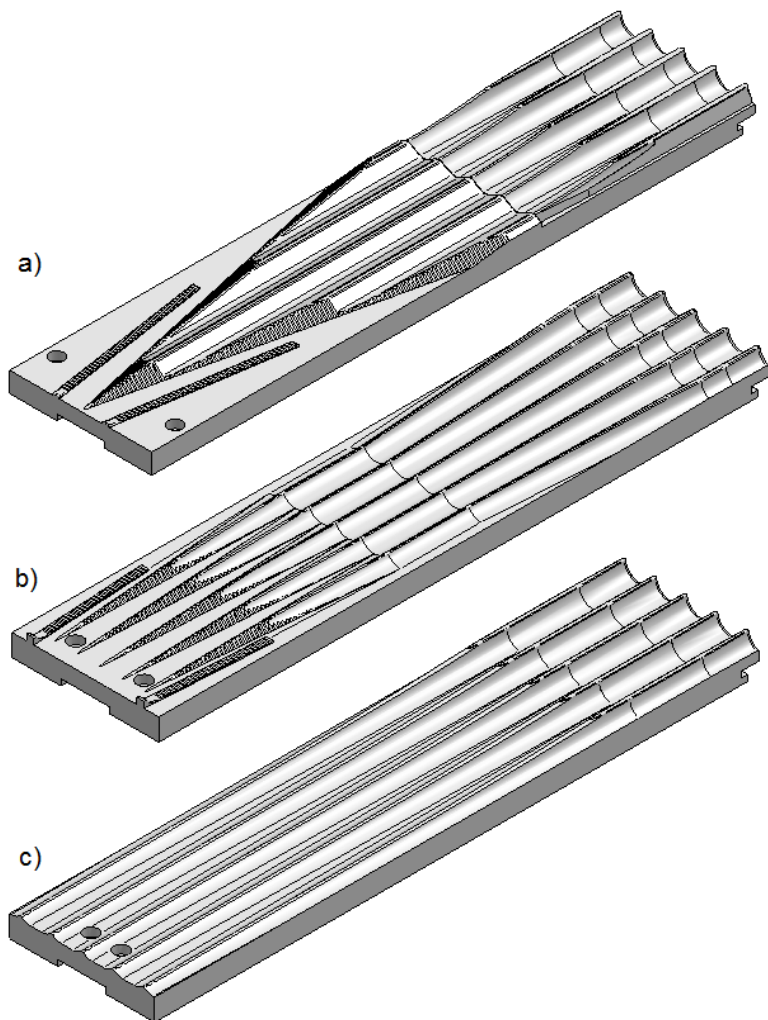
W trakcie projektowania narzędzi uwzględniono warunki konstrukcyjne walcarki, na której planowano przeprowadzić badania, co wiązało się z ograniczeniem wymiarów gabarytowych segmentów. I tak długość narzędzi nie mogła przekraczać 510 mm, a ich szerokość 120 mm. Mając na uwadze parametry walcarki przyjęto, że w trakcie prób walcowania kształtowane będą równocześnie 4 kule $S\varnothing 22$ mm. Prace projektowe zostały podzielone na trzy etapy:

- wykonanie modelu 3D narzędzi;
- sprawdzenie poprawności przyjętego rozwiązania w symulacji numerycznej MES;
- opracowanie dokumentacji technicznej, na podstawie której zostały wykonane narzędzia do prób laboratoryjnych walcowania.

Należy tutaj zauważyć, że w przypadku odnotowanych nieprawidłowości w kinematyce płynięcia materiału (stwierdzonych w obliczeniach MES) dokonywano poprawek w modelu narzędzi i obliczenia powtarzano do momentu uzyskania satysfakcjonujących wyników. Przestrzenne modele geometryczne narzędzi do walcowania kul $S\varnothing 22$ mm (dla trzech rozważanych wariantów walcowania) zestawiono na kolejnym rysunku 4.4.

W skład każdego kompletu płasko klinowych segmentów narzędziowych wchodziły dwa jednakowe kliny: górny i dolny. W każdym ze stosowanych rozwiązań w dolnym narzędziu, w jego strefie wejściowej wykonano cylindryczne zagłębienia, których zadaniem było pozycjonowanie wsadu we właściwym miejscu w początkowym etapie walcowania. Narzędzia stosowane do walcowania poprzeczno-klinowego kul metodą zwykłą składają się z trzech zasadniczych stref: klinowej strefy kształtującej, właściwej strefy kształtującej oraz strefy kalibrowania i rozcinania (rys. 4.4a). W pierwszej strefie narzędzia mają typowy kształt klinowy. Przy czym na powierzchniach klinów wykonano wzdłużnie równoległe rowki o płaskich i pochylonych powierzchniach bocznych, których zadaniem jest podział wsadu na równe objętości materiału odpowiadające objętości kuli oraz ukształtowanie stożkowych zgrubień na półfabrykacie w miejscach walcowanych odkuwek. W strefie drugiej płaskie powierzchnie bruzd zmieniają kształt na wklęsły, o promieniu równym połowie średnicy kuli. Przy czym wysokość występow rozdzielających bruzdy stopniowo się zwiększa. Następuje tutaj ukształtowanie sferycznych powierzchni kul. W ostatniej strefie rozcinania i kalibrowania występy o wklęsłych powierzchniach bocznych mają stałą wysokość. Dochodzi tutaj do całkowitego rozdzielenia odwalcowanych kul, a następnie skalibrowania ich kształtu. W końcowym obszarze narzędzi bruzdy stopniowo rozszerzają się, co ułatwia wychodzenie ukształtowanych odkuwek z przestrzeni roboczej segmentów. W celu zwiększenia stabilności walcowania oraz właściwego pozycjonowania wsadu w początkowym etapie procesu umieszczono w pierwszej strefie klinowej dwie ścieżki

prowadzące. Dodatkowo na powierzchniach kształtujących klinów oraz na ścieżkach prowadzących wykonano nacięcia technologiczne. W przypadku narzędzi stosowanych do wieloklinowego walcowania poprzecznego (rys. 4.4b) również można wyróżnić trzy strefy: wcinania, kształtowania oraz rozcinania i kalibrowania.



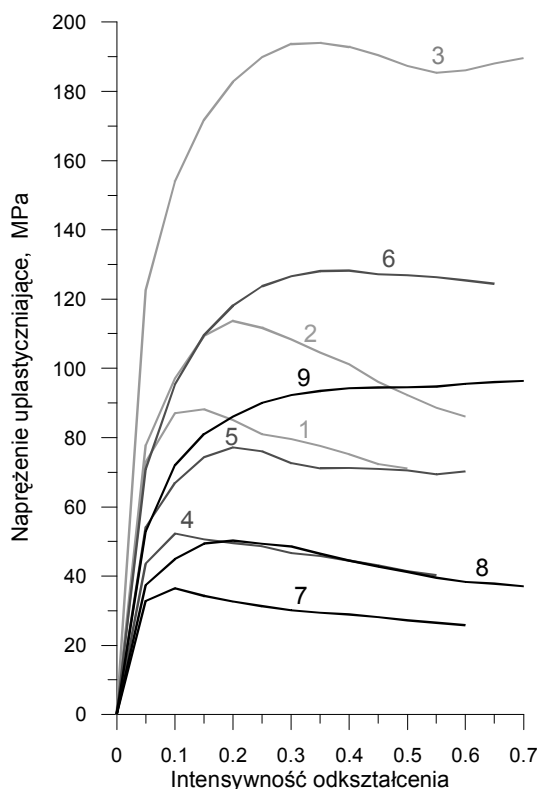
Rys. 4.4. Modele przestrzenne płasko-klinowych narzędzi do walcowania kul $S\varnothing 22$ stosowane w: a) walcowaniu metodą zwykłą, b) wielokrotnym walcowaniu poprzeczno-klinowym, c) walcowaniu poprzecznym ze spęczaniem

Zasadnicza różnica w stosunku do poprzednio omawianych narzędzi polega na umieszczeniu na segmentach kilku klinowych występow, w wyniku czego wszystkie kule kształtowane są jednocześnie. Przy czym w pierwszej strefie klinowe powierzchnie boczne występow są płaskie i następnie w strefie drugiej płynnie zmieniają kształt na wklęsły. W ostatniej strefie wysokość występow nie ulega zmianie. Na szczególną uwagę

zasługuje konstrukcja narzędzi zabezpieczających walcowanie ze spęcaniem (rys. 4.4c) [66]. W segmentach tego typu można wyróżnić dwie strefy: kształtowania oraz rozcinania i kalibrowania. W strefie kształtowania równoległe do siebie występy o wklęsłych powierzchniach bocznych stopniowo zwiększają swoją wysokość. Natomiast w strefie drugiej kształtowe występy mają stałą wysokość (podobnie jak w poprzednich wariantach). Narzędzia tego typu wyróżnia prostota konstrukcji, przekładająca się na obniżenie kosztów ich wykonania oraz eksploatacji.

4.3. Symulacje numeryczne walcowania kul SØ22

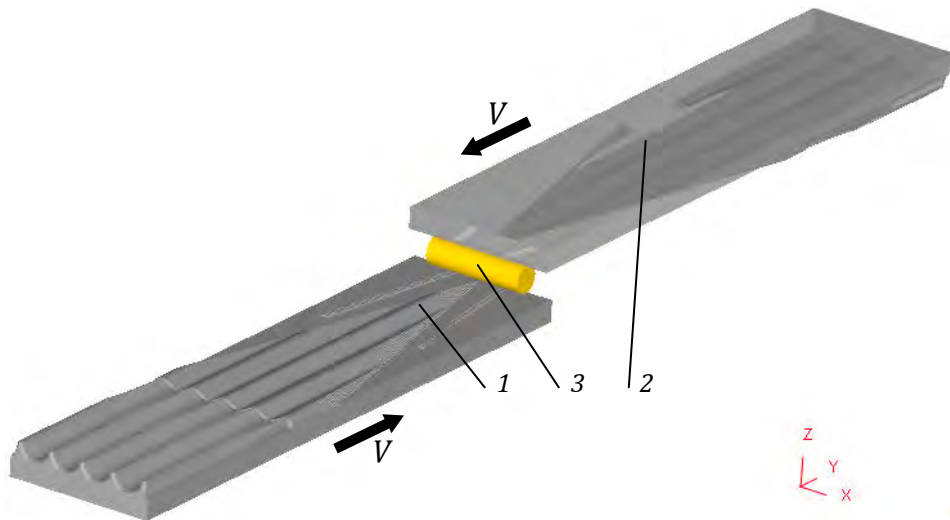
W celu sprawdzenia poprawności opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi klinowych wykonano obliczenia numeryczne, w których zasymulowano procesy walcowania kul SØ22 mm. Obliczenia te wykonano metodą elementów skończonych (MES) wykorzystując pakiet oprogramowania Deform-3D w wersji 10.0. W symulacjach wykorzystano model materiałowy stali w gatunku R200, której krzywe płynięcia pokazano na rys. 4.5 [62, 90]. We wszystkich rozważanych przypadkach założono, że: materiał wsadu przed walcowaniem został nagrany w całej objętości do temperatury 1150°C, narzędzia klinowe mają stałą temperaturę 150°C i poruszają się przeciwnie z jednakową prędkością 0,125 m/s, tarcie na powierzchni styku materiał-narzędzie ma wartość graniczną określoną współczynnikiem tarcia $\mu = 0,6$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami wynosi 10 kW/m²K.



Rys. 4.5. Krzywe płynięcia stali R200 przy:
 1 - $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ s}^{-1}$; 2 - $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$; 3 - $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; 4 - $T=1100^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ s}^{-1}$; 5 - $T=1100^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$; 6 - $T=1100^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; 7 - $T=1200^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ s}^{-1}$; 8 - $T=1200^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$; 9 - $T=1200^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$;

4.3.1. Symulacje WPK kul metodą zwykłą

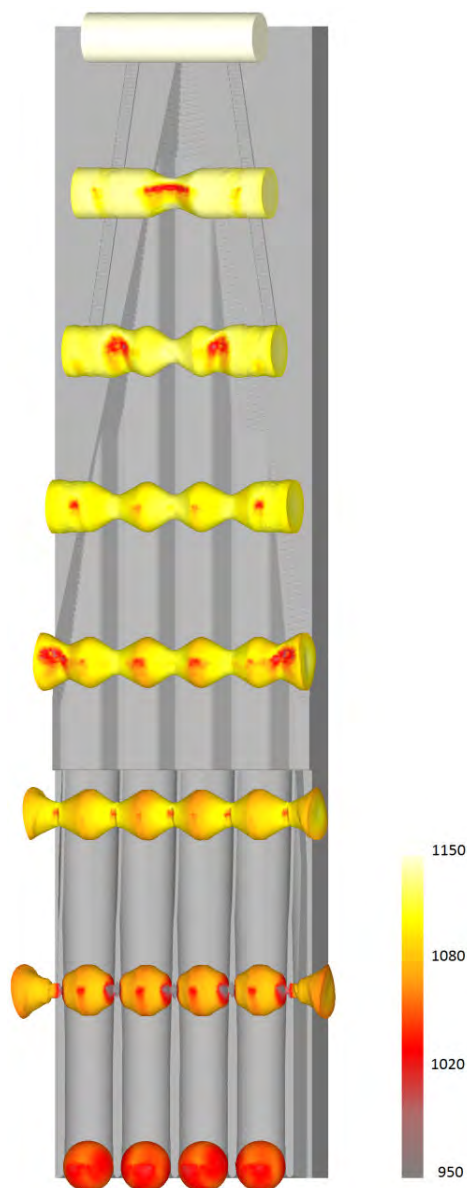
Model geometryczny procesu WPK odkuwek kul metodą zwykłą przedstawiono na rys. 4.6. W skład modelu wchodzi dwa identyczne narzędzia klinowe oraz wsad, modelowany za pomocą elementów czworościennych pierwszego rzędu. Założono, że wsadem jest pręt o wymiarach $\varnothing 22 \times 80$ mm w gatunku R200.



Rys. 4.6. Model geometryczny procesu WPK kul metodą zwykłą wykonany w programie Deform-3D: 1 – klin dolny, 2 – klin górny, 3 - wsad

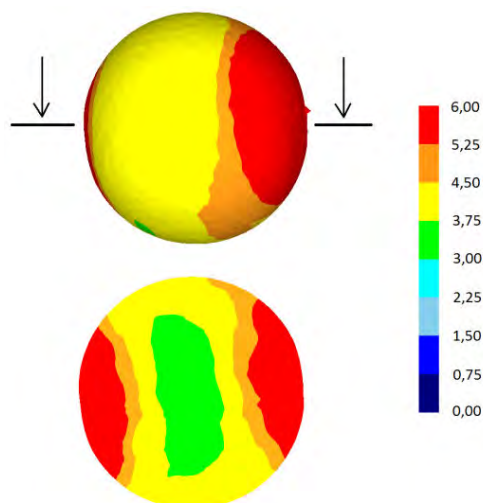
Progresję kształtu wyrobu w procesie WPK metodą zwykłą przedstawiono na rys. 4.7. W procesie tym zastosowano dwustopniowy schemat walcowania. W pierwszej fazie walcowania następuje ukształtowanie stożkowych zgrubień, których objętość jest równa objętości walcowanej kuli. W następnej fazie procesu zgrubienia te są rozdzielane na pojedyncze części i kształtowane w kule w wyniku oddziaływania wklęsłych powierzchni klinów. Widoczne jest, że proces walcowania przebiega w sposób stabilny i nie występują żadne zakłócenia. Zastosowanie ścieżek prowadzących pozycjonuje w sposób właściwy położenie wsadu w trakcie inicjacji walcowania. Odwalcowane kule uzyskują pożądany kształt.

Kula otrzymana w procesie WPK metodą zwykłą charakteryzuje się nierównomiernością odkształcenia - rys. 4.8. Największe odkształcenia występują po dwóch przeciwnych stronach wyrobu, w których kule połączone były ze sobą. Najmniej materiał jest odkształcony w strefie centralnej kuli. Należy jednak zauważyć, że nawet tam wystąpił dość duży przerób plastyczny materiału. Analizując rys. 4.8 można stwierdzić, że kształt uzyskanej kuli nie budzi żadnych zastrzeżeń.

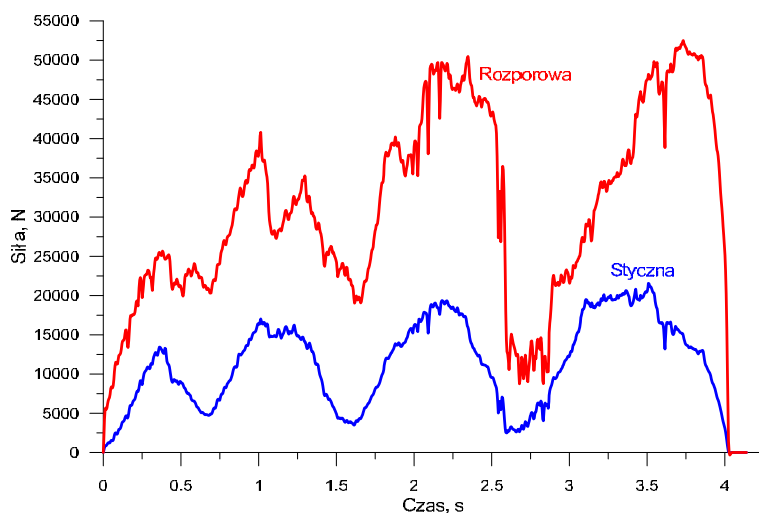


Rys. 4.7. Progresja kształtu wyrobów w procesie WPK metodą zwykłą z zaznaczonym rozkładem temperatury (w °C)

W efekcie wykonanych obliczeń otrzymano także rozkłady sił walcowania: rozporowej (decyduje o dokładności wykonania kuli) oraz stycznej (wciskającej klin), które pokazano na rys. 4.9. Widać wyraźnie, że siły w trakcie walcowania zmieniają się w sposób wahadłowy, co jest efektem kształtowania kolejnych przewężeń na materiale wsadowym. Największe siły występują w końcowym etapie kształtowania, gdy kule ulegają spęczeniu. Ważny jest również fakt, że siła styczna nie przekracza wartości 20 kN, co pozwala przypuszczać, że nie powinno być problemów z odwalcowaniem kul tą metodą w warunkach laboratoryjnych.



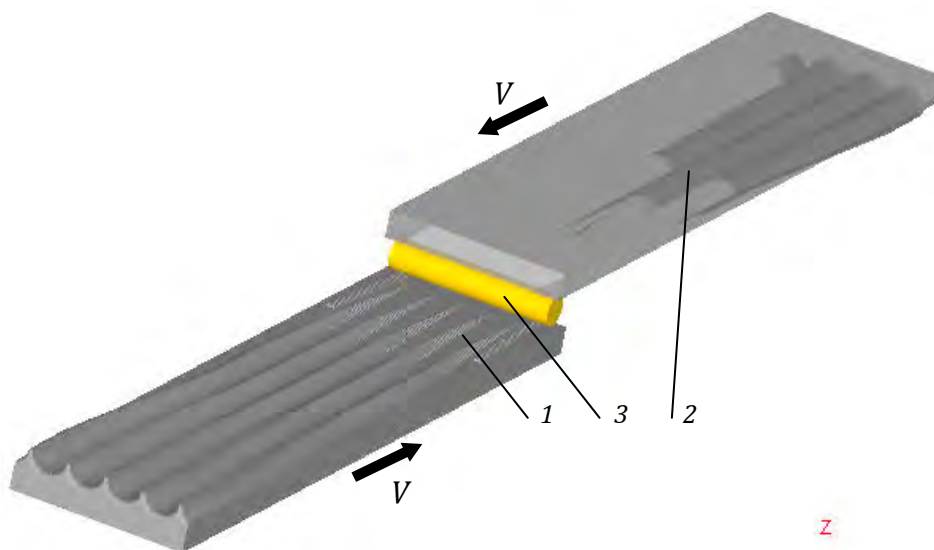
Rys. 4.8. Rozkład intensywności odkształcenia w kuli otrzymanej w procesie WPK metodą zwykłą



Rys. 4.9. Rozkłady sił walcowania obliczone dla procesu WPK metodą zwykłą

4.3.2. Symulacje WPK kul metodą równoległą

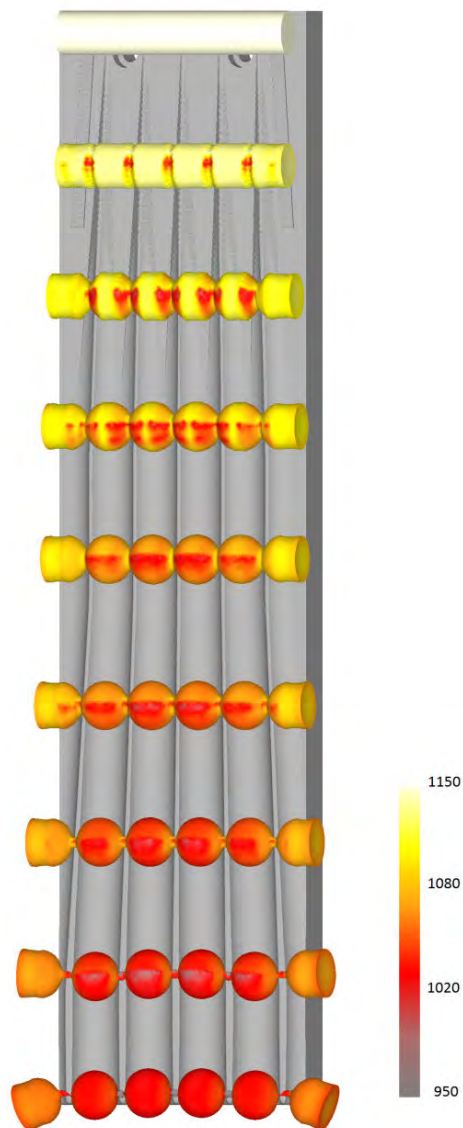
W przypadku walcowania równoległego wszystkie kule kształtowane są jednocześnie przez klinowo-wklęsłe powierzchnie narzędzi. W tym przypadku w procesie walcowania (rys. 4.10) zastosowano wsad w kształcie pręta o wymiarach $\varnothing 20 \times 110$ mm, którego średnica jest mniejsza od średnicy walcowanej kuli (średnica kuli wynosiła $\varnothing 22$ mm). Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach były identyczne jak w poprzednio analizowanym procesie.



Rys. 4.10. Model geometryczny procesu WPK kul metodą równoległą wykonany w programie Deform-3D: 1 – klin dolny, 2 – klin górny, 3 - wsad

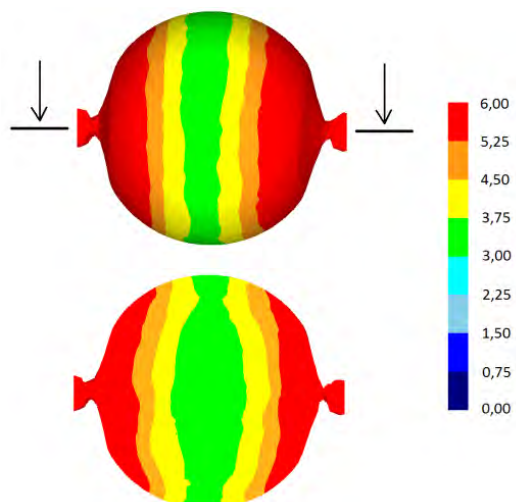
Kolejne etapy procesu WPK metodą równoległą pokazano na rys. 4.11. W początkowej fazie walcowania we wsad, pozycjonowany za pomocą ścieżek prowadzących, następuje jednocześnie wcinanie się wszystkich klinów kształtujących, które kształtują przewężenia oddzielające poszczególne kule. Nacięcia technologiczne wykonane na bocznych powierzchniach klinów zwiększają siły wywołujące obrót wsadu i przeciwdziałają wystąpieniu niekontrolowanego poślizgu. W kolejnym etapie procesu kształt kul podlega kalibrowaniu przez wklęsłe powierzchnie występow. Następnie ma miejsce rozdzielanie kul, które realizowane jest poprzez wciskanie w materiał specjalnych obrzeży, których wysokość i szerokość ulega stopniowemu zwiększeniu. Na uwagę zasługuje fakt, iż można zmniejszyć boczne odpady technologiczne wskutek zmniejszenia długości wsadu.

Na rys. 4.12 przedstawiono jedną z kul otrzymanych w procesie WPK metodą równoległą. Jej kształt jest gorszy od uzyskanego w procesie WPK metodą zwykłą. Kule ulegają zniekształceniu w trakcie rozcinania, które przejawia się spłaszczeniem powierzchni bocznych odkuwek. Dodatkowo w miejscu rozdzielania może pozostać zadziór (w procesie rzeczywistym powinien być on mniejszy, ze względu na zbliżenie noży rozcinających do siebie). Należy przy tym zauważyć, że otrzymany kształt kuli można uznać za zadowalający w przypadku przeznaczenia jej na mielniki, gdzie nie jest wymagana duża dokładność wykonania. Na rys. 4.10 przedstawiono również rozkład intensywności odkształcenia. Największym odkształceniom materiał podlega w obszarach połączeń walcowanych kul, gdzie miało miejsce rozdzielanie odkuwek. W znacznie mniejszym stopniu odkształcana jest środkowa część kuli, gdzie dochodzi do zwiększenia średnicy półfabrykatów.

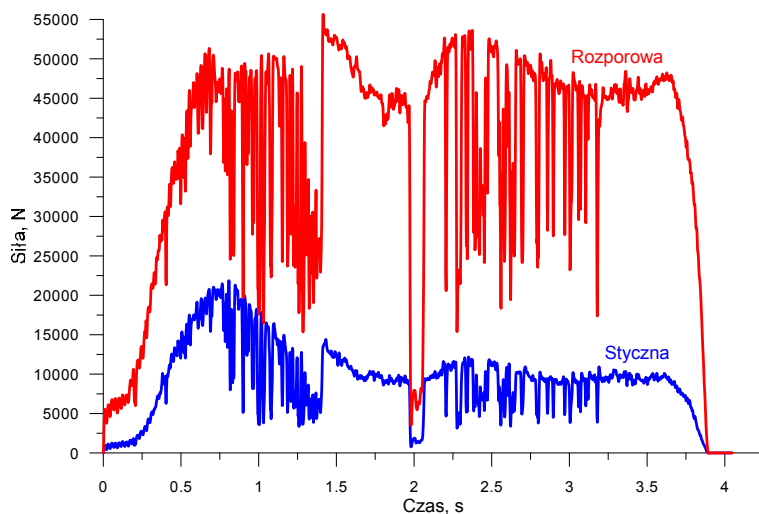


Rys. 4.11. Progresja kształtu wyrobów w procesie WPK metodą równoległą z zaznaczonym rozkładem temperatury (w °C)

Ze względu na planowaną weryfikację doświadczalną procesu w trakcie symulacji analizowano również parametry siłowe WPK metodą równoległą. Prognozowane rozkłady sił rozporowej i stycznej pokazano na rys. 4.13. Charakter otrzymanych rozkładów odbiega zasadniczo od uzyskanego dla procesu WPK metodą zwykłą. Maksymalna siła wciskająca klin (styczna) pojawia się w początkowym etapie procesu i osiąga wartość około 20 kN, co jest związane z zagłębianiem się wszystkich narzędzi klinowych w półfabrykat. Następnie w obszarze kształtowania powierzchni sferycznych półfabrykatów wartości siły stycznej znacznie spadają. Widoczne jest również, że proces jest możliwy do realizacji w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej (ze względu na stosunkowo niewielkie wartości siły stycznej).



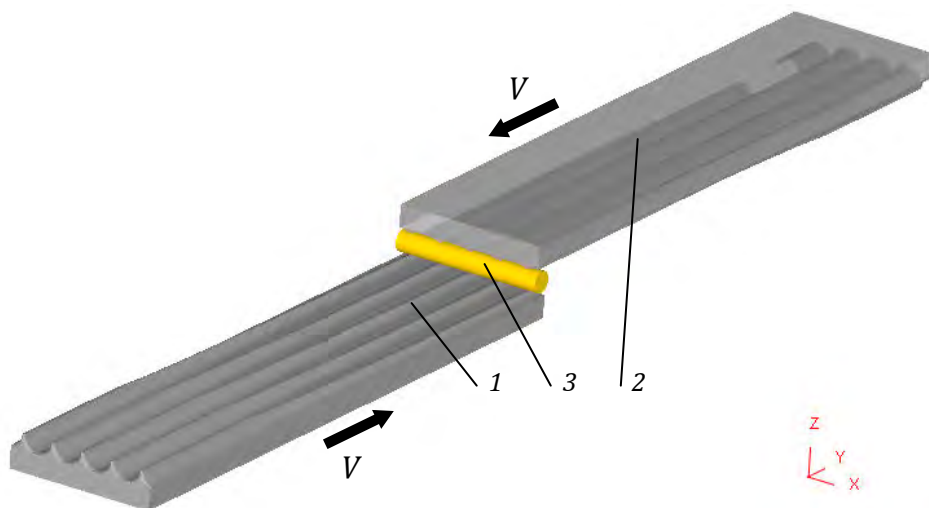
Rys. 4.12. Rozkład intensywności odkształcenia w kuli otrzymanej w procesie WPK metodą



Rys. 4.13. Rozkłady sił walcowania obliczone dla procesu WPK metodą równoległą

4.3.3. Symulacje WPK kul ze spęszczaniem

W procesie WPK ze spęszczaniem zastosowano wsad o wymiarach $\varnothing 17 \times 120$ mm. Zatem ukształtowanie kul według tego schematu wymaga spęczenia średnicy wsadu aż o 29,4%. Model geometryczny procesu WPK ze spęszczaniem pokazano na rys. 4.14. Podobnie jak w poprzednio analizowanych przypadkach w skład modelu wchodzi dwa narzędzia oraz wsad. Na powierzchniach roboczych narzędzi wykonano równoległe występy o wklęsłych powierzchniach bocznych, które stopniowo zwiększają swoją wysokość. Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach były identyczne jak w poprzednio analizowanych wariantach walcowania.

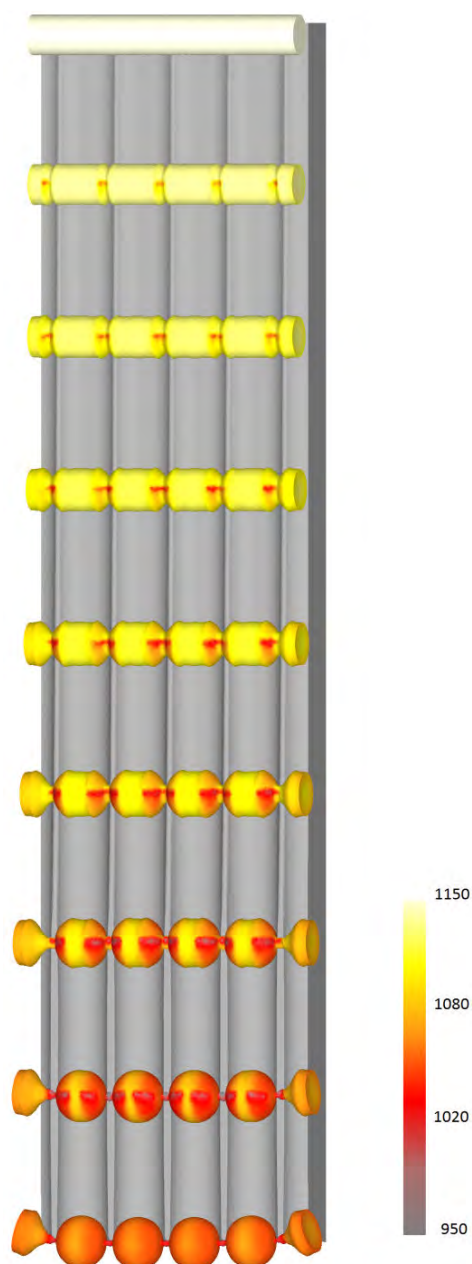


Rys. 4.14. Model geometryczny procesu WPK ze spęczaniem wykonany w programie Deform-3D

Przebieg procesu WPK ze spęczaniem półfabrykatów kul przedstawiono na rys. 4.15. W trakcie walcowania jednocześnie kształtowane są wszystkie kule za pomocą równoległych obrzeży narzędzi, które stopniowo zwiększają swoją wysokość, a pod koniec procesu także szerokość. Cechą charakterystyczną tego sposobu walcowania jest to, że objętość materiału zamykana między sąsiednimi obrzeżami jest równa objętości kuli. W początkowej fazie procesu obrzeża wciskają się w materiał kształtując pierścieniowe przewężenia. Następnie wklęsłe powierzchnie boczne obrzeży zbliżają się do siebie ściskając materiał leżący między nimi, w wyniku czego kształtowane są kule o średnicy większej od wymiaru zastosowanego wsadu. Na tym etapie procesu powinno dojść także do rozdzielenia poszczególnych kul. Analizując progresję kształtu przedstawioną na rys. 4.16 widoczne jest, że proces WPK ze spęczaniem przebiega w sposób stabilny. Temperatura na powierzchni materiału wynosi około 1020 °C i umożliwia przeprowadzenie hartowania kul bezpośrednio po procesie walcowania.

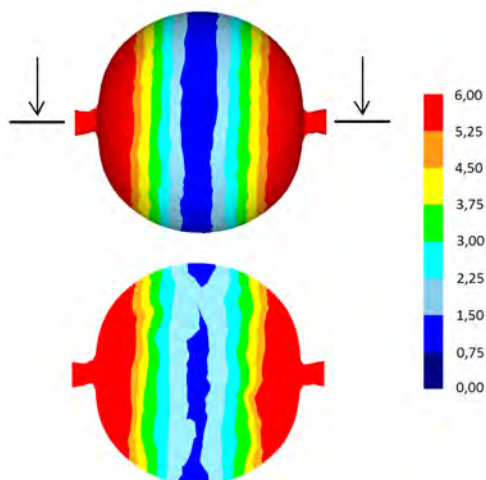
Kształt kuli uzyskanej w procesie WPK ze spęczaniem wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia pokazano na kolejnym rys. 4.16. Na podstawie danych przedstawionych na tym rysunku można stwierdzić, że kula uzyskuje pożądany kształt kulisty (lepszy niż w procesie WPK metodą równoległą). Równocześnie w miejscach rozdzielania mogą występować zadziory, jako pozostałości po rozdzielaniu kul. Ich wielkość będzie jednak nieznaczna, gdyż rozstaw między obrzeżami narzędzia górnego i dolnego w procesie rzeczywistym będzie minimalny (>1 mm).

Rozkład intensywności odkształcenia na powierzchni oraz w przekroju kuli otrzymanej w procesie WPK ze spęczaniem (rys. 4.16) znacznie odbiega od otrzymanych w poprzednio analizowanych przypadkach. Odkształcenia rozkładają się w kształcie pierścieniowych warstw, położonych równoległe do obrzeży klinów. Największe odkształcenia występują w strefach bezpośredniego rozdzielania kul, natomiast znacznie najmniejsze w obszarze centralnym, w którym dochodzi do największego spęczenia materiału.



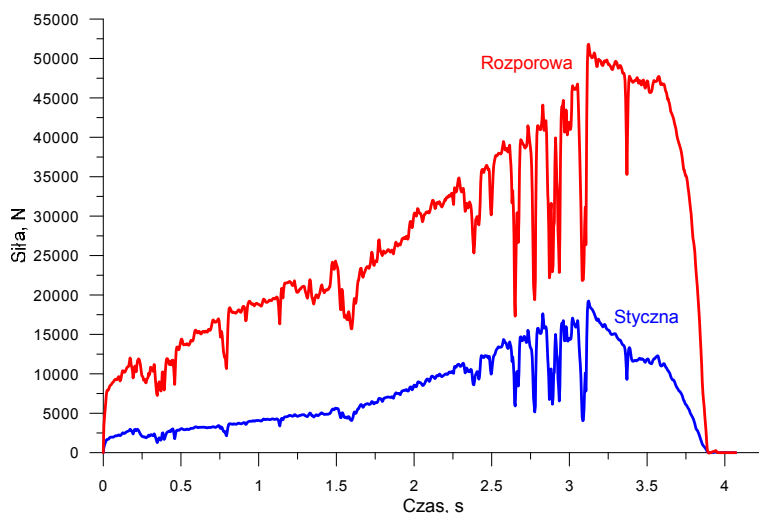
Rys. 4.15. *Progresja kształtu wyrobów w procesie WPK ze spęczaniem z zaznaczonym rozkładem temperatury (w °C)*

Na rys. 4.17 pokazano przebiegi sił w procesie WPK kul ze spęczaniem. Rozkłady te mają inny charakter niż w poprzednio rozważanych przypadkach. Mianowicie w procesie WPK ze spęczaniem siły zwiększają się stopniowo w trakcie kształtowania i uzyskują wartości maksymalne w chwili, gdy materiał między obrzeżami ulega spęczaniu.



Rys. 4.16. Rozkład intensywności odkształcenia w kuli otrzymanej w procesie WPK ze spęcaniem

Równocześnie można stwierdzić, że zarówno siła styczna jak i rozporowa w procesie WPK ze spęcaniem przyjmują wartości najmniejsze (spośród trzech rozważanych przypadków). Dlatego też można przypuszczać, że ten przypadek WPK będzie mniej energochłonny od dwóch poprzednich wariantów walcowania.

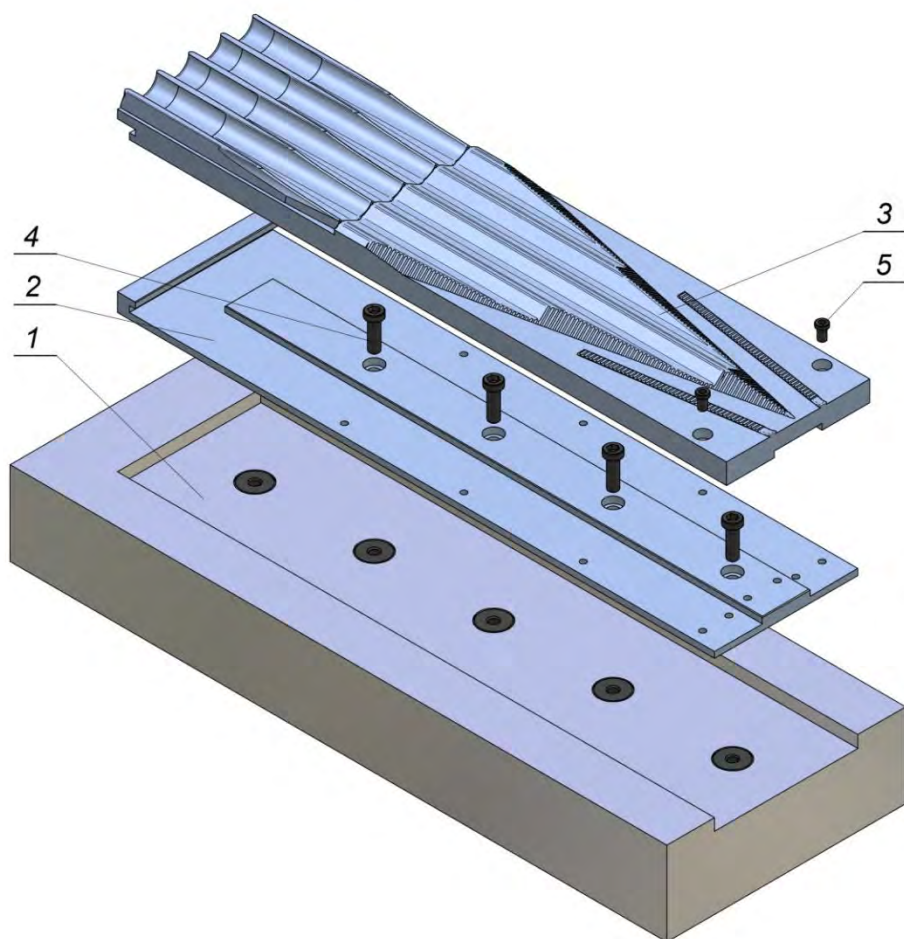


Rys. 4.17. Rozkłady sił walcowania obliczone dla procesu WPK ze spęcaniem

4.4. Konstrukcja narzędzi do WPK odkuwek kul

W oparciu o wyniki prowadzonych symulacji numerycznych opracowano konstrukcję narzędzi do weryfikacji doświadczalnej procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek kul $\varnothing 22$ według trzech analizowanych wariantów kształtowania.

Uzyskanie oduwek kul o wysokich parametrach geometrycznych uzależnione jest od właściwego opracowania konstrukcji narzędzi, które oprócz wywołania pożądanego kierunku płynięcia materiału, zabezpieczą ukształtowane wyroby przed różnego rodzaju deformacjami, jakie mogą się pojawić wyniku oddziaływania elementów technologiczno – konstrukcyjnych (wykorzystywanych między innymi do mocowania narzędzi w przestrzeni roboczej agregatu). Dlatego też opracowano specjalną oprawę, w której mocowano płasko-klinowe segmenty narzędziowe. W rezultacie czego uniknięto konieczności stosowania otworów mocujących w strefie kształtowania i kalibrowania narzędzi, które zakłócałyby proces i powodowały deformację odwalcowanych oduwek kul. Sposób mocowania narzędzi w przestrzeni roboczej walcarki przedstawiono na rysunku 4.18. Natomiast dokumentację konstrukcyjną opracowanych narzędzi płasko-klinowych do walcowania oduwek kul wg trzech wariantów pokazano na kolejnych rysunkach 4.19 – 4.21.



Rys. 4.18. Sposób mocowania płasko-klinowych segmentów narzędziowych w agregacie LUW-2:
1 – płyta suwaka, 2 – oprawa narzędzi, 3 – narzędzie, 4 – śruba mocowania oprawy, 4 – śruba
mocowania narzędzia



105

Rys. 4.21. Konstrukcja płasko-klinowego segmentu dolnego do WPK odkuwek kul ze spęszczaniem

4.5. Weryfikacja doświadczalna WPK odkuwek kul

W oparciu o płasko-klinową walcarkę LUW – 2 opisaną w podrozdziale 4.2 przeprowadzono próby laboratoryjne walcowania kul S $\varnothing$ 22, których celem była weryfikacja wyników symulacji numerycznych oraz ostateczne potwierdzenie możliwości walcowania kul trzema opracowanymi metodami.

4.5.1. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul metodą zwykłą

Narzędzia wykorzystane w procesie WPK kul metodą zwykłą (redukcji średnic) pokazano na rys. 4.22. Narzędzia wykonano zgodnie z dokumentacją konstrukcyjną ze stali narzędziowej do pracy na gorąco w gatunku 55NiCrMoV7 (WNL wg PN) [4]. W tym przypadku kule kształtowane były z pręta o średnicy $\varnothing$ 22 mm, a więc równej średnicy kuli i długości $L = 80$ mm.



Rys. 4.22. Widok narzędzi stosowanych w procesie WPK kul metodą zwykłą

Wsady nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury 1150 °C. Następnie umieszczano je w specjalnych wycięciach, wykonanych w narzędziu dolnym (rys. 4.23a). Po ustabilizowaniu pozycji wsadu włączano napęd walcarki i dwa przemieszczające się przeciwbieżnie narzędzia (z prędkością wynoszącą około 125 mm/s) kształtowały kule (rys. 4.23b), które po rozdzieleniu spadały na płytę dolną walcarki (rys. 4.23c). Stąd były one przenoszone na specjalny ruszt celem powolnego schłodzenia w swobodnym powietrzu. Część odwalcowanych kul bezpośrednio po kształtowaniu była również poddawana procesowi hartowania w wodzie.

W efekcie prowadzonego procesu walcowania uzyskano kule, które pokazano na kolejnym rys. 4.24. Otrzymane półwyroby kul w większości przypadków są od siebie oddzielone, wolne od pęknięć wewnętrznych, zawalcowań oraz łusek. Również miejsca rozdelenia odkuwek są stosunkowo dobrej jakości (nie zaobserwowano ostrych występow i zadziorów).



a)



b)



c)

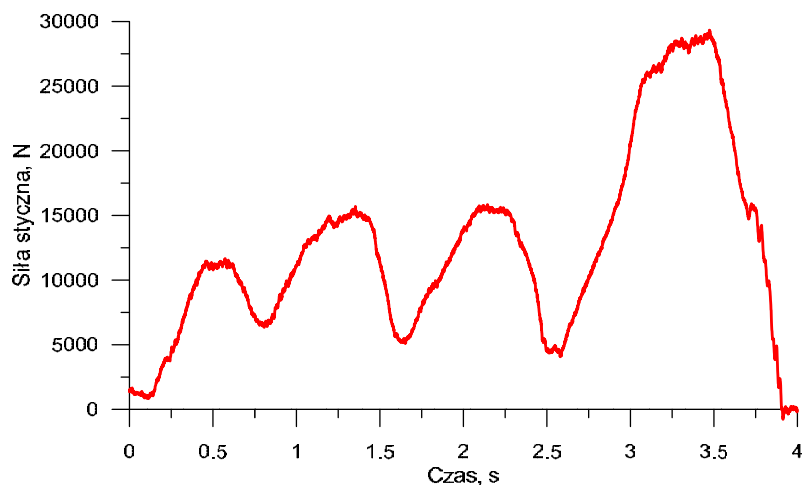
Rys. 4.23. Przebieg procesu WPK kul metodą zwykłą: a) umieszczenie wsadu w przestrzeni roboczej, b) walcowanie kul, c) koniec procesu

Natomiast analizując geometrię odwalcowanych wyrobów można zaobserwować niecałkowite wypełnienie zarysu kuli na jej obwodzie (rys. 4.23). Przyczyną takiego zjawiska jest intensywne płynięcie metalu w kierunku osiowym, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia objętości materiału zamkniętego w wykroju. Przy czym skrajne kule miały gorszą jakość od wyrobów walcowanych w środkowej części narzędzi, co potwierdza wcześniejsze spostrzeżenie. Jednak należy tutaj zaznaczyć, że w przypadku kształtowania kul z przeznaczeniem na mielniki, dokładność wykonania mieści się w zalecanych polu tolerancji. Natomiast w przypadku walcowania kul z przeznaczeniem na elementy toczne łożysk, niezbędne jest wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w narzędziach, które ograniczą osiowe płynięcie materiału.



Rys. 4.23. Odkuwki kul ze stali kolejowej R200 (szyna), otrzymane w procesie WPK metodą zwykłą

W procesie WPK kul metodą zwykłą rejestrowano także rozkłady siły stycznej (wciskającej klin), które pokazano rys. 4.24. Widoczne jest, że przebieg siły ma zbliżony charakter do tego, który wyznaczono numerycznie w trakcie symulacji (rys. 4.9). Siła zmienia się cyklicznie odwzorowując wcinanie się kolejnych powierzchni klinowych w materiał. Największą wartość siły uzyskuje w końcowej fazie kształtowania, gdy równocześnie walcowane są wszystkie kule przy jednoczesnym rozdzielaniu materiału. Maksymalna wartość siły wciskającej narzędzie, którą odnotowano w trakcie badań doświadczalnych jest blisko 30% wyższa w stosunku do wartości obliczonych, co można tłumaczyć dodatkowymi oporami w procesie rzeczywistym, związanymi z rozdzielaniem i kalibrowaniem odkuwek. Z uwagi na trudności natury numerycznej w trakcie symulacji nie zrealizowano całkowitego rozdzielania kul, co miało wpływ na wartość siły w etapie kalibrowania.



Rys. 4.24. Przebieg siły stycznej zarejestrowany w procesie WPK kul ze stali w gatunku R200, metodą zwykłą

4.5.2. Walcowanie kul metodą równoległą

Walcowanie kul metodą równoległą realizowano przy pomocy narzędzi klinowych pokazanych na rys. 4.25. Narzędzia wyposażono w specjalne ścieżki prowadzące, które miały za zadanie wymusić ruch obrotowy wsadu w początkowej fazie kształtowania. Dodatkowo w narzędziu dolnym zastosowano specjalne wybranie, w którym umieszczano wsad.

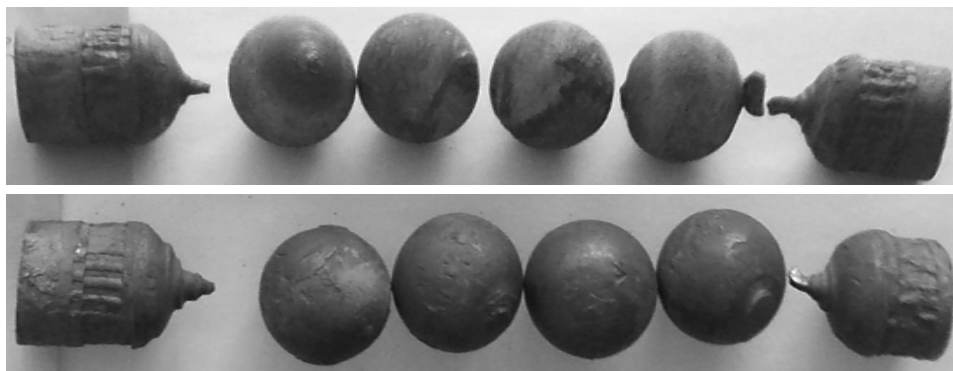


Rys. 4.25. Widok narzędzi stosowanych w procesie WPK kul metodą równoległą

W procesie walcowania stosowano wsady o średnicy $\varnothing 20$ mm i długości $L = 110$ mm, wykonane ze stali kolejowej R200. Przebieg procesu walcowania był identyczny jak w poprzednio omawianym procesie WPK metodą zwykłą.

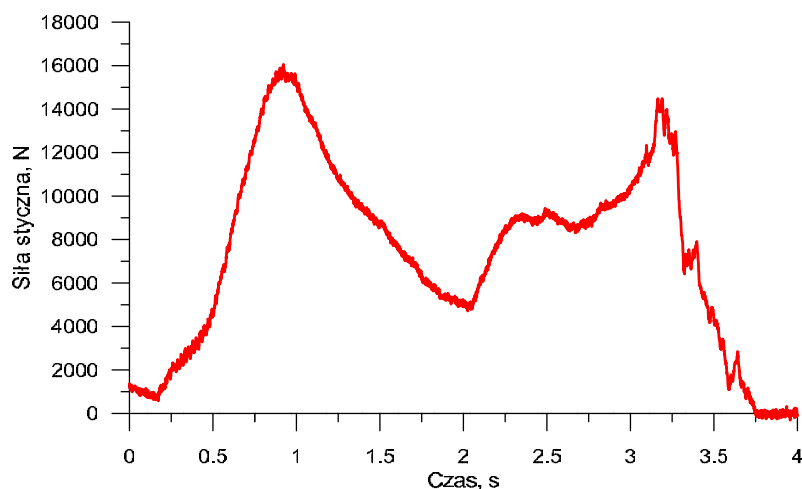
W efekcie zrealizowanego procesu odwalcowano kilka zestawów kul, które charakteryzowały się dużą zgodnością kształtu z zarysem teoretycznym. Przykładowe półfabrykaty ukształtowane w trakcie prób pokazano na kolejnym rys. 4.26. Na uwagę zasługuje fakt, iż w tym przypadku kule mają odpowiedni kształt również w strefie rozdzielania, gdzie czasami może powstawać niewielki zadzior. Dokładność odwalcowanych kul mieści się w tolerancji wykonania $\pm 0,3$ mm [103], dlatego też mogą być z powodzeniem wykorzystywane jako półfabrykaty elementów tocznych łożysk. Widoczne na powierzchni kul niewielkie wgniecenia mieszczą się w nadadtku na późniejszą obróbkę wykańczającą, a ich wielkość może być zniwelowana w drodze zastosowania nagrzewania indukcyjnego, zmniejszającego ilość zgorzeliny. Metodą równoległą WPK można rekomendować do wytwarzania kul przeznaczonych na łożyska toczne.

W trakcie walcowania metodą równoległą rejestrowano również rozkłady siły wciskającej klin (stycznej), które pokazano na rysunku 4.27.



Rys. 4.26. Odkuwki kul ze stali R200, otrzymane w procesie WPK metodą równoległą

W tym przypadku siła kształtowania ma dwa maksima lokalne. Pierwsze po ukształtowaniu kul połączonych łącznikami i drugie występujące w końcowej fazie procesu, tj. podczas rozdzielania kul. Na uwagę zasługuje fakt, iż w tym przypadku walcowania siła maksymalna jest blisko dwa razy mniejsza niż w poprzednio omawianym procesie WPK metodą zwykłą. Zatem realizacja tego schematu kształtowania może być przeprowadzona w agregacie o znacznie mniejszej mocy. Widoczne jest również, że wartości maksymalne siły zmierzone w trakcie prób oraz obliczone MES (rys. 4.13) są do siebie zbliżone. Przy czym rozkład siły wyznaczony numerycznie charakteryzuje tylko jedno maksimum w początkowej fazie walcowania, natomiast końcowy etap walcowania (w symulacji) przebiegał przy stosunkowo stałych wartościach sił, co było spowodowane niecałkowitym rozdzieleniem odkuwek kul (spowodowanych trudnościami numerycznymi).



Rys. 4.27. Przebieg siły stycznej zarejestrowany w procesie WPK kul ze spęczaniem ze stali w gatunku R200

4.5.3. Walcowanie kul metodą wsteczną

Do walcowania poprzeczno-klinowego kul ze spęczaniem wykorzystano narzędzia pokazane na rys. 4.28. Cechą charakterystyczną tych narzędzi jest to, że występy kształtujące kule są równoległe do kierunku walcowania. Podobnie jak w poprzednich wariantach narzędzia wykonano ze stali narzędziowej do pracy na gorąco, przy czym na powierzchniach roboczych nie stosowano nacięć technologicznych.



Rys. 4.28. Widok narzędzi stosowanych w procesie WPK kul metodą ze spęczaniem

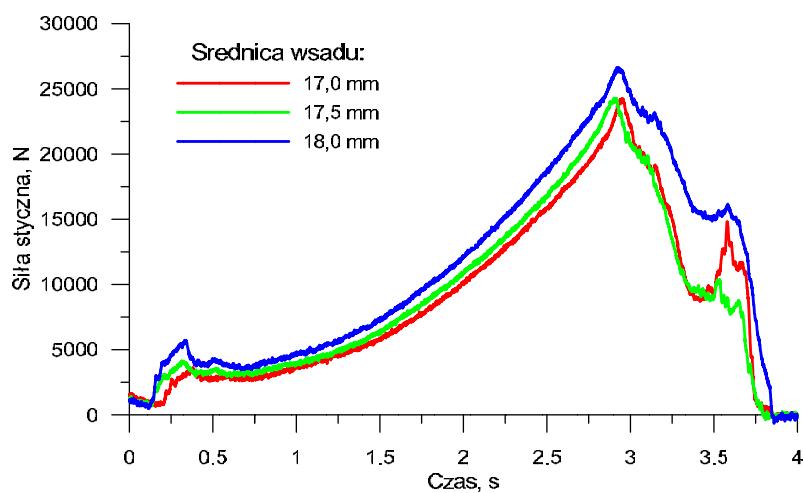
W trakcie walcowania kształtowano kule z wsadów o różnych średnicach i długości $L = 120$ mm, wykonanych ze stali kolejowej R200. Średnica zastosowanych półfabrykatów wynosiła $\varnothing 17$ mm, $\varnothing 17,5$ mm oraz $\varnothing 18$ mm.

Analizując kształt odwalcowanych wyrobów widoczne jest, że jedynie dla wsadów o średnicy $\varnothing 18$ mm uzyskano prawidłowe wypełnienie wykrojów (rys. 4.29). W pozostałych dwóch przypadkach (tj. dla wsadów $\varnothing 17$ mm i $\varnothing 17,5$ mm) kule były niewypełnione w strefie centralnej. Należy przy tym zaznaczyć, że kształt kul ulegał spłaszczeniu w obszarach rozdzielania. Tego typu deformacja może dyskwalifikować wyroby w przypadku produkcji kul jako półfabrykaty elementów tocznych łożysk. Natomiast zaobserwowane spłaszczenie jest w pełni akceptowalne przy wytwarzaniu mielników. W tym przypadku najważniejsze jest, iż kule nie mają żadnych ostrych występow (zadziorów), które mogłyby niszczyć okładziny młynów kulowych.

W trakcie walcowania rejestrowano również przebiegi siły stycznej (powodującej przemieszczanie narzędzia), które przedstawiono na kolejnym rys. 4.30. Cechą charakterystyczną jest sukcesywny wzrost siły w trakcie walcowania, która osiąga wartość maksymalną w momencie, gdy występy narzędzi wcisną się w materiał na maksymalną głębokość, doprowadzając do jego rozdzielania. Następnie w czasie kalibrowania kul siły stopniowo zmniejszają swoje wartości. Zgodnie z oczekiwaniami, zwiększenie średnicy wsadu powoduje nieznaczny wzrost sił kształtowania, wynikający z lepszego wypełnienia wykrojów.



Rys. 4.29. Odkuwki kul ze stali R200, otrzymane w procesie WPK metodą ze spęczaniem: a) ze wsadu o średnicy $\varnothing 18$ mm, b) ze wsadu o średnicy $\varnothing 17,5$ mm, c) ze wsadu o średnicy $\varnothing 17$ mm



Rys. 4.30. Przebiegi sił stycznych zarejestrowanych w procesie WPK kul ze spęczaniem ze stali w gatunku R200

5. Próby przemysłowe WPK kul

W ramach wykonanych prac badawczych przeprowadzono próby walcowania kul w warunkach przemysłowych Górniczej Fabryki Narzędzi Sp. z o.o. (GFN) w Radzynie Podlaskim. W zakładzie tym znajduje się walcarka poprzeczno-klinowa SP2000 (rys. 5.1), wykorzystywana dotychczas do kształtowania wkrętów kolejowych. Równocześnie w przedsiębiorstwie tym wytwarzane były kule (metodą kucia matrycowego na prasach śrubowych), stosowane w młynach kulowych wykorzystywanych w zakładach produkujących materiały budowlane.

Wybór walcarki narzucił ograniczenia na gabaryty narzędzi, których długość nie mogła przekroczyć 940 mm. Odnośnie wymiarów maksymalnych elementów walcowanych należy podać, że w walcarce SP2000 można kształtować odkuwki w zakresie średnic $25 \div 60$ mm oraz długości maksymalnej (przy zastosowaniu noży odcinających) do 320 mm.

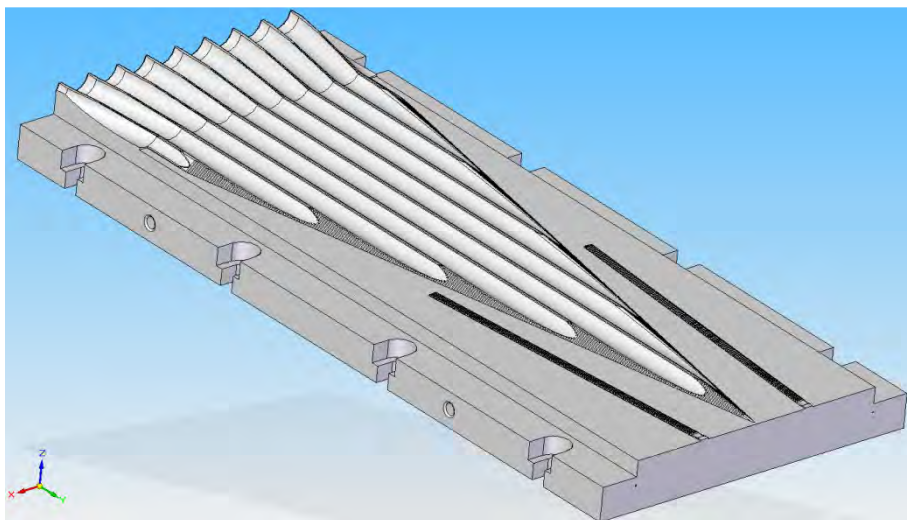
Mając na uwadze zapotrzebowanie na wytwarzane kule branży producentów materiałów budowlanych, zdecydowano się na walcowanie kul $S\varnothing 35$ mm. Ostatecznie przeanalizowano trzy warianty narzędzi klinowych, których poprawność konstrukcji wstępnie zweryfikowano stosując metody modelowania numerycznego.



Rys. 5.1. Gniazdo walcarki płaskoklinowej SP 2000, znajdujące się w GFN w Radzynie Podlaskim

5.1. WPK ośmiu kul metodą zwykłą

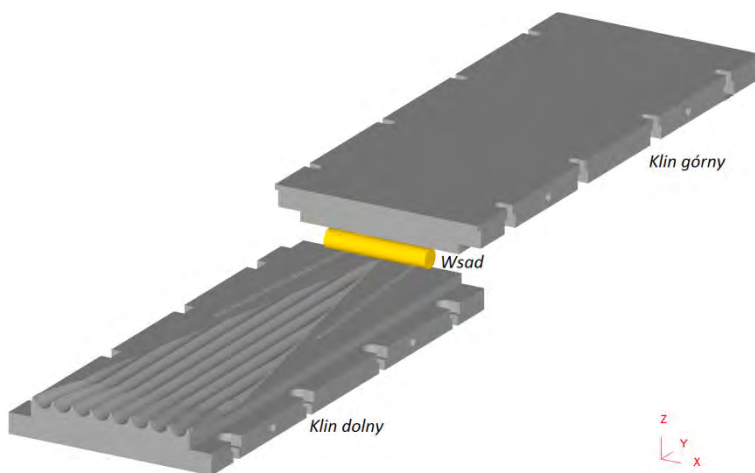
Dążąc do maksymalizacji wydajności wytwarzania w pierwszej kolejności rozważono proces WPK metodą zwykłą 8 kul. Narzędzie klinowe zabezpieczające proces walcowania, zaprojektowane w programie SolidEdge, pokazano na rys. 5.2. W pracach projektowych (przy doborze parametrów kątowych klina) wykorzystano wiedzę o procesie WPK kul, nabytą w ramach wykonanych analiz numerycznych.



Rys. 5.2. Model geometryczny jednego z narzędzi klinowych, wykonany w programie SolidEdge, wykorzystywanych w procesie WPK ośmiu kul o średnicy 35 mm

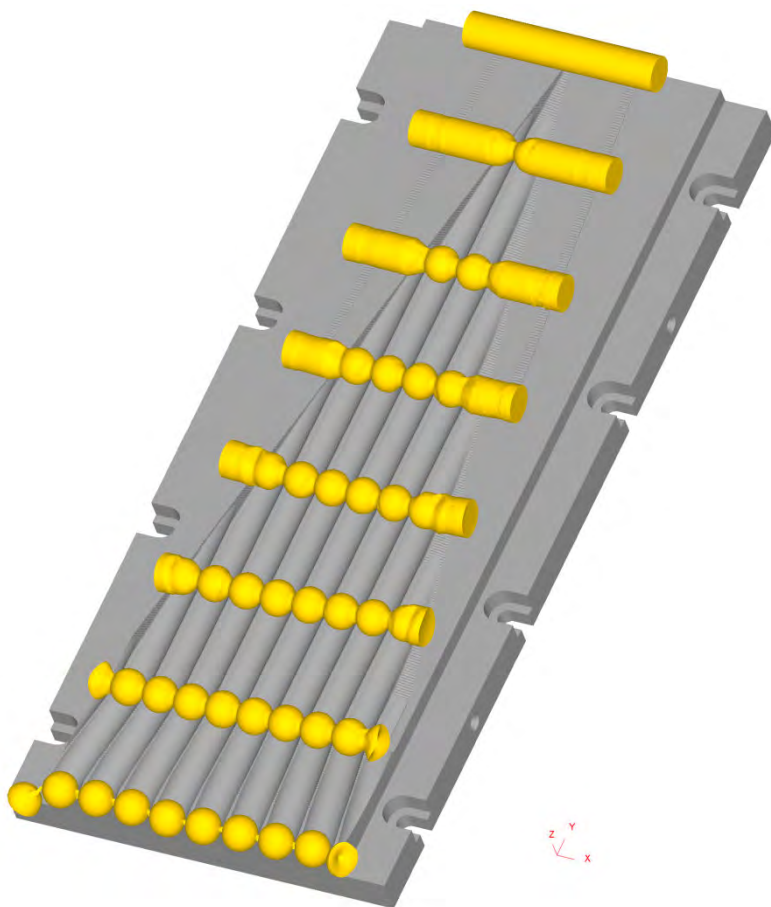
W obliczeniach sprawdzających poprawność przyjętego rozwiązania założono, że kule walcowane są z pręta o wymiarach $\varnothing 36 \times 206$ mm, wykonanego ze stali szynowej w gatunku R200, o temperaturze początkowej 1150°C . Założono, że podczas walcowania przemieszcza się tylko klin górny (z prędkością $0,4$ m/s), gdyż taki schemat procesu WPK realizowany jest w walcarce SP2000. Ponadto, przyjęto, że: narzędzia mają stałą temperaturę 150°C , czynnik tarcia na powierzchni kontaktu materiał-narzędzie ma wartość graniczną $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami wynosi $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, a między materiałem a otoczeniem $0,2 \text{ kW/m}^2\text{K}$.

Na rys. 5.3 przedstawiono model geometryczny procesu WPK ośmiu kul $S\varnothing 35$ mm, zbudowany w programie Deform-3D, który wykorzystano w symulacji numerycznej.



Rys. 5.3. Model geometryczny procesu WPK 8 kul $S\varnothing 35$ mm, zbudowany w programie Deform-3D

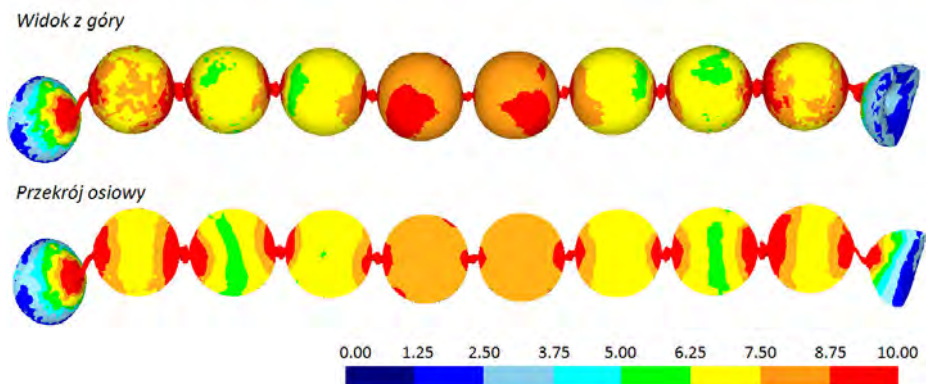
Przebieg analizowanego procesu WPK przedstawiono na kolejnym rys. 5.4. Widoczne jest, że kształtowanie przebiega w sposób prawidłowy. Kule walcowane są kolejno parami, począwszy od środka wsadu. Niekontrolowany poślizg nie ma miejsca, co zawdzięcza się głównie nacięciom technologicznym na powierzchni kształtującej klinów oraz ścieżkach prowadzących (pozycjonujących wsad w początkowej fazie walcowania). Po ukształtowaniu kul (połączonych łącznikami o średnicy $\varnothing 17$ mm) następuje ich rozdzielanie w efekcie wciśnięcia w materiał noży o stopniowo zwiększającej się wysokości. W trakcie rozcinania występuje wydłużenie materiału, co uwzględniono odchyłając noże od kierunku walcowania. Ostateczne rozdzielanie kul powinno nastąpić w wyniku zerwania łączących je cienkich łączników (mostków), co może jednakże skutkować pozostaniem zadziorów w miejscach rozdzielania.



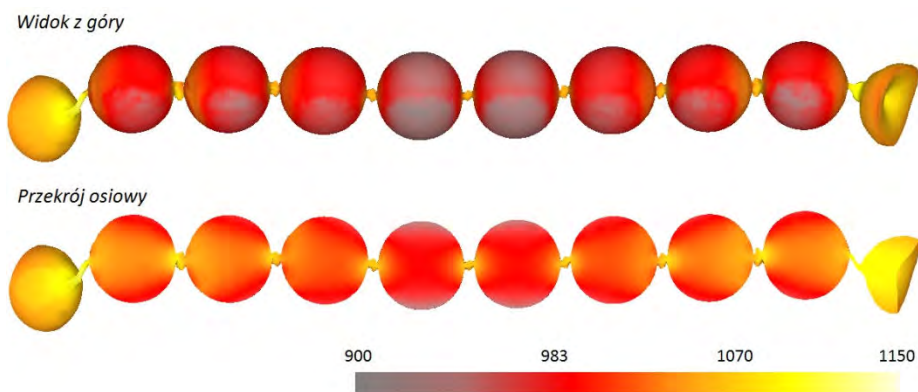
Rys. 5.4. Przebieg procesu jednoczesnego walcowania ośmiu kul o średnicy 35 mm

Na rys. 5.5 pokazano rozkłady intensywności odkształcenia w półwyrobach kul otrzymanych w analizowanym procesie WPK. Widoczne jest, że najintensywniej materiał został odkształcony w kulach centralnych, ukształtowanych na samym początku procesu, co należy przypisać długotrwałemu oddziaływaniu sił tarcia wywołujących płynięcie po-

stacjonarnego materiału. Ponadto, zauważono (zgodnie z oczekiwaniami), że największe odkształcenia występują w miejscach łączenia poszczególnych kul, gdzie miała miejsce największa redukcja przekroju poprzecznego wsadu.



Rys. 5.5. Rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobach kul $S\varnothing 35$ mm, walcowanych w układzie 8 sztuk

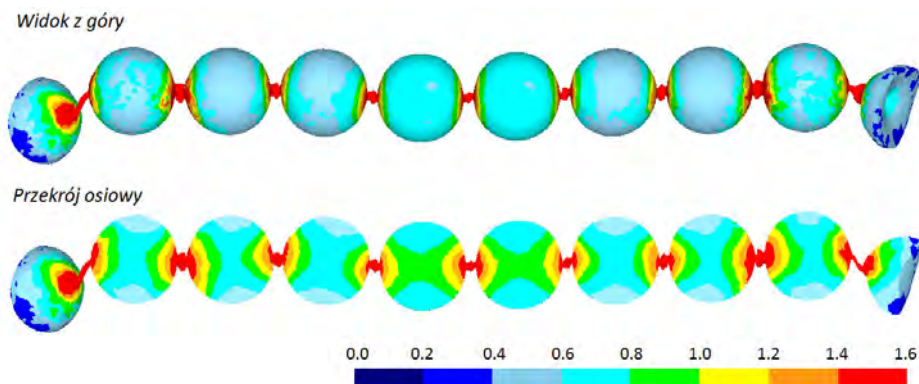


Rys. 5.6. Rozkład temperatury (w °C) w półwyrobach kul $S\varnothing 35$ mm, walcowanych w układzie 8 sztuk

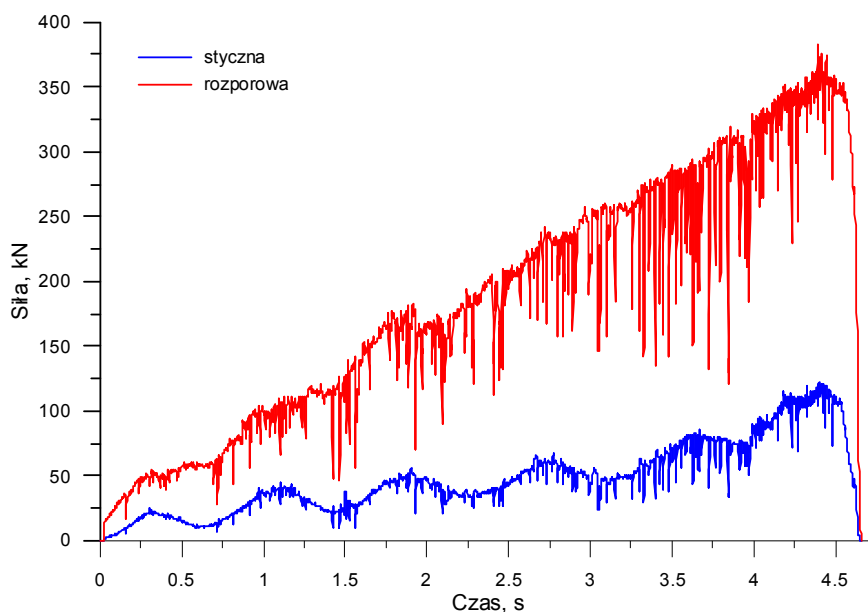
Pomimo dość długiego czasu kształtowania (wynoszącego prawie 5 s) materiał nie ulega zbyt niemu wychłodzeniu – rys. 5.6. Temperatura materiału we wszystkich kulach przekracza 900°C, co umożliwia bezproblemowe przeprowadzenie operacji hartowania w wodzie bezpośrednio po walcowaniu. Odnośnie rozkładu temperatury w poszczególnych kulach należy podać, iż jest ona większa w ich wnętrzu (o ok. 50°C), co jest efektem odprowadzania ciepła z warstw powierzchniowych materiału do chłodniejszych narzędzi. Celem wyrównania temperatury kul należałoby je przetrzymać przed hartowaniem przez krótki czas (kilkunastu sekund) na podłożu wykonanym z materiału słabo przewodzącego ciepło.

Na kolejnym rys. 5.7 przedstawiono rozkład funkcji zniszczenia obliczonej zgodnie z kryterium Cockrofta-Lathama. Widoczne jest, że funkcja ta przyjmuje największe

wartości w mostkach łączących kule. Tamże należy spodziewać się pęknięcia materiału prowadzącego do rozdzielenia poszczególnych półwyrobów kul.



Rys. 5.7. Rozkład funkcji zniszczenia wg kryterium Cockrofta-Lathama w półwyrobach kul $\varnothing 35$ mm, walcowanych w układzie 8 sztuk



Rys. 5.8. Rozkłady sił kształtowania w procesie WPK ośmiu kul $\varnothing 35$ mm

Ważną informacją otrzymaną z analizy numerycznej są rozkłady sił kształtowania (styczna – przemieszczającej narzędzie klinowe i rozporowej – decydującej o dokładności wykonania półwyrobów), które pokazano na rys. 5.8. Widoczne jest, że siła styczna ma charakterystyczny wahadłowy rozkład, będący efektem zmiany stopnia gniotu w trakcie przemieszczania klina. Natomiast siła rozporowa praktycznie wzrasta w trakcie całego procesu walcowania. Obie siły przyjmują wartości największe w końcowej fazie

procesu, tj. podczas rozdzielania kul. Siła rozporowa przyjmuje wartości około 3x większe od siły stycznej. Taki stosunek wartości sił jest charakterystyczny dla procesu WPK.

Pozytywne wyniki symulacji numerycznej zdecydowały o przeprowadzeniu prób walcowania w warunkach GFN w Radzynie Podlaskim. Na rys. 5.9 przedstawiono narzędzia zabezpieczające proces WPK 8 kul $S\varnothing 35$ mm metodą zwykłą, które zostały wykonane przez GFN, pod nadzorem pracowników Politechniki Lubelskiej, będących autorami zastosowanego rozwiązania.



Rys. 5.9. Narzędzia klinowe do WPK 8 kul $S\varnothing 35$ mm, zamontowane w walcarce SP2000

Proces walcowania poprzeczno – klinowego kul był realizowany przy temperaturze $1050\div 1100^{\circ}\text{C}$, z wykorzystaniem kompletu narzędzi klinowych przedstawionych na rys. 5.9. Materiał wsadowy (w postaci prętów o średnicy $\varnothing 36$ mm ze stali w gatunku C45) był cięty na prasie PMS na długość 180 mm i po nagraniu do w/w temperatury został przy pomocy kleszczy wprowadzony w przestrzeń kształtowania pomiędzy segmenty narzędziowe. Po uruchomieniu walcarki narzędzia poruszające się ruchem posuwistym ukształtowały kule, które były połączone ze sobą wypustami o kształcie elipsoidalnym o przekroju poprzecznym od 2 do 6 mm (rys. 5.10) i dodatkowo posiadały nawalcowany nadmiar materiału w okolicach osi rozcinania. Kule połączone w tak zwany „łańcuszek” po zahartowaniu odłamywały się i miały wady zewnętrzne w postaci wypustów, które eliminowały możliwość sprzedawania wyrobu na rynek zewnętrzny. Wymienione wady kształtu powodowały bowiem znaczne zużycie okładzin w młynach kulowych.

Przyczyną niedocinania kul były prawdopodobnie bardzo duże siły rozporowe, szacowane za pomocą MES na wartość ok. 350 kN (rys. 5.8), powodujące odkształcenia korpusu maszyny pod koniec procesu kształtowania, prowadzące w efekcie do zwiększenia odległości między narzędziami górnym i dolnym.



Rys. 5.10. Kule odwalcowane w walcarce SP2000, w układzie 8 sztuk

W celu poprawy kształtu zastosowano dodatkową operację gradowania kul w bębnie. Podczas prób do bębna załadowano około 1500 kg odwalcowanych kul, następnie uruchomiono go i pozostawiono na czas około 4 godzin. Po wyłączeniu zasilania półwyroby wsypano w paletę. Kształt zewnętrzny nie uległ żadnej zmianie, występujące zadziory nie uległy wyłamaniu. Zastosowanie gradowania nie przyniosło założonych efektów.

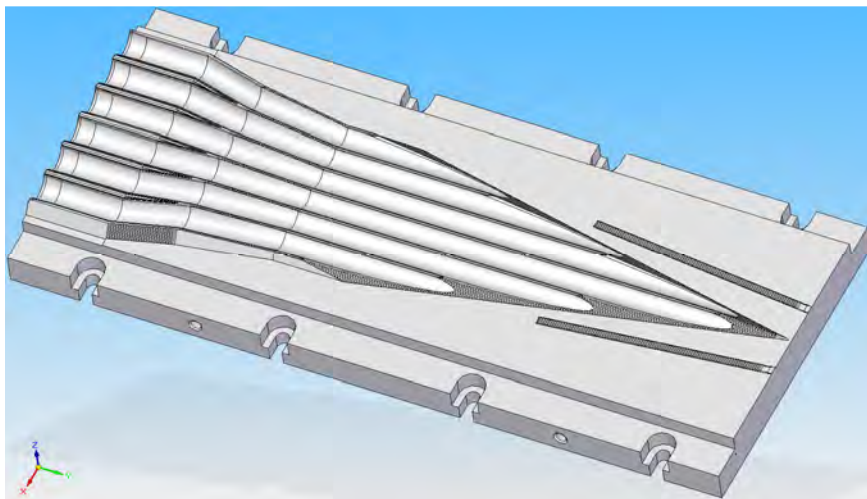
Należy podkreślić, że kule powinny posiadać odpowiedni kształt (umożliwiający ich sprzedaż) bezpośrednio po operacji walcowania i hartowania. Każda dodatkowa operacja, czy to okrawania, czy czyszczenia ślusarskiego, podnosi koszty produkcji powodując nieopłacalność wytwarzania kul. Jediną możliwością zmiany kształtu kul jest zatem zmiana konstrukcji segmentów narzędziowych. Dla sprawdzenia, która strefa narzędzi odpowiadała za nieprawidłowy kształt kul przeprowadzono dodatkowe próby walcowania narzędziami bez strefy odcinającej. Na rys. 5.11 przedstawiono półwyrób uzyskany w próbach dodatkowych. Z rysunku tego wynika, że kule są poprawnie ukształtowane i połączone przewężeniem, którego przekrój poprzeczny jest okrągły, a nie tak jak w próbach ze strefą odcinającą, gdzie mieliśmy do czynienia z elipsoidalnymi wypustkami i nadmiarem materiału w miejscach rozcinania. Zatem, uznano, że do błędnego kształtowania dochodzi w strefie odcinania, którą należy zmienić.



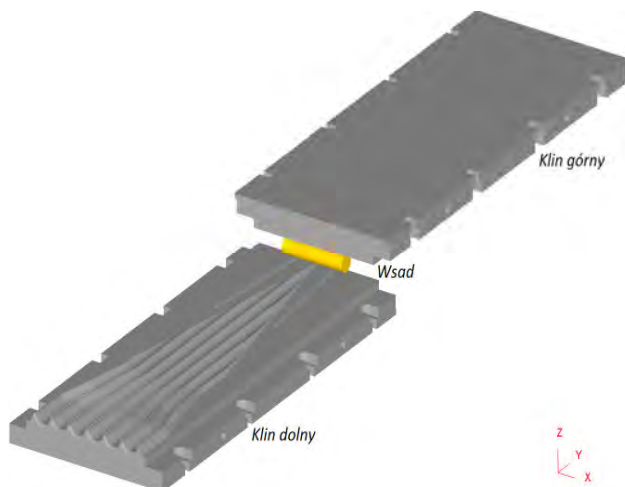
Rys. 5.11. Półwyroby kul odwalcowane narzędziami pozbawionymi noży rozcinających, służących do rozdzielania kul

5.2. WPK sześciu kul metodą zwykłą

Mając na uwadze problemy, jakie powstały podczas rozdzielania półwyrobu składającego się z 8 kul, rozważono nową wersję walcowania, w której wydłużono strefę rozcinania. Niestety, w konsekwencji zmniejszono liczbę kształtowanych półwyrobów kul do sześciu. Na rys. 5.12 przedstawiono narzędzie klinowe zabezpieczające realizację zmodernizowanego procesu WPK. W rozwiązaniu tym wydłużony jest łącznik (mostek) łączący poszczególne kule, który w końcowej fazie procesu odcinany jest od kul za pomocą specjalnych (dwustronnych) noży klinowych.



Rys. 5.12. Model geometryczny jednego z narzędzi klinowych, wykonany w programie SolidEdge, wykorzystywanych w procesie WPK sześciu kul o średnicy 35 mm

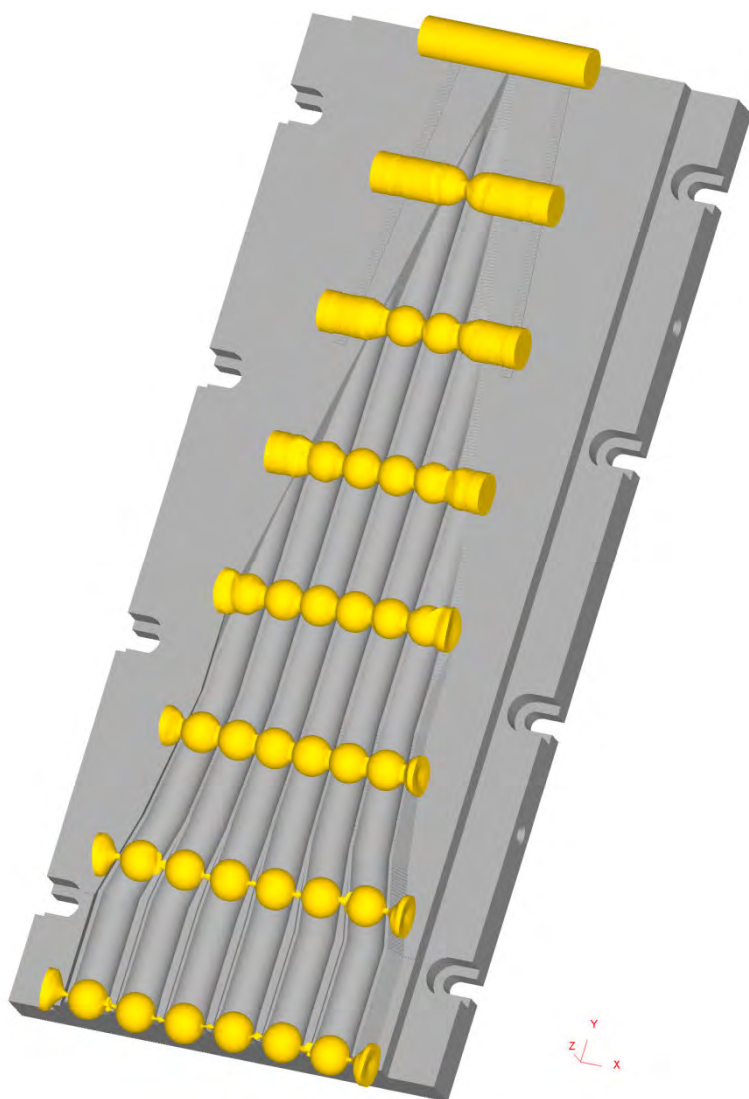


Rys. 5.13. Model geometryczny procesu WPK sześciu kul $\varnothing 35$ mm, zbudowany w programie Deform-3D

Podobnie jak w przypadku poprzednim sprawdzenia poprawności rozwiązania dokonano metodą modelowania numerycznego. Na rys. 5.13 przedstawiono model geometryczny

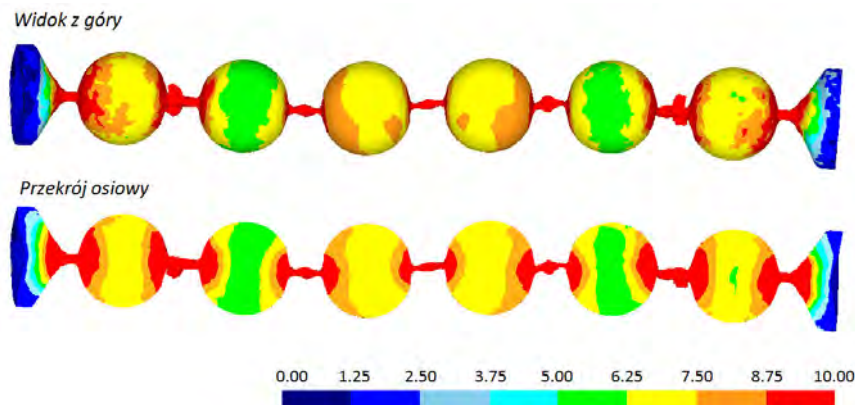
tryczny rozważanego procesu, który przebiegał przy identycznych parametrach jak podczas walcowania 8 kul (skróceniu uległ tylko wsad).

Przebieg procesu walcowania zilustrowano na rys. 5.14. Pokazuje on, iż do etapu kalibrowania kształtowanie przebiega identycznie jak poprzednio. Następnie obrzeża narzędzi wciskają się między kule i rozsuwają je na boki tak, by możliwe było odcięcie zadziorów za pomocą dwustronnych noży klinowych. Najbardziej przemieszczane są kule skrajne. Ruch ten jest tak intensywny, że może dojść wręcz do zdeformowania powierzchni bocznej kul, na które naciska obrzeże. Jednakże deformacja ta (spłaszczenie) nie jest istotna w przypadku kształtowania kul na mielniki (przeciwnie niż zadziory, które mogą niszczyć okładziny młynów kulowych).



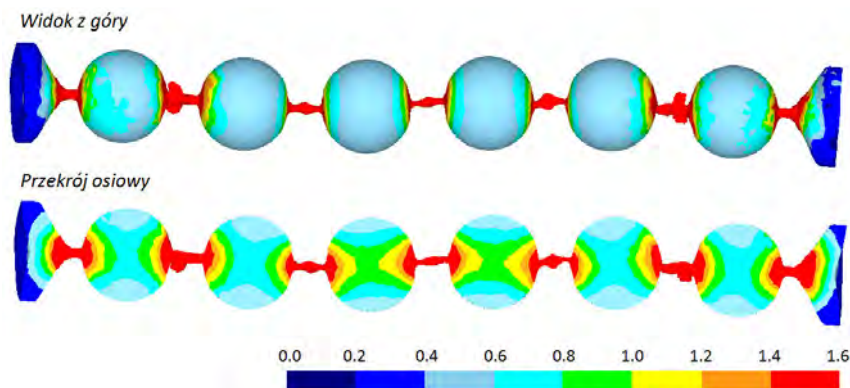
Rys. 5.14. Przebieg procesu jednoczesnego walcowania sześciu kul o średnicy 35 mm

Na rys. 5.15 przedstawiono rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobach kul, który jest zbliżony do odnotowanego w procesie walcowania 8 kul. Największe odkształcenia lokalizowane są w strefie łączników, gdzie wystąpiła największa redukcja przekroju materiału wsadowego.



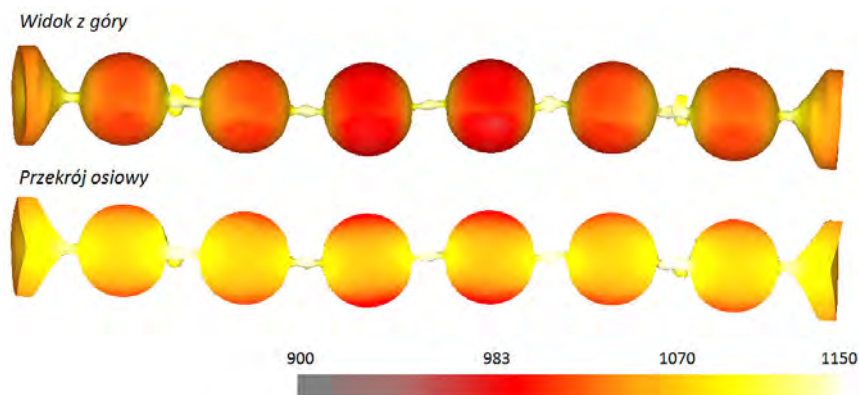
Rys. 5.15. Rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobach kul $S\varnothing 35$ mm, walcowanych w układzie 6 sztuk

Również podobne do uzyskanych w poprzednim przypadku są rozkłady kryterium zniszczenia (rys. 5.16) i temperatury (rys. 5.17) w półwyrobach kul, walcowanych w układzie 6 sztuk. W analizowanym przypadku nie powinno być problemu zarówno z odcięciem łączników jak i przeprowadzeniem hartowania po procesie walcowania.

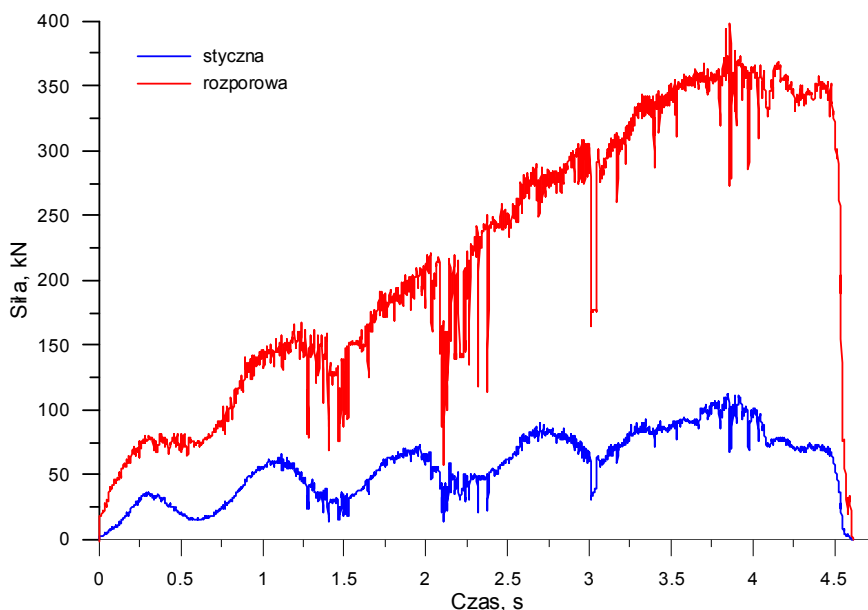


Rys. 5.16. Rozkład funkcji zniszczenia wg kryterium Cockrofta-Lathama w półwyrobach kul $S\varnothing 35$ mm, walcowanych w układzie 6 sztuk

Zmniejszenie ilości kształtowanych kul (o 25%) nie wpłynęło istotnie na spadek sił kształtowania. Z rys. 5.18 wynika, że siła rozporowa ma niemal identyczny rozkład jak w procesie walcowania 8 kul, zaś siła styczna jest nieznacznie (o ok. 7%) mniejsza w fazie rozcinania.



Rys. 5.17. Rozkład temperatury (w °C) w półwyrobach kul $S\varnothing 35$ mm, walcowanych w układzie 6 sztuk

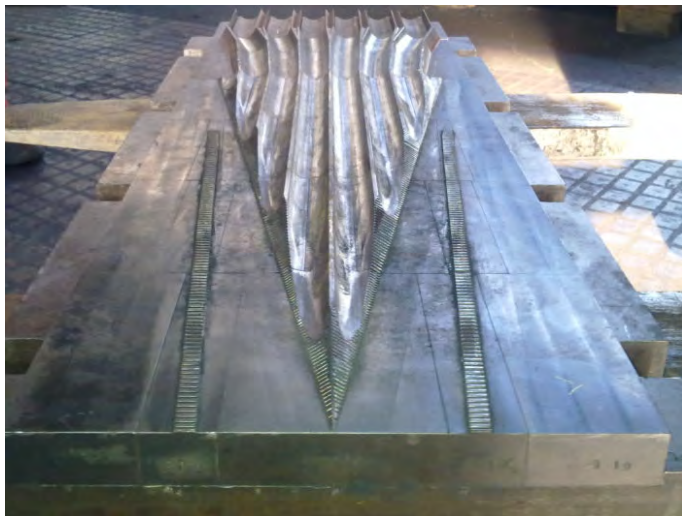


Rys. 5.18. Rozkłady sił kształtowania w procesie WPK sześciu kul $S\varnothing 35$ mm

Celem wykonania prób walcowania 6 kul, realizowanych w warunkach GFN, wykonano narzędzia klinowe przerabiając zestawy narzędziowe stosowane do kształtowania 8 kul. Wprowadzone zmiany polegały na wydłużeniu strefy rozcinania, w której przewidziano zastosowanie specjalnych dwustronnych noży klinowych mających na celu oddzielenie łączników od kul. Jeden ze zmodernizowanych segmentów narzędziowych pokazano na kolejnym rys. 5.19.

Zmniejszenie ilości kul, walcowanych w jednym przejściu klina, do sześciu pociągnęło za sobą skrócenie materiału wsadowego, który w tym przypadku cięto na długość 148 mm. Następnie wsady nagrzewano indukcyjnie do temperatury ok. 1100°C i umiesz-

czano w przestrzeni roboczej walcarki. Po odwalcowaniu półwyroby kul hartowano w wodzie.



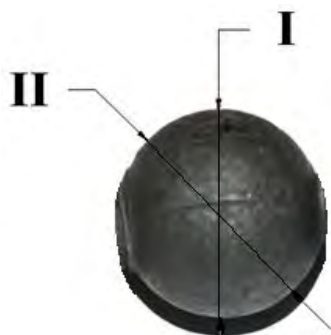
Rys. 5.19. Narzędzie klinowe do walcowania sześciu kul $\varnothing 35$ mm, wyposażone w dwustroczne noże klinowe służące do rozcinania kul

Kule, które zostały odwalcowane przy pomocy zmodernizowanych narzędzi przedstawiono na rys. 5.20. Widoczna jest znaczna poprawa kształtu kul i co jest bardzo ważne brak ostrych wypustów, które były główną wadą półwyrobów otrzymywanych w poprzednio badanym procesie. Zaobserwowano przy tym, że dwie skrajne kule posiadały gorszy kształt od czterech kul środkowych. Było to spowodowane intensywnym przemieszczaniem tych kul w kierunku osiowym (na stosunkowo krótkim odcinku walcowania) celem kompensacji wydłużenia półwyrobu w strefie rozcinania (na możliwość wystąpienia takiego defektu wskazywały wyniki obliczeń numerycznych), w trakcie którego występowało "przyszcypywanie" materiału przez obrzeża klinów. Należy przy tym stwierdzić, że defekty kształtu kul skrajnych nie mogą stanowić podstawy ich dyskwalifikacji w przypadku produkcji kul na mielniki.



Rys. 5.20. Półwyroby kul $\varnothing 35$ mm, otrzymane w procesie WPK w układzie 6 sztuk

Zadowalające wyniki prób walcowania były podstawą do wykonania badań dotyczących określenia dokładności ich wykonania. Należy przy tym nadmienić, że dokładność wykonania kul nie jest szczególnie istotna, gdyż będą one pracować w młynie kulowym, jako mielniki. Kule takie posiadają szeroką (± 3 mm) tolerancję wykonania.



Rys. 5.21. Schematyczne przedstawienie płaszczyzn pomiarów średnicy półwyrobu kuli

Pomiary wykonano przy użyciu suwmiarki o dokładności do 0,05 mm. Na rys. 5.21 przedstawiono płaszczyzny przeprowadzonych pomiarów: I – pomiar średnicy tocznej kuli, II – pomiar średnicy bocznej.

Rezultaty pomiarów wymiarów średnicowych kul zestawiono w tabelach 5.1 i 5.2. Wynika z nich, że średnie odchyłki od wymiaru nominalnego na średnicy tocznej zawierają się w przedziale od -0,69 mm do +0,26 mm, podczas gdy średnie odchyłki od wymiaru nominalnego na średnicy bocznej mieszczą się w przedziale od -0,97 mm do -0,26 mm.

Tab. 5.1. Wyniki pomiarów średnicy tocznej, w mm

Pomiar I	Kula 1	Kula 2	Kula 3	Kula 4	Kula 5	Kula 6
1	34,65	34,30	34,85	34,90	34,95	35,25
2	34,55	34,40	34,90	35,00	35,00	35,40
3	34,65	34,20	34,90	34,95	34,90	35,30
4	34,50	34,35	34,85	34,95	34,90	35,10
średnia	34,59	34,31	34,88	34,95	34,94	35,26

Tab. 5.2. Wyniki pomiarów średnicy bocznej, w mm

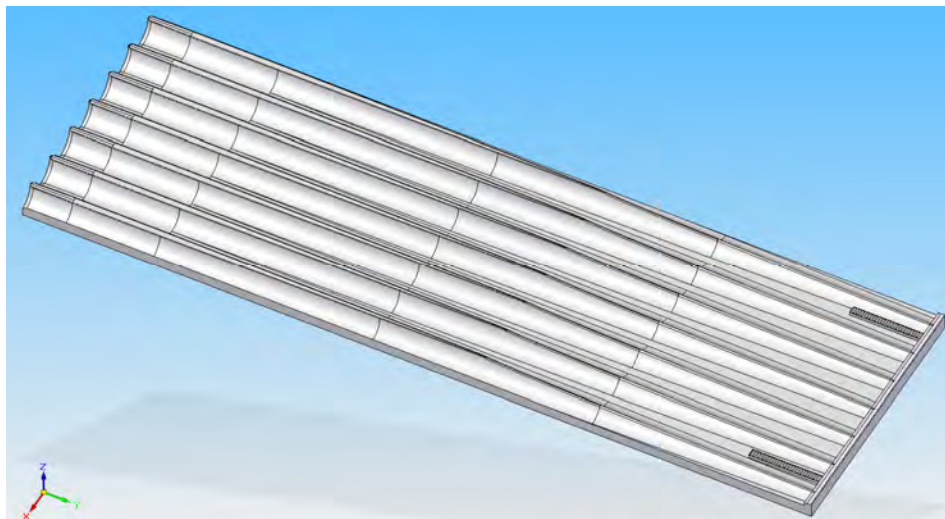
Pomiar II	Kula 1	Kula 2	Kula 3	Kula 4	Kula 5	Kula 6
1	34,6	33,9	34,4	34,7	34,8	34,9
2	33,9	33,95	34,2	34,6	34,5	34,7
3	34,05	34,15	34,4	34,45	34,6	34,7
4	34,2	34,1	34,5	34,65	34,2	34,65
średnia	34,19	34,03	34,38	34,60	34,53	34,74

Wymiary średnicowe kul są mniejsze od wymiaru nominalnego wynoszącego 35 mm. Jest to zabieg celowy. W trakcie zużywania się narzędzi wymiary wykoju będą ulegać zmianie, a średnica kul będzie się zwiększać. Tym samym okres eksploatacji zaprojektowanych narzędzi ulegnie wydłużeniu.

5.3. Walcowanie poprzeczne sześciu kul

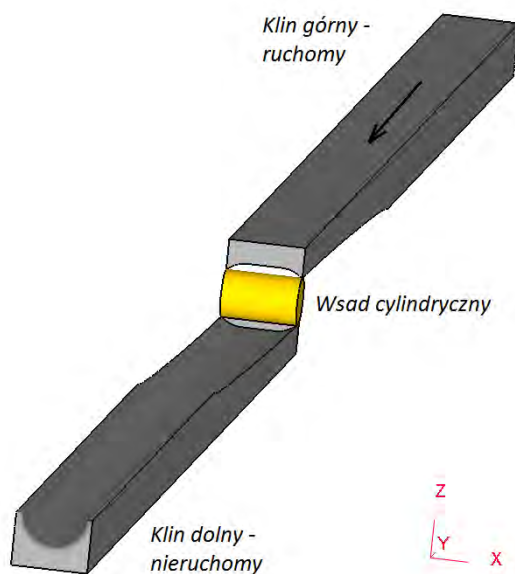
Badania laboratoryjne wskazały na potencjalne korzyści w przypadku kształtowania kul narzędziami płaskimi, mającymi równoległe występy, rozmieszczone od siebie w odległości większej od średnicy kul. W trakcie walcowania występy te wcinają się we wsad rozcinając go na części (o objętości równej objętości kuli), z których następnie kształtowane są poszczególne kule.

Na rys. 5.22 przedstawiono jedno z zaprojektowanych narzędzi płaskich, którego zastosowanie umożliwia kształtowanie 6 kul jednocześnie. Wsadem do walcowania jest pręt o średnicy $\varnothing 27$ mm, a parametry procesu są identyczne z przyjmowanymi w dwóch omawianych uprzednio przypadkach.



Rys. 5.22. Model geometryczny jednego z narzędzi płaskich (dolnego), wykonany w programie SolidEdge, wykorzystywanych w procesie WPK sześciu kul o średnicy 35 mm

Ze względu na modułowość opracowanego sposobu walcowania w analizie numerycznej ograniczono się do kształtowania pojedynczego półwyrobu kuli (rys. 5.23).



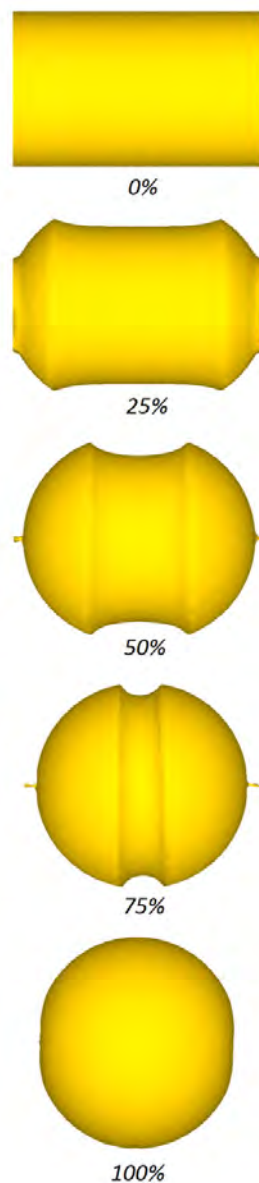
Rys. 5.23. Model geometryczny procesu walcowania półwyrobu kuli – wykonany w programie DEFORM-3D

Na rys. 5.23 pokazano narzędzia służące do walcowania pojedynczej kuli. Można wyróżnić w nich dwie części podstawowe: rozcinającą, w której występy zwiększają swoją wysokość (doprowadzając do rozdzielenia wsadu) oraz kształtującą, w której cylindryczny odcinek pręta podlega obrotowemu ścisnaniu, doprowadzającemu do ukształtowania kuli. Modelując walcowanie w strefie rozcinania na powierzchni wsadu nałożono ograniczenia odbierając możliwość przemieszczania się materiału w kierunku osiowym. Ograniczenia te usunięto, gdy występy wgłębiły się w materiał na głębokość maksymalną, przyjmując, iż w tym momencie procesu dochodzi do rozdzielenia wsadu na części.

Przeprowadzenie obliczeń wymagało podzielenia wsadu na elementy (w tym przypadku czworościenne - tetraedralne), połączone ze sobą w węzłach. Założono, iż walcowanie realizowane jest w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Szczegółowe zestawienie danych przyjętych w analizie obejmuje: materiał wsadu – stal C45 (model materiałowy zaczerpnięto z biblioteki zastosowanego oprogramowania), temperaturę wsadu 1150°C, temperaturę narzędzi 50°C, współczynnik wymiany ciepła materiał-narzędzie 10 kW/m²K, współczynnik wymiany ciepła materiał-otoczenie 0,2 kW/m²K, współczynnik tarcia na powierzchni kontaktu metal-narzędzie 0,5.

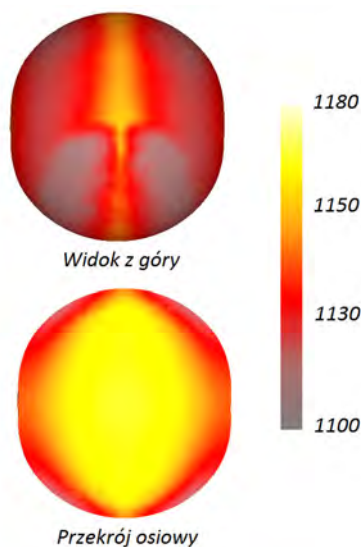
Na rys. 5.24 pokazano jak zmienia się kształt półwyrobu kuli w procesie walcowania poprzecznego na gorąco. Można stwierdzić, iż występy narzędzi płynnie wciskają się we wsad wywołując jego ruch obrotowy i kształtując przewęzenie. Materiał wyciśnięty przez występy narzędzi powoduje miejscowy wzrost średnicy wsadu. Po rozdzieleniu materiału na części (zaawansowanie procesu 50%) schodzące się do siebie wklęsłe powierzchnie robocze występów spęczają materiał, który ostatecznie przyjmuje kształt kuli o spłaszczonych powierzchniach bocznych (w miejscach, gdzie doszło do rozdzielenia materiału). W efekcie takiego płynięcia materiału uzyskano półwyrób kuli o zarysie owalnym, którego największa średnica (w płaszczyźnie centralnej) wyniosła 36,1 mm, a najmniejsza (w osi obrotu) była równa tylko 33,1 mm. Otrzymany z symulacji numerycznej półwyrób kuli jest wolny od występowania w miejscach rozdzielenia i jest w pełni akceptowalny w przypadku produkcji mielników do młynów kulowych.

Rozkład temperatury w półwyrobie ukształtowanej kuli pokazano na rys. 5.25. Widoczne jest, iż temperatura materiału w strefie przypowierzchniowej zmalała o ok. 50 °C, natomiast w środku półwyrobu praktycznie nie uległa zmianie. Tak niewielki

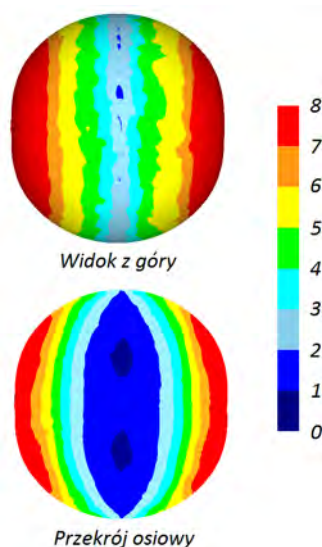


Rys. 5.24. Progresa kształtu półwyrobu kuli w procesie walcowania poprzecznego

spadek temperatury, pomimo kilkusekundowego czasu trwania procesu należy tłumaczyć kompensowaniem ciepła odprowadzonego do chłodniejszych narzędzi, ciepłem powstałym w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia.



Rys. 5.25. Rozkład temperatury (w °C) w półwyrobie kuli otrzymanym w procesie walcowania poprzecznego

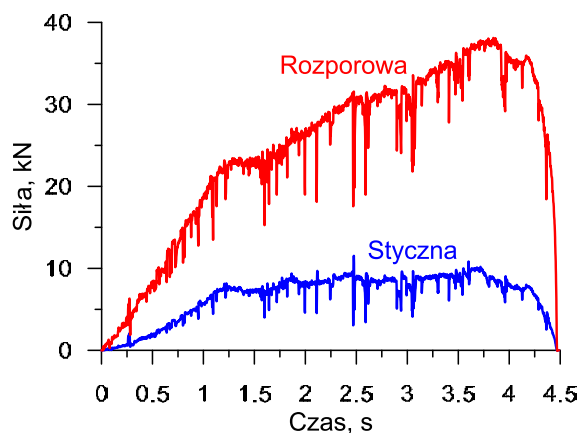


Rys. 5.26. Rozkład intensywności odkształcenia w półwyrobie kuli otrzymanym w procesie walcowania poprzecznego

Interesująco przedstawia się obliczony za pomocą MES rozkład intensywności odkształcenia pokazany na rys. 5.26. Wynika z niego, iż kula nie jest jednakowo przerebiona plastycznie w całej objętości. Największe odkształcenia występują w strefie przylegającej do powierzchni bocznych, gdzie doszło do rozdzielenia objętości wsadu, a najmniejsze w strefie centralnej kuli, gdzie materiał został spęczony (średnica wsadu zwiększyła się o 33,7%). Taki rozkład odkształceń jest niewątpliwie efektem intensywnego płynięcia materiału w kierunku stycznym (wywołanego działaniem sił tarcia na powierzchniach występow), doprowadzającego do powstania dużych odkształceń postaciowych, które nie wpływają na zmianę kształtu półwyrobu. Odnotowane różnice w rozkładzie intensywności odkształcenia nie mają znaczenia w przypadku kul stosowanych na mielniki, od których wymaga się właściwie tylko jak największej odporności na zużycie ściernie, które zależy przede wszystkim od twardości materiału.

Na kolejnym rys. 5.27 pokazano jak zmieniają się siły styczna (przemieszczająca narzędzie w kierunku x) i rozporowa (w kierunku z - rys. 5.23) w trakcie procesu walcowania pojedynczej kuli. Można stwierdzić, że siła styczna w zasadniczej fazie procesu (podczas kształtowania) utrzymuje względnie stałą wartość. Natomiast siła rozporowa sukcesywnie rośnie osiągając największe wartości pod koniec procesu walcowania. Jest to zapewne efektem wzrastającej powierzchni kontaktu materiału z narzędziem, wraz z wypełnianiem przez niego wykroju (brzdy).

Rys. 5.27. Rozkłady siły obliczone dla procesu walcowania poprzecznego półwyrobu pojedynczej kuli



W ramach prób walcowania prowadzonych w GFN kule $S\varnothing 35$ mm kształtowano z wsadu o wymiarach $\varnothing 27 \times 265$ mm. Oznacza to, że odwalcowanie półwyrobu kuli przebiegało przy spęczaniu materiału, w efekcie którego nastąpił wzrost średnicy wsadu aż o 30%. Na rys. 5.28 pokazano jedno z narzędzi zabezpieczających proces walcowania poprzecznego, które zostało zamontowane w walcarce SP2000. Narzędzia wykonano ze stali narzędziowej do pracy na gorąco, w gatunku WCL.



Rys. 5.28. Widok dolnego (nieruchomego) narzędzia służącego do walcowania poprzecznego 6 kul jednocześnie

Próby kształtowania prowadzono korzystając ze wsadów wykonanych z handlowych prętów ze stali w gatunku C45 oraz wytoczonych z półwyrobów uzyskanych w procesie walcowania wzdłużnego główek szyn ze stali R200. Wsady przed walcowaniem nagrzewano w nagrzewnicy indukcyjnej do temperatury 1150°C , następnie umieszczano je (przy pomocy podajnika) na dolnym nieruchomym segmencie narzędziowym i kształtowano na półwyroby kul w wyniku przemieszczenia posuwistego (z prędkością $0,4$ m/s) narzędzia górnego, powodującego przetoczenie się materiału po nieruchomym segmen-

cie dolnym. Odwalcowane półwyroby kul spadały samoistnie do zbiornika z wodą, z którego po zahartowaniu były wyciągane za pomocą przenośnika łańcuchowego. Przebieg procesu kształtowania kul zilustrowano na rys. 5.29.



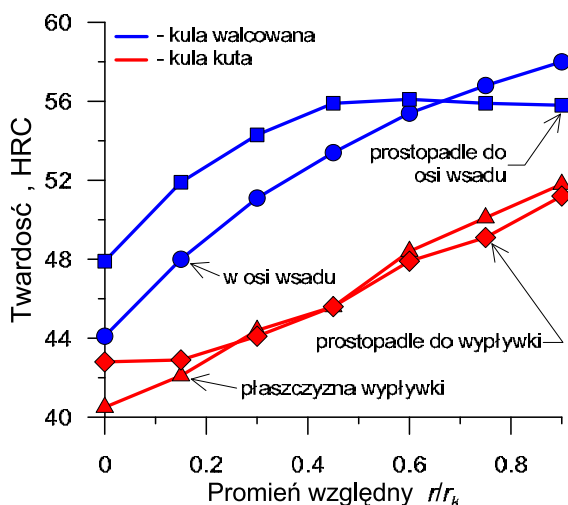
Rys. 5.29. Etapy walcowania poprzecznego 6 kul: wprowadzanie wsadu; kształtowanie; półwyroby kul staczające się do zbiornika z wodą (kolejno od góry)

Na rys. 5.30 przedstawiono przykładowe kule otrzymane w procesie walcowania poprzecznego, realizowanego w warunkach GFN. Mają one owalny kształt, podobny do wyznaczonego w symulacji numerycznej, przy czym maksymalna średnica kul (w płaszczyźnie centralnej) równa jest 35 mm, a minimalna (w osi obrotu) wynosi 31,5 mm. Otrzymane półwyroby kul są wolne od pęknięć wewnętrznych i charakteryzuje je dobra jakość wykonania.

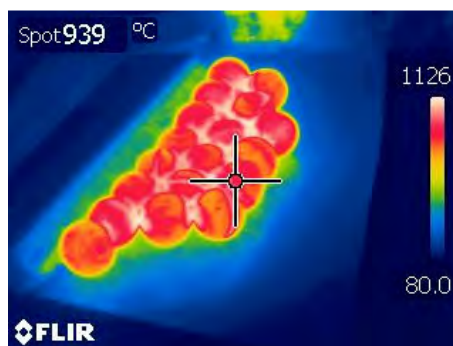
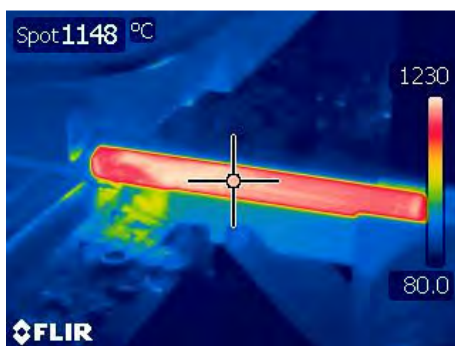


Rys. 5.30. Kule otrzymane w procesie walcowania poprzecznego, wykonanego w warunkach GFN Sp. z o.o. w Radzynie Podlaskim

Badając własności kul (ze stali w gatunku C45) wytworzonych metodą walcowania poprzecznego wyznaczono rozkłady twardości materiału w przekrojach poprzecznych półwyrobów. Zestawienie otrzymanych rozkładów (rys. 5.31) jednoznacznie wykazuje, iż kule walcowane poprzecznie mają zdecydowanie większą twardość (w całej objętości) niż kule kute matrycowo. Tym samym kule te są bardziej odporne na zużycie ścierne, co jest korzystne dla potencjalnych odbiorców tych półwyrobów.



Rys. 5.31. Rozkłady twardości kul wytworzonych GFN sp. z o.o. w Radzynie Podlaskim, gdzie r_0 - promień kuli



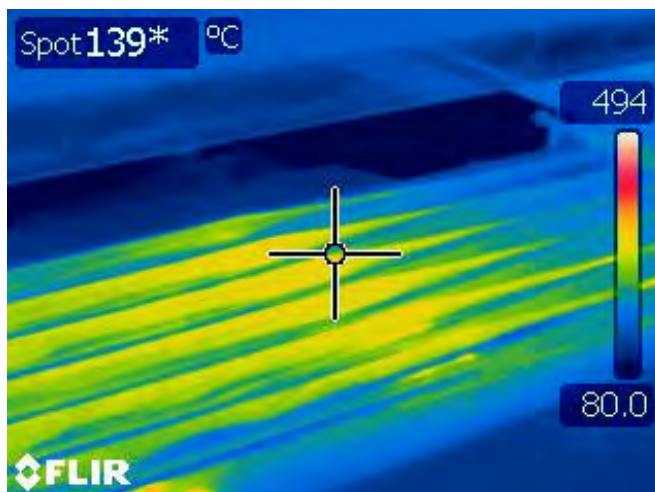
Rys. 5.32. Temperatura wsadu (z lewej) i kul odwalcowanych (po prawej), określona kamerą termowizyjną w trakcie prób walcowania

W czasie prób procesu walcowania poprzecznego dokonano rejestracji temperatury na powierzchni otrzymanych półwyrobów kul - rys. 5.32. Okazało się (zgodnie z oczekiwaniami), że po procesie kształtowania temperatura ta jest wystarczająca do przeprowadzenia kolejnej operacji, tj. hartowania kul w wodzie.

Pozytywne wyniki procesu walcowania poprzecznego kul były przyczyną podjęcia decyzji przez GFN o odwalcowaniu partii próbnej (rys. 5.33) półwyrobów kul, która będzie przetestowana w jednym z Prefabetów współpracujących z tym zakładem. Dodatkowo, w trakcie walcowania (po ustaleniu się parametrów termicznych) zmierzono temperaturę narzędzi (rys. 5.34), która ustaliła się na poziomie około 150°C.



Rys. 5.33. Partia próbna półwyrobów kul, odwalcowana w warunkach GFN w Radzynie Podlaskim



Rys. 5.34. Rozkład temperatury na powierzchni narzędzi po odwalcowaniu partii próbnej półwyrobów kul

6. Innowacyjne procesy walcowania poprzeczno-klinowego kul

Zalety, którymi charakteryzują się procesy walcowania poprzeczno-klinowego, przyczynią się do wzrastającego zainteresowania tą metodą kształtowania w przemyśle. Obserwuje się również wzmożone prace badawcze nad procesami WPK, których głównym celem jest rozwijanie tradycyjnych założeń tej technologii oraz poszukiwanie nowych rozwiązań zabezpieczających wzrastające wymagania przemysłu.

W ramach realizowanych 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 poprzecznego, poprzeczno-klinowego, skośnego, oraz śrubowo-klinowego (opisane szczegółowo w rozdziałach 1 i 2).

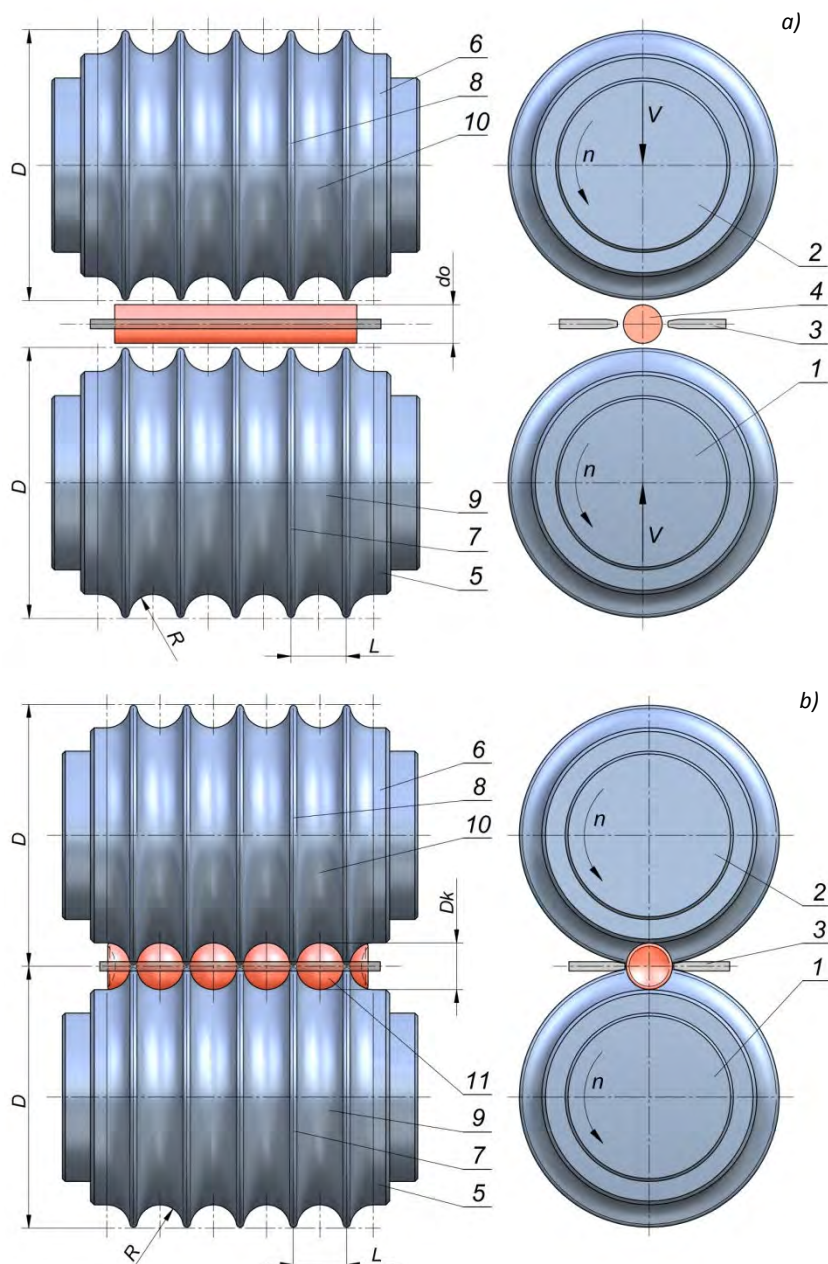
6.1. Walcowanie poprzeczne dwoma walcami wyrobów typu kula metodą wgłębną

Pośród wielu metod kształtowania plastycznego odkuwek kul szczególnie korzystnie plasują się technologie, w których narzędzia wykonują ruch obrotowy. Taki schemat procesu pozwala na zmniejszenie pracochłonności dzięki wyeliminowaniu ruchu powrotnego narzędzi (ruchu jałowego). Kule kształtowane są w sposób ciągły bez konieczności zatrzymywania narzędzi lub zmiany kierunku ich ruchu. Również wielkość naddatków technologicznych oraz odpadów jest znacznie mniejsza w porównaniu do innych metod kształtowania. Nie bez znaczenia jest także możliwość jednoczesnego kształtowania kilku wyrobów, co pozwala na wielokrotne zwiększenie wydajności procesu.

6.1.1. Istota procesu walcowania poprzecznego kul dwoma walcami metodą wgłębną

Jednym z nowatorskich sposobów kształtowania odkuwek kul jest proces walcowania poprzecznego półfabrykatów dwoma walcami metodą wgłębną [79]. Cechą charakterystyczną procesu jest to, że narzędzia w kształcie walców wykonują jednocześnie ruch obrotowy i postępowy w kierunku osi półfabrykatu. Schemat przebiegu procesu walcowania kul opracowaną metodą przedstawiono na rysunku 6.1. Półfabrykat 4 w kształcie odcinka pręta, którego średnica d_o jest mniejszej od średnicy D_k kształtowanej kuli 11 umieszczany jest w przestrzeni roboczej, utworzonej przez dwie nieruchome prowadnice 3 oraz dwa walce 1 i 2. Na powierzchniach cylindrycznych walców 5 i 6 wykonane są pierścieniowe kołnierze 7 i 8 rozdzielające bruzdy 9 i 10 o wklęsłych powierzchniach bocznych i promieniu R równym połowie średnicy kształtowanych kul. Kołnierze kształtujące rozmieszczone są na walcach równolegle do

siebie w odległości L większej od średnicy walcowanej kuli. Osie narzędzi (walców) są równoległe do osi półfabrykatu 4, dodatkowo w początkowym etapie walcowania narzędzia są rozsunięte od siebie na odległość większą od średnicy półfabrykatu d_0 .



Rys. 6.1. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul metodą wgłębną: a) początek procesu; b) koniec procesu, (opis w tekście)

Po umieszczeniu półfabrykatu w przestrzeni roboczej walce 1 i 2 wprawiane są w ruch obrotowy w tym samym kierunku oraz z taką samą prędkością n i jednocześnie w przeciwnieży ruch posuwisty w kierunku osi półfabrykatu z prędkością v . W wyniku ruchu obrotowego i postępowego narzędzi następuje zagłębianie się pierścieniowych kołnierzy w półfabrykat i wprawienie go w ruch obrotowy w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów narzędzi. W tym czasie na powierzchni wsadu kształtowane są pierścieniowe rowki, rozdzielające półfabrykat na stałe objętości materiału równe objętości walcowanych kul. W dalszym etapie procesu w wyniku zbliżania się narzędzi w kierunku osi wsadu następuje stopniowe zwiększanie redukcji średnicy pierścieniowych rowków, aż do całkowitego rozdzielenia materiału. W kolejnej fazie procesu wskutek oddziaływania wklęsłych powierzchni bocznych kołnierzy 7 i 8 dochodzi do spęczniania materiału, który stopniowo wypełnia wykrój utworzony przez wklęsłe powierzchnie boczne kołnierzy dwóch walców. W rezultacie otrzymuje się wyroby w kształcie kul o średnicy D_k , większej od średnicy do zastosowanego półfabrykatu. Proces można również zrealizować w układzie, w którym tylko jedno z narzędzi wykonuje jednocześnie ruch obrotowy i postępowy w kierunku osi półfabrykatu, natomiast drugi walec wykonuje jedynie ruch obrotowy. Takie rozwiązanie pozwala na uproszczenie konstrukcji walcarki, na której realizowany jest proces.

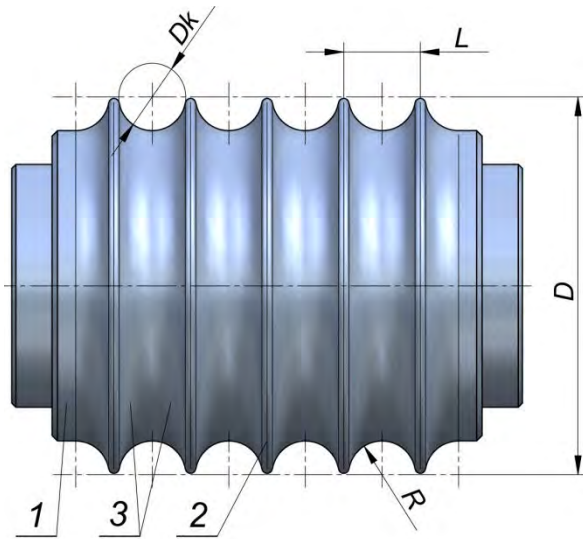
Do zalet opracowanej metody walcowania można zaliczyć między innymi możliwość jednoczesnego kształtowania wielu kul, których liczba jest uwarunkowana wyłącznie długością narzędzi oraz mocą walcarki. W efekcie wydajność wytwarzania kul jest znacznie większa od uzyskiwanej w procesach kucia matrycowego i odlewania. Dodatkowo możliwe jest kształtowanie kul, których średnica jest większa od średnicy półfabrykatu - wsadu.

6.1.2. Konstrukcja narzędzi do walcowania poprzecznego odkuwek kul

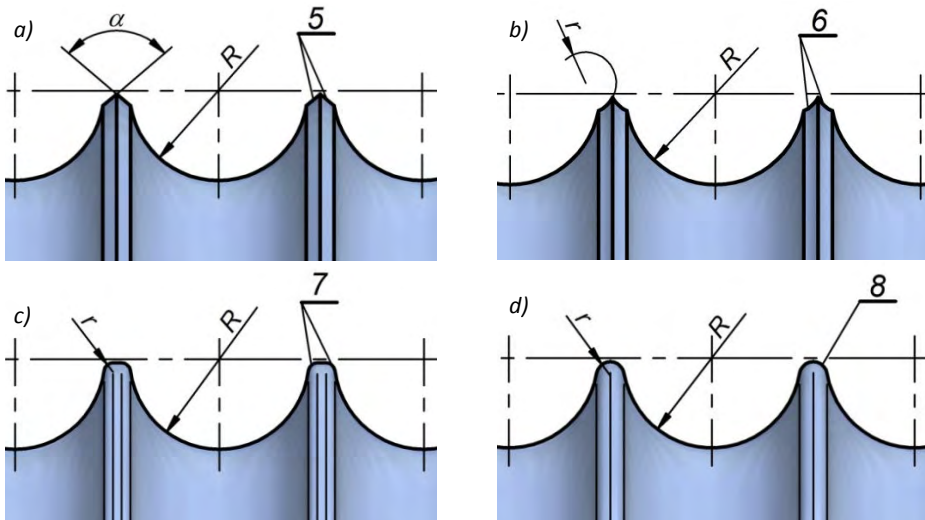
Jedną z zalet walcowania poprzecznego kul jest prosta konstrukcja narzędzi, które wykorzystuje się do realizacji procesu. Narzędzia mają kształt walców 1 (rys. 6.2), na powierzchniach których wykonane są pierścieniowe kołnierze 2, rozmieszczone równoległe do siebie w odległości L większej od średnicy walcowanych kul D_k [75]. Kołnierze robocze narzędzi mają wklęsły kształt powierzchni bocznych, które tworzą bruzdy 3 o zarysie walcowanych kul i promieniu R równym połowie średnicy kształtowanych odkuwek. Dla ułatwienia zagłębiania się narzędzi w półfabrykat wierzchołki kołnierzy roboczych mogą być utworzone przez dwie powierzchnie stożkowe 5, tworzące ostrą krawędź i przecinające się pod kątem α (rys. 6.3a). Kołnierze mogą być również zakończone ostrymi krawędziami utworzonymi przez dwie powierzchnie wklęsłe 6 (rys. 6.3b). Przy czym ze względu na trwałość narzędzi, ostre zakończenie kołnierzy roboczych można zastosować w przypadku walcowania kul ze stopów metali o stosunkowo niewielkiej wytrzymałości. Natomiast w przypadku kształtowania kul stalowych (gdzie oprócz większych oporów kształtowania plastycznego pojawia się oddziaływanie znacznie wyższych temperatur) zaleca się stosować zakończenia kołnierzy powierzchniami wypukłymi 7 (rys. 6.3c) lub jedną powierzchnią wypukłą 8 o promieniu r , styzną do powierzchni bocznych (rys. 6.3d). Dodatkowo należy przyjmować większe odległości L między kołnierzami kształtującymi. W celu zabezpieczenia stabilnego

procesu walcowania zaleca się, aby średnica robocza walców D była co najmniej 5 – 6 razy większa od wymiaru walcowanych kul D_k .

Do zalet opracowanej konstrukcji narzędzi, oprócz prostej ich konstrukcji można zaliczyć między innymi łatwy sposób wykonania w procesie toczenia, wykorzystując konwencjonalne obrabiarki. Również regeneracja zużytych narzędzi jest stosunkowo prosta i tania. W rezultacie nakłady związane z przemysłowym wdrożeniem procesu walcowania są znacznie niższe w stosunku do innych metod kształtowania, co czyni technologię rentowną już przy niewielkich partiach produkcyjnych.



Rys. 6.2. Kształt walca wykorzystywanego w procesie walcowania poprzecznego kul, (opis w tekście)

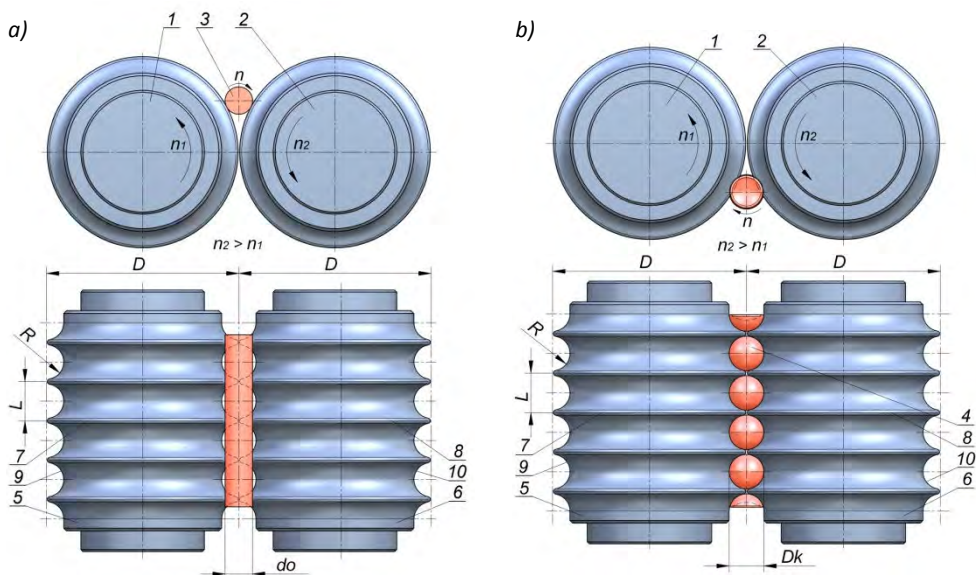


Rys. 6.3. Kształt zakończenia wierzchołków kołnierzy roboczych w narzędziach stosowanych do walcowania kul: a) powierzchniami stożkowymi, b) powierzchniami wklęsłymi, c) powierzchniami wypukłymi, d) jednym promieniem stycznym (opis w tekście)

6.2. Walcowanie poprzeczne odkuwek kul dwoma walcami metodą styczną

W trakcie realizacji procesu walcowania poprzecznego odkuwek kul metodą wgłębną konieczne jest stosowanie prowadnic, które utrzymują wsad w przestrzeni roboczej agregatu. Elementy prowadzące podczas walcowania narażone są na znaczne obciążenia, co powoduje szybkie zużywanie ich powierzchni roboczych. Dlatego też w celu wyeliminowania elementów prowadzących, opracowano metodę walcowania poprzecznego półfabrykatów kul metodą styczną, w której wsad jest prowadzony przez powierzchnie robocze narzędzi (walców) [80].

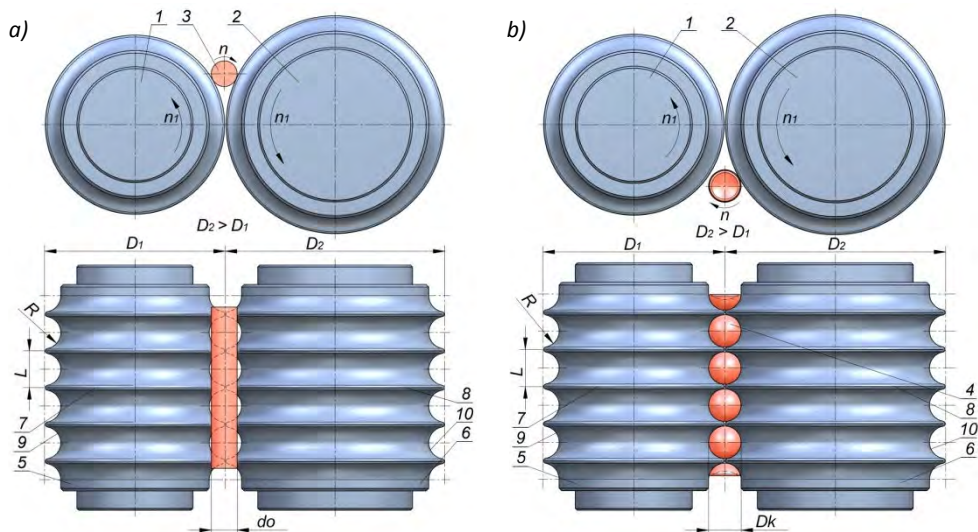
Proces walcowania kul metodą styczną realizowany jest przy pomocy dwóch jednakowych narzędzi w kształcie walców, w którym wsadem są odcinki cylindrycznych prętów. Schemat kształtowania odkuwek kul metodą styczną pokazano na rys. 6.4. Półfabrykat 3 w kształcie odcinka pręta o średnicy d_o mniejszej od średnicy D_k kształtowanej kuli 4 umieszczany jest we wgłębieniu utworzonym przez dwa walce 1 i 2. Narzędzia (walce) posiadają jednakowe średnice robocze D , a ich osie są równoległe do osi wsadu oraz leżą w płaszczyźnie poziomej. Konstrukcja walców wykorzystywanych w procesie jest identyczna jak w przypadku walcowania kul metodą wgłębnią, którą szczegółowo opisano w podrozdziale 6.1. Na powierzchniach cylindrycznych 5 i 6 dwóch walców 1 i 2 umieszczone są równoległe do siebie pierścieniowe kołnierze 7 i 8, rozdzielające bruzdy 9 i 10 o wklęsłych powierzchniach bocznych. Odległość między sąsiednimi kołnierzami L jest większa od średnicy walcowanej kuli, zaś promień bruzdy odpowiada połowie średnicy kształtowanego wyrobu. Osie walców są rozsunięte od siebie na taką odległość, że kołnierze 7 i 8 wraz z bruzdami 9 i 10 tworzą wykroje o zarysie walcowanych kul 4.



Rys. 6.4. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul metodą styczną: a) początek procesu, b) koniec procesu (opis w tekście)

Następnie walce 1 i 2 wprawia się w ruch obrotowy w tym samym kierunku, przy czym prędkość obrotowa n_2 walca 2 jest większa od prędkości obrotowej n_1 walca 1. W wyniku oddziaływania obracających się kołnierzy 7 i 8 półfabrykat 3 zostaje wprawiony w ruch obrotowy. W pierwszej fazie procesu kołnierze robocze narzędzi o wklęsłych powierzchniach bocznych kształtują na obwodzie półfabrykatu pierścieniowe rowki, rozdzielające wsad na stałe objętości materiału, równe objętości walcowanej kuli. W kolejnej fazie procesu materiał zostaje samoistnie wciągnięty między narzędzia, gdzie dochodzi do dalszej redukcji średnicy pierścieniowych rowków, aż do całkowitego rozdzielenia materiału. Przy czym proces samoistnego przemieszczania się materiału między powierzchniami roboczymi narzędzi jest efektem różnicy prędkości obwodowych kołnierzy, umieszczonych na walcu 1 oraz walcu 2 ($v_2 > v_1$). W dalszym etapie walcowania materiał podlega spęczaniu między wklęsłymi kołnierzami narzędzi, co prowadzi do stopniowego wypełniania wykroju przez metal. W rezultacie otrzymuje się odkuwki w kształcie kul o średnicy D_k większej od średnicy d_0 zastosowanego wsadu.

Walcowanie odkuwek kul dwoma jednakowymi narzędziami metodą styczną wymaga stosowania walcarek o niezależnych napędach walców, co znacznie komplikuje konstrukcję agregatu. Dlatego też opracowano proces kształtowania kul, bazujący na omawianej poprzednio metodzie walcowania, w którym narzędzia obracają się w tym samym kierunku z jednakowymi prędkościami n_1 (rys. 6.5). W proponowanym rozwiązaniu dla uzyskania różnicy prędkości obwodowych kołnierzy kształtujących, która powoduje przemieszczanie materiału między narzędziami, przyjęto większą średnicę roboczą jednego z walców. W efekcie przy tej samej prędkości obrotowej narzędzi proces walcowania przebiega w identyczny sposób, jak w przypadku różnych prędkości obrotowych walców.

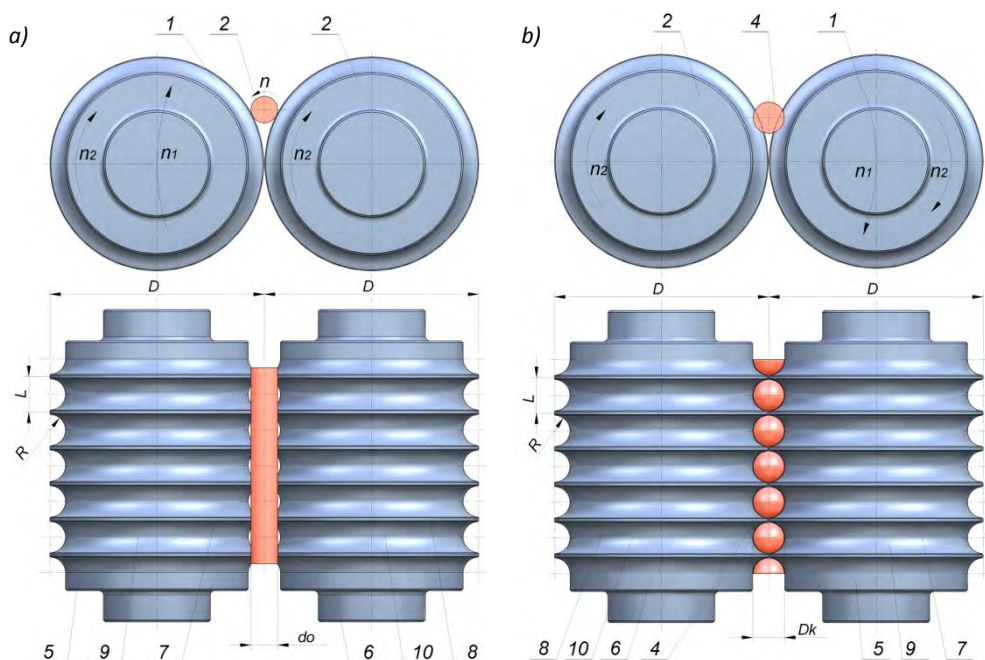


Rys. 6.5. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul metodą styczną dwoma walcami o różnych średnicach: a) początek procesu, b) koniec procesu (opis w tekście)

Do głównych zalet walcowania kul metodą styczną można zaliczyć między innymi możliwość kształtowania kilku wyrobów jednocześnie, co wpływa na znaczne zwiększenie wydajności procesu w stosunku do kucia lub odlewania. Również kinematyka ruchu narzędzi jest stosunkowo prosta (walce wykonują jedynie ruch obrotowy), w efekcie proces można zrealizować na prostych konstrukcyjnie walcarkach. Nie bez znaczenia jest samoczynne prowadzenie wsadu w trakcie procesu, dzięki czemu eliminuje się konieczność stosowania szybko zużywających się prowadnic.

6.3. Walcowanie poprzeczne odkuwek kul dwoma walcami metodą planetarną

Kolejną metodą kształtowania plastycznego kul, którą opracowano w ramach realizowanych prac badawczych jest proces planetarnego walcowania poprzecznego dwoma walcami (rys. 6.6) [108]. W trakcie walcowania wykorzystuje się dwa identyczne walce 1 i 2, o konstrukcji zbliżonej do narzędzi stosowanych podczas walcowania poprzecznego kul metodą wgłębną oraz styczną (szczegółowo opisane w podrozdziałach 6.1 oraz 6.2). Na powierzchniach cylindrycznych 5 i 6 walców wykonane są pierścieniowe kołnierze 7 i 8 o wklęsłych powierzchniach bocznych 9 i 10, które tworzą wykroje o kształcie odpowiadającym zarysowi walcowanych kul. Osie narzędzi są równoległe do siebie, a odległość między nimi w czasie procesu nie zmienia się.



Rys. 6.6. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul metodą planetarną: a) początek procesu, b) koniec procesu

W trakcie walcowania półfabrykat 3 w postaci odcinka pręta o średnicy d_o mniejszej od średnicy walcowanej kuli D_k i długości zbliżonej do długości części roboczej narzędzi umieszczany jest we wgłębieniu utworzonym przez dwa walce 1 oraz 2 (rys. 6.6a). Następnie walce 1 i 2 wprawiane są w ruch obrotowy w tym samym kierunku dookoła własnych osi ze stałą prędkością n_2 . Jednocześnie uruchamia się ruch obiegowy walca 1 dookoła osi walca 2 ze stałą prędkością n_1 . W wyniku oddziaływania przemieszczających się narzędzi, półfabrykat 3 zostaje wprawiany w ruch obrotowy. Natomiast dodatkowy ruch planetarny jednego z narzędzi powoduje samoczynne wciąganie materiału między kołnierze narzędzi, które stopniowo redukują jego średnicę, rozdzielając półfabrykat na stałe objętości materiału równe objętości walcowanych kul. Następnie w wyniku oddziaływania wklęsłych powierzchni bocznych 9 i 10 kołnierzy kształtujących rozdzielone części materiału ulegają spęczaniu, w efekcie czego otrzymuje się kule 4 o średnicy D_k większej od średnicy półfabrykatu d_o .

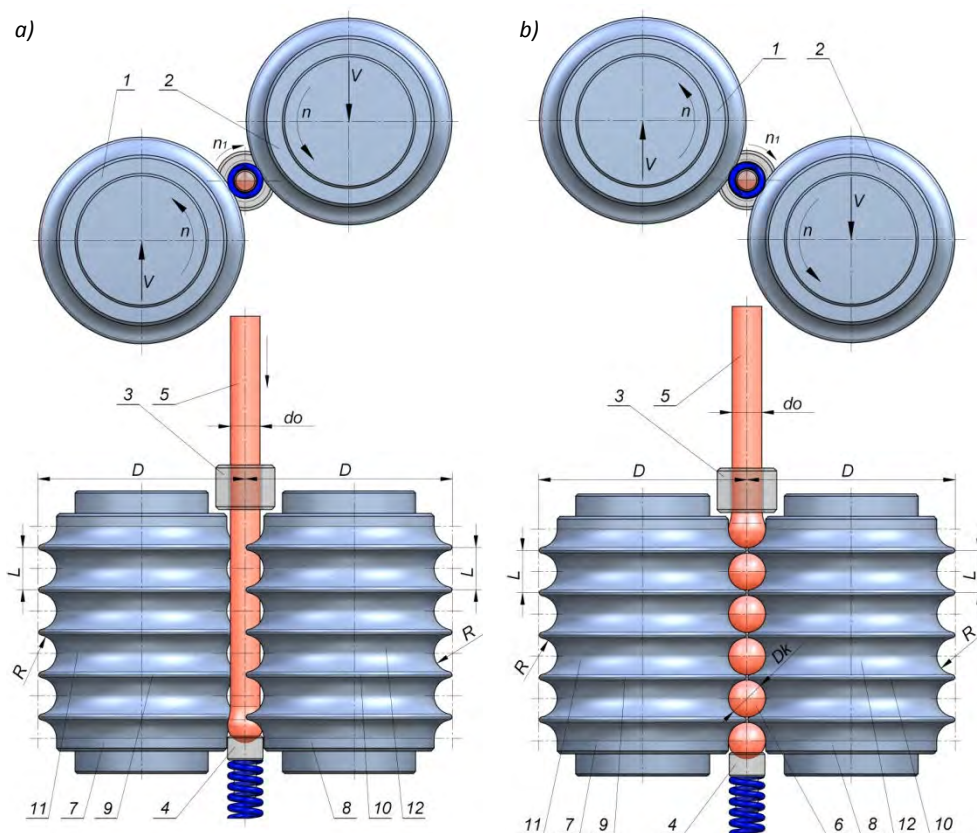
6.4. Walcowanie poprzeczne odkuwek kul dwoma walcami w sposób ciągły

Przedstawione w poprzednich podrozdziałach procesy walcowania poprzecznego odkuwek kul z wykorzystaniem dwóch narzędzi w kształcie walców charakteryzują się szeregiem zalet. Jednak we wszystkich przypadkach niezbędne jest wstępne przygotowanie półfabrykatu (cięcie na określone odcinki o długości zbliżonej do długości beczki walców). Powoduje to konieczność stosowania dodatkowej operacji, angażując dodatkową maszynę i oprzyrządowanie. Również cechą charakterystyczną tak prowadzonych procesów walcowania kul jest występowanie skrajnych odpadów, które zmniejszają uzysk materiałowy. Dlatego też w celu ograniczenia ilości powstających odpadów w trakcie walcowania oraz wyeliminowania operacji cięcia wsadu, opracowano metodę walcowania poprzecznego kul dwoma walcami w sposób ciągły [81].

Idea procesu walcowania ciągłego kul oparta jest na metodzie walcowania stycznego (opisanej w podrozdziale 4.2), przy czym narzędzia (walce) o jednakowych średnicach obracają się w tym samym kierunku i jednocześnie przemieszczają się styecznie do siebie przeciwniebieżnym ruchem postępowym (rys. 6.7). Na powierzchniach cylindrycznych walców 7 i 8 umieszczone są równoległe do siebie, w odległości L większej od średnicy kształtowanej kuli D_k pierścienie kształtujące 9 i 10, których wklęsłe powierzchnie boczne 11 oraz 12 tworzą wykroje o zarysie walcowanych kul. Osie walców usytuowane są równoległe do osi półfabrykatu 5 i jednocześnie rozsunięte równoległe w stosunku do płaszczyzny walcowania w taki sposób, aby możliwe było umieszczenie w przestrzeni roboczej półfabrykatu. Materiałem wsadowym do walcowania kul są pręty o średnicy d_o mniejszej od wymiaru kształtowanych kul D_k i długości znacznie większej od długości części roboczej beczki walców.

W początkowym etapie procesu półfabrykat 5 podawany jest osiowo do przestrzeni roboczej w tulei prowadzącej 4. Wzdłużne położenie półfabrykatu ustalane jest za pomocą sprężystego zderzaka 4, który może swobodnie obracać się dookoła własnej osi. Następnie uruchamia się ruch obrotowy dwóch walców 1 i 2, w tym samym kierunku i z taką samą prędkością n . Jednocześnie oba walce wprawia się w przeciwnieżny ruch postępowy ze stałą prędkością v , w kierunkach równoległych do siebie. Przemieszcza-

jące się kołnierze robocze 9 i 10 wywołują ruch obrotowy półfabrykatu 5 i kształtują na jego obwodzie pierścieniowe rowki, rozdzielające wsad na stałe objętości materiału równe objętości walcowanych kul 6. Dalszy ruch narzędzi powoduje zbliżanie się kołnierzy roboczych 9 i 10 w kierunku osi półfabrykatu, w wyniku czego sukcesywnie zwiększa się redukcja średnicy ukształtowanych przewężeń, aż do całkowitego rozdzielenia materiału. Jednocześnie w wyniku oddziaływania wklęsłych powierzchni kołnierzy 11 i 12, następuje spęszczanie materiału, który stopniowo wypełnia zarys kuli. Ukształtowane kule 6 po procesie walcowania opadają pod własnym ciężarem do zbiornika umieszczonego pod narzędziami, gdzie poddawane są obróbce cieplnej (hartowaniu). W tym samym czasie następuje ponowne przemieszczenie osiowe półfabrykatu 5 do zderzaka 4. Zmienia się również kierunek przeciwbieżnego ruchu postępowego v narzędzi, co pozwala na realizację procesu walcowania kul przy ruchu powrotnym walców.



Rys. 6.7. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul dwoma walcami z ciągłym podawaniem wsadu: a) początek procesu, b) koniec procesu (opis w tekście)

Opracowana metoda walcowania kul umożliwia jednocześnie kształtowanie kilku wyrobów, co znacząco podnosi wydajność procesu. Dodatkowo dzięki możliwości walcowania odkuwek z półfabrykatów o długościach wielokrotnie większych od długości na-

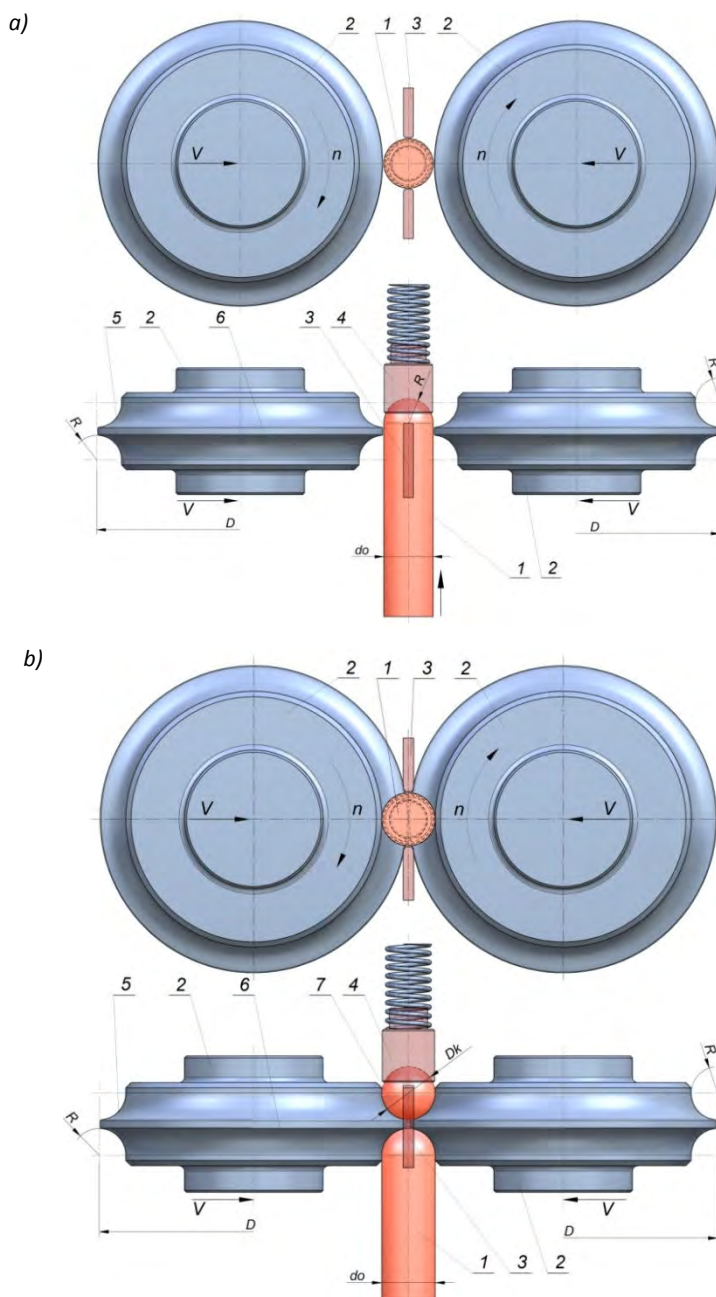
rzędzi znacznie ogranicza się ilość powstających odpadów. Nie bez znaczenia jest również prosta konstrukcja narzędzi, przekładająca się na stosunkowo niewielki koszt ich wykonania oraz późniejszej regeneracji.

6.5. Walcowanie poprzeczne kul w układzie pojedynczym dwoma tarczami metodą wgłębną

Procesy walcowania poprzecznego kul z wykorzystaniem narzędzi w kształcie walców, na powierzchniach których znajdują się wielokołnierzowe wykroje kształtujące, pozwalają na jednoczesne walcowanie od kilku do nawet kilkunastu odkuwek (w zależności od mocy i wytrzymałości walcarki). Ma to szczególnie istotne znaczenie w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej, charakterystycznej dla wyrobów w kształcie kul i pozwala znacząco obniżyć koszty wytwarzania. Należy jednak tutaj zaznaczyć, że ze względu na dostępne moce walcarek oraz wytrzymałość ich konstrukcji, jednoczesne walcowanie półfabrykatów w wielu wykrojach może być stosowane do kształtowania kul w zakresie małych i średnich wymiarów ($D_k < 50$ mm). Często jednak pojawia się konieczność kształtowania kul o stosunkowo dużych wymiarach ($D_k > 50$ mm). Dotychczas tego typu kule wytwarzano metodami odlewania do form trwałych wykonanych z metalu, tak zwanych kokili lub kucia matrycowego na prasach ciernych. Takie procesy są jednak dość mało wydajne i wiążą się ze znacznymi stratami materiału (naddatki technologiczne w postaci układów wlewowych oraz wypływki). Dlatego też wychodząc na przeciw oczekiwaniom przemysłu opracowano w Politechnice Lubelskiej szereg metod walcowania odkuwek kul o większych wymiarach.

Jedną z nowatorskich metod wytwarzania kul jest proces walcowania poprzecznego w układzie pojedynczym dwoma narzędziami w kształcie tarcz, który przedstawiono na rysunku 6.8 [68]. Półfabrykat 1 w kształcie odcinka pręta o średnicy d_o zbliżonej do średnicy D_k kształtowanej kuli 7 wprowadzany jest do przestrzeni roboczej, utworzonej przez dwie nieruchome prowadnice 3 oraz dwie tarcze 2. Położenie początkowe wsadu ustalane jest za pomocą zderzaka sprężystego 3, który może swobodnie obracać się dookoła własnej osi. Na obwodzie narzędzi (tarcz) wykonane są pojedyncze kołnierze pierścieniowe 6, o wklęsłych powierzchniach bocznych 5, których kształt odpowiada zarysowi walcowanej kuli 7. Po umieszczeniu wsadu między narzędziami uruchamia się ruch obrotowy obydwu tarcz 2 w tym samym kierunku i z taką samą prędkością n . Jednocześnie wprawia się narzędzia w ruch postępowy ze stałą prędkością v w kierunku osi wsadu. W wyniku oddziaływania kołnierzy roboczych półfabrykat zostaje wprawiony w przeciwny ruch obrotowy, a na jego obwodzie kształtowany jest pierścieniowy rowek o sferycznych powierzchniach bocznych (od strony półfabrykatu oraz od strony wyrobu). Dalsze przemieszczanie narzędzi w kierunku promieniowym powoduje stopniowe zwiększanie redukcji przekroju ukształtowanego rowka, aż do całkowitego rozdzielenia materiału na części o objętości równej objętości walcowanej kuli. W kolejnych fazach procesu oddzielony materiał dociskany jest do wklęsłych powierzchni kołnierzy 5 za pomocą zderzaka sprężystego 4, w wyniku czego następuje ukształtowanie materiału, który stopniowo wypełnia zarys walcowanej kuli. W rezultacie otrzymuje się wyrób w kształcie kuli o średnicy D_k zbliżonej do średnicy d_o zastosowanego półfabrykatu. Proces walcowania

można zrealizować również w układzie, w którym tylko jedno z narzędzi wykonuje dodatkowy ruch postępowy w kierunku osi wsadu.



Rys. 6.8. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul w układzie pojedynczym dwoma tarczami: a) początek procesu, b) koniec procesu walcowania pojedynczej kuli (opis w tekście)

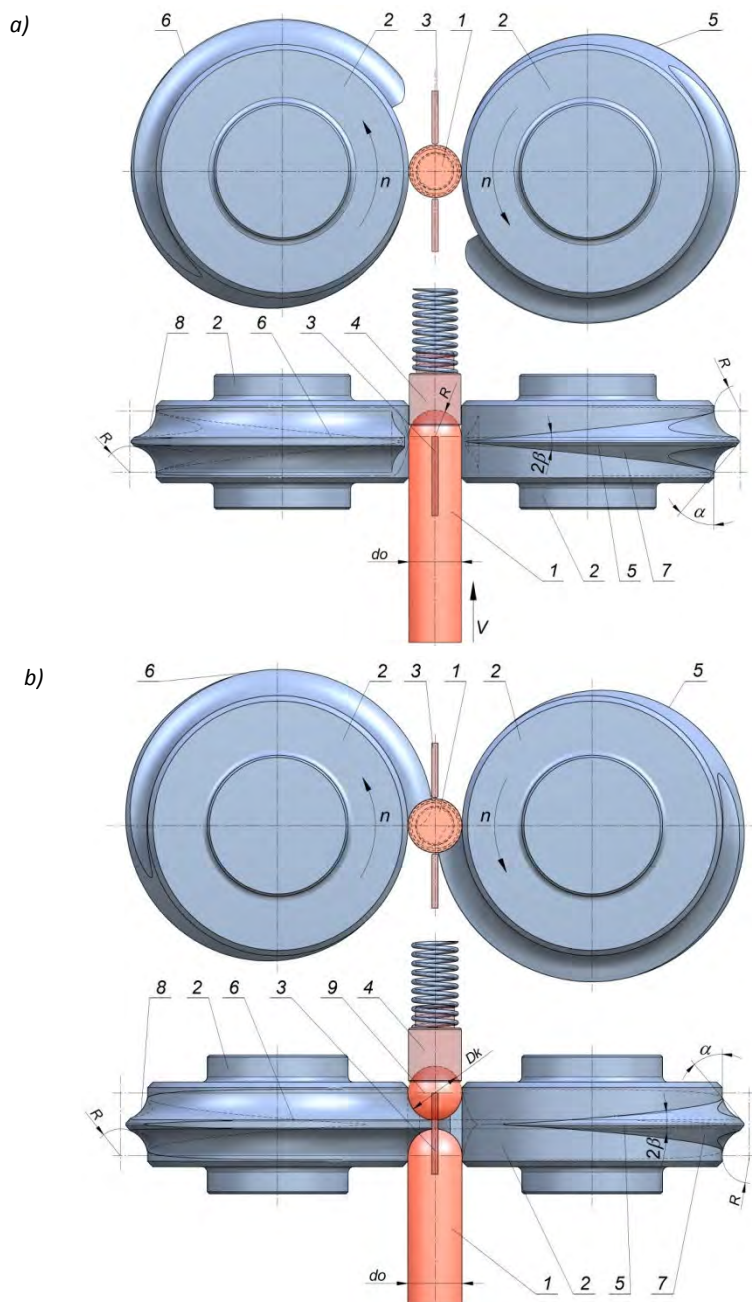
Do zalet opracowanej metody walcowania można zaliczyć między innymi prostą konstrukcję narzędzi, przekładającą się na łatwą ich regenerację, a przede wszystkim możliwość kształtowania kul o stosunkowo dużych średnicach, które dotychczas wytwarzano w procesach odlewania lub kucia. W rezultacie tak kształtowane kule mają znacznie lepsze własności wytrzymałościowe dzięki korzystnemu rozkładowi struktury (uzyskiwanej w procesie walcowania), dodatkowo sam proces wytwarzania kul jest znacznie wydajniejszy w stosunku do technik odlewania lub kucia.

6.6. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul w układzie pojedynczym dwoma tarczami

Bazując na procesach walcowania poprzeczno – klinowego wyrobów w kształcie kul, które szczegółowo przedstawiono w rozdziale 2 i 3 opracowano sposób wytwarzania odkuwek o większych średnicach ($D_k > 50$ mm) przy pomocy narzędzi o klinowo – wklęsłych kołnierzach kształtujących [64], umieszczonych na powierzchniach walców (tarcz). W trakcie jednego obrotu narzędzi kształtowana jest tylko jedna kula, dzięki czemu przy stosunkowo niewielkich mocach walcarek możliwe jest walcowanie kul o dużych średnicach.

Proces walcowania poprzeczno-klinowego kul w układzie pojedynczym realizowany jest bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie pręta, którego średnica jest zbliżona do wymiaru kształtowanych kul (rys. 6.9). Podczas walcowania wykorzystuje się dwa identyczne narzędzia w kształcie tarcz 2, o osiach równoległych do siebie, na obwodzie których wykonane są klinowe kołnierze kształtujące. Część roboczą tarcz można podzielić na trzy podstawowe strefy: wejściową, wcinania oraz kształtowania. W pierwszej strefie – wejściowej tarczy mają obniżoną średnicę, pokrywającą się z powierzchnią walcową, na której umieszczone są kołnierze kształtujące. Dzięki temu ułatwione jest podawanie wsadu do przestrzeni roboczej oraz usuwanie ukształtowanych kul. W drugiej strefie - wcinania znajdują się kołnierze 5 o klinowych powierzchniach bocznych 7, których zadaniem jest ułatwienie zagłębiania się narzędzi w półfabrykat. W trzeciej strefie znajdują się kołnierze robocze 6, o wklęsłych powierzchniach bocznych 8, których zadaniem jest ukształtowanie zarysu sferycznego wyrobów.

W początkowym etapie procesu półfabrykat 1 umieszczany jest w przestrzeni roboczej utworzonej przez dwie prowadnice 3 oraz dwa narzędzia w kształcie tarcz. Położenie osiowe półfabrykatu ustalane jest przy pomocy zderzaka 4 o wklęsłej powierzchni oporowej, który może swobodnie obracać się dookoła własnej osi oraz przemieszczać się sprężysto pod wpływem wydłużenia walcowanego materiału. Następnie uruchamia się ruch obrotowy narzędzi 2 z taką samą prędkością n w tym samym kierunku. Przemieszczające się obrotowo kołnierze robocze narzędzi wcinają się okresowo (co jeden obrót) w materiał i wprawiają go w ruch obrotowy. Jednocześnie klinowe kołnierze kształtują na obwodzie wsadu pierścieniowy rowek o stożkowych powierzchniach bocznych, stopniowo redukując średnicę przewężenia aż do całkowitego rozdzielenia materiału. W kolejnym etapie procesu oddzielony materiał dociskany jest do wklęsłych powierzchni kołnierzy 8 za pomocą zderzaka sprężystego 4. Umożliwia to ukształtowanie materiału, który stopniowo wypełnia zarys walcowanej kuli.



Rys. 6.9. Schemat procesu walcowania poprzeczno - klinowego kul w układzie pojedynczym dwoma tarczami: a) początek procesu, b) koniec procesu walcowania pojedynczej kuli (opis w tekście)

Proces WPK odkuwek kul w układzie pojedynczym można również zrealizować według schematu, w którym kołnierze robocze na całej długości mają stałą szerokość oraz wklęsłe powierzchnie boczne. Przy czym dla ułatwienia zagłębiania się narzędzi w półfabrykat w strefie wcinania kołnierze stopniowo zwiększają swoją wysokość po torze zbliżonym do spirali Archimedesesa.

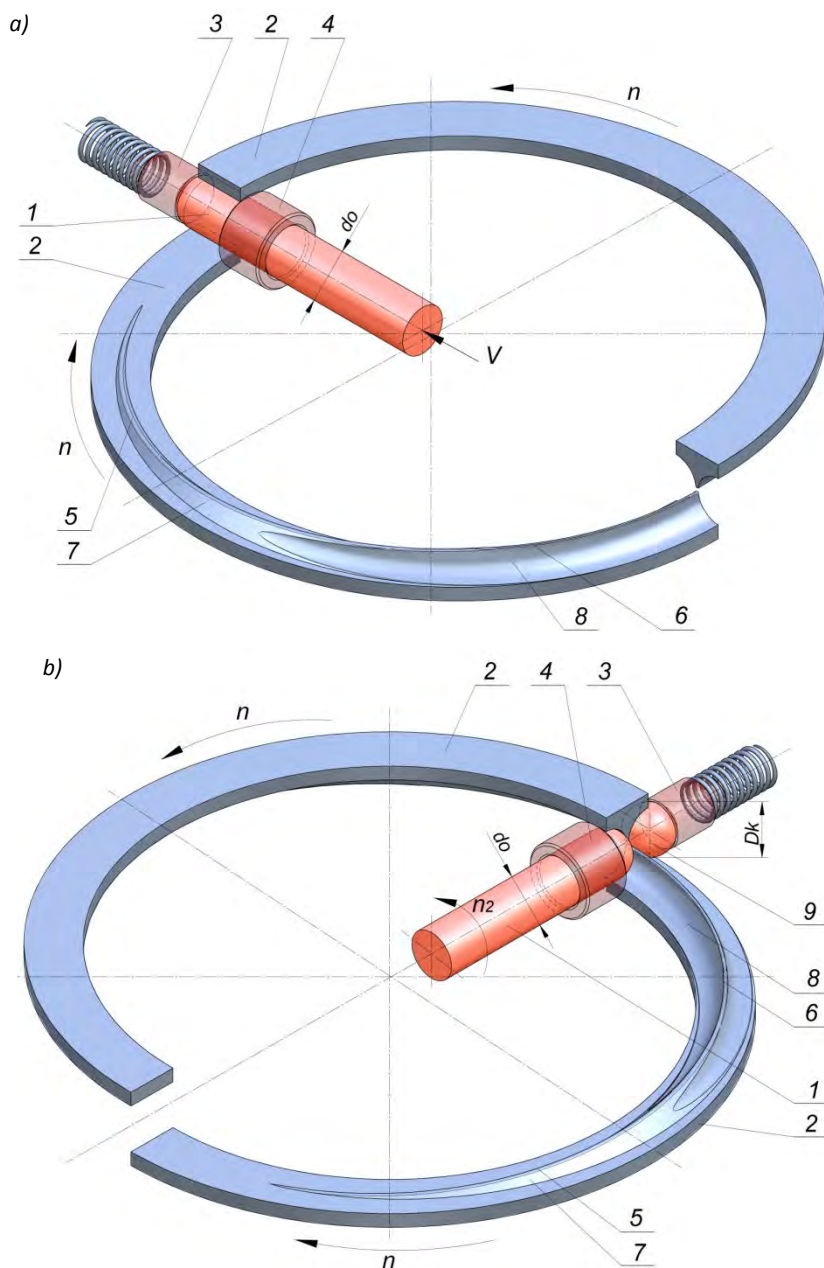
Przedstawiony sposób walcowania charakteryzuje się szeregiem zalet, jednak w stosunku do poprzednio omawianego procesu (poprzeczne walcowanie kul w układzie pojedynczym metodą wgłębną), wyeliminowany został ruch postępowy narzędzi. Dzięki temu w znacznym stopniu upraszcza się konstrukcja agregatu, na którym można zrealizować proces walcowania.

6.7. Walcowanie poprzeczne kul w układzie pojedynczym dwoma dyskami płaskimi

Kolejną opracowaną metodą, która umożliwia kształtowanie odkuwek kul o dużych średnicach jest proces walcowania poprzecznego pomiędzy dwoma dyskami płaskimi [65]. Na powierzchniach roboczych narzędzi (dysków) wykonane są pojedyncze kołnierze pierścieniowe, o klinowo – wklęsłych powierzchniach bocznych, które tworzą dwa połówkowe wykroje, kształtem zbliżone do zarysu walcowanych kul.

Schemat procesu walcowania poprzecznego kul dwoma dyskami przedstawiono na rysunku 6.10. Kule kształtowane są bezpośrednio z pręta pomiędzy dwoma jednakowymi narzędziami (płaskimi dyskami) 2, na powierzchniach których umieszczone są kołnierze kształtujące. Podobnie jak w poprzednio analizowanym procesie, narzędzia wykorzystywane podczas walcowania składają się z trzech podstawowych stref: wejściowej, wcinającej oraz kształtującej. W strefie wejściowej powierzchnie robocze narzędzi pozostają płaskie, co umożliwia swobodne przemieszczanie półfabrykatu. Następnie w strefie wcinania na powierzchniach dysków wykonane są kołnierze 5 o klinowych powierzchniach bocznych 7, które w strefie kształtującej płynnie przechodzą w kołnierze 6 o wklęsłych powierzchniach bocznych 8. W początkowym etapie procesu wsad 1, którego średnica d_0 jest zbliżona do wymiaru D_k walcowanej kuli 9 podawany jest do przestrzeni roboczej w tulei prowadzącej 4. Położenie osiowe półfabrykatu ustalane jest przy pomocy obrotowego zderzaka 3 o wklęsłej powierzchni oporowej. Następnie narzędzia dyskowe wprawiane są w przeciwny ruch obrotowy ze stałymi prędkościami n , co powoduje zagłębianie się klinowych kołnierzy w półfabrykat i ukształtowanie na obwodzie wsadu pierścieniowego rowka. W kolejnej fazie procesu w wyniku dalszego oddziaływania przemieszczających się kołnierzy następuje stopniowe zwiększanie redukcji przekroju, aż do całkowitego oddzielenia objętości materiału, równej objętości kształtowanej kuli. Jednocześnie wklęsłe powierzchnie boczne kołnierzy kształtujących powodują ukształtowanie materiału, który stopniowo wypełnia wykrój aż do uzyskania wyrobu w kształcie kuli.

Walcowanie kul według proponowanej metody charakteryzuje się szeregiem zalet, do których można zaliczyć między innymi możliwość kształtowania kul o dużych średnicach, prostą konstrukcję obrabiarki, większą wydajność procesu w stosunku do odlewania lub kucia, niewielkie straty materiałowe, większą dokładność, łatwą automatyzację oraz korzystny układ struktury kształtowanych wyrobów, co wpływa na



Rys. 6.10. Schemat procesu walcowania poprzecznego kul w układzie pojedynczym dwoma dyskami: a) początek procesu, b) koniec procesu walcowania pojedynczej kuli (opis w tekście)

poprawę własności wytrzymałościowych odkuwek. Dodatkowo kształt narzędzi (dyski) oraz kinematyka ich ruchu umożliwiają jednocześnie walcowanie odkuwek z dwóch

półfabrykatów rozmieszczonych naprzeciwko siebie. W efekcie możliwe jest dwukrotne zwiększenie wydajności.

6.8. Walcowanie poprzeczne kul z główek złomowanych szyn kolejowych

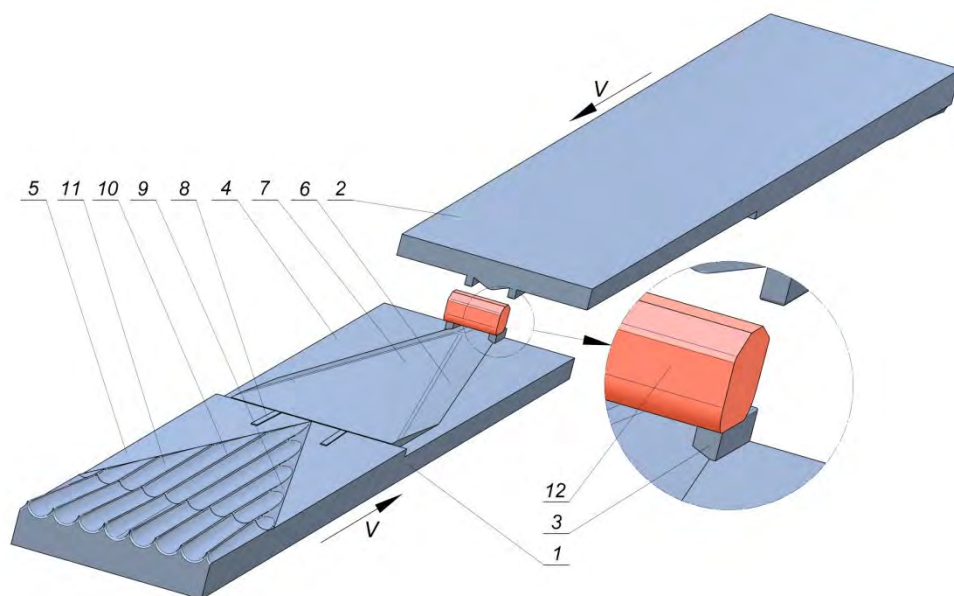
Dotychczas omawiane metody kształtowania plastycznego odkuwek kul bazowały na procesach walcowania poprzecznego, w których półfabrykatem (wsadem) były pręty o przekroju kołowym. Często zdarza się jednak, że istnieje możliwość wykorzystania materiału odpadowego (zwłaszcza w przypadku kul stosowanych na mielniki), który jest znacznie tańszy od handlowych wyrobów hutniczych. Zastosowanie takich półfabrykatów ograniczone jest jednak ich wymiarami oraz kształtem przekroju poprzecznego, który niejednokrotnie znacznie odbiega od zarysu kołowego. Dlatego też wykorzystanie tego typu materiałów związane jest z koniecznością zastosowania dodatkowej obróbki, w trakcie której wsad zostanie wstępnie ukształtowany na pręty o przekroju kołowym. Powoduje to wzrost kosztów wytwarzania wyrobów, co często skutecznie ogranicza możliwość wykorzystania tańszych i pełnowartościowych materiałów. Do tego typu materiałów można zaliczyć między innymi półfabrykaty pozyskiwane z odciętych główek złomowanych szyn kolejowych. Przy czym kształt przekroju poprzecznego główek szyn kolejowych jest nieregularny, dlatego też aby możliwe było wykorzystanie tego typu półfabrykatów, należy je wstępnie ukształtować na pręty o przekroju zbliżonym do kołowego. Wymaga to jednak zaangażowania specjalistycznych maszyn i urządzeń oraz dodatkowego wkładu robocizny i energii, co zmniejsza opłacalność stosowania takich materiałów. W związku z powyższym poszukuje się nowatorskich metod kształtowania kul, które pozwolą na bezpośrednie wykorzystanie półfabrykatów w postaci prętów o przekroju poprzecznym różnym od kołowego (między innymi główek złomowanych szyn kolejowych).

W ramach zrealizowanych prac badawczych nad procesami kształtowania półfabrykatów kul, które prowadzono w Politechnice Lubelskiej, opracowano szereg metod walcowania poprzecznego odkuwek bezpośrednio z główek złomowanych szyn kolejowych [82 - 84].

6.8.1. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami płaskimi

Procesy walcowania poprzeczno-klinowego z powodzeniem mogą być stosowane do wytwarzania różnego rodzaju odkuwek wydłużonych o kształtowych przekrojach poprzecznych [60, 61, 107]. Możliwe jest również walcowanie poprzeczne wyrobów z półfabrykatów, których przekroje poprzeczne różnią się od zarysu kołowego (hutnicze pręty o przekroju kwadratowym, sześciokątnym itp.) [55, 106]. W związku z powyższym, bazując na wynikach badań zamieszczonych w specjalistycznej literaturze [60, 61, 106, 107] opracowano proces walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek złomowanych szyn kolejowych [84]. Zaproponowany proces umożliwia jednocześnie kształtowanie od kilku do kilkunastu kul między przemieszczającymi się w przeciwnych kierunkach narzędziami w kształcie płyt.

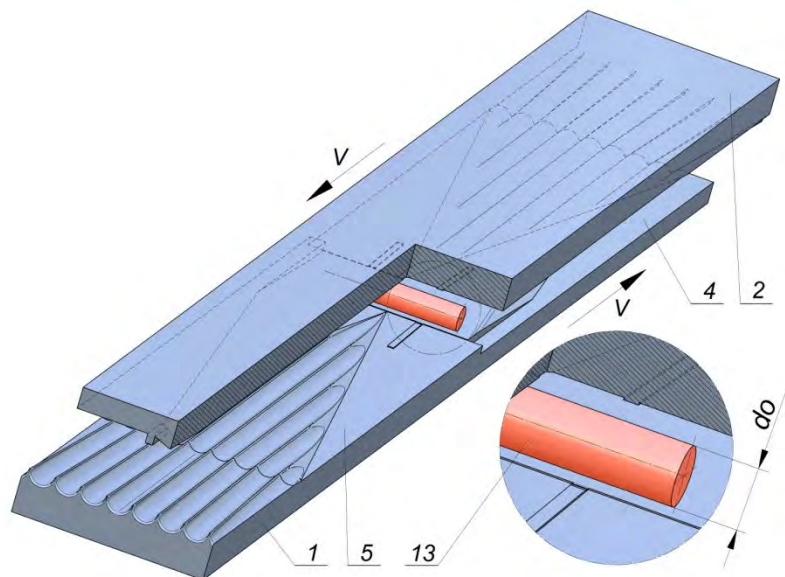
Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z główek złomowanych szyn kolejowych przedstawiono na rysunkach 6.11 – 6.13. W procesie wykorzystuje się narzędzia w kształcie płaskich płyt 1 oraz 2, równoległych do siebie, na powierzchniach których umieszczone są robocze występy klinowe. Narzędzi składają się z dwóch podstawowych stref: wstępnego kształtowania półfabrykatu oraz właściwego walcowania kul. W pierwszej strefie narzędzia mają kształt płaskich klinów, których zadaniem jest wstępne przygotowanie półfabrykatu, w wyniku przekształcenia nieregularnego kształtu główki szyny kolejowej w pręty o zarysie kołowym.



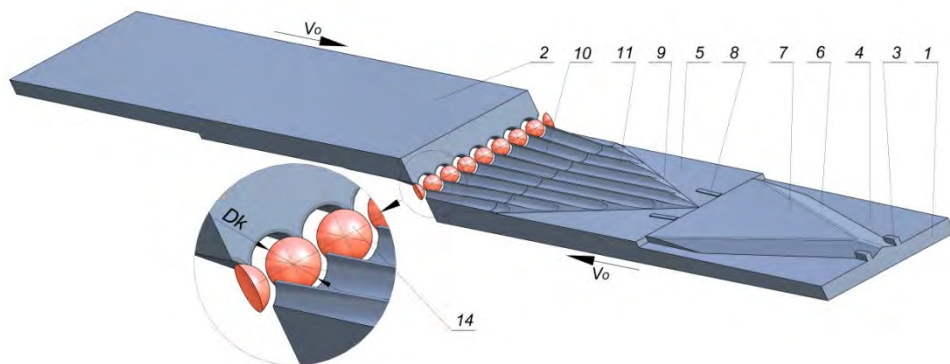
Rys. 6.11. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek złomowanych szyn kolejowych – pierwszy etap procesu (opis w tekście)

W drugiej strefie narzędzi na powierzchniach roboczych płyt umieszczone są wzdłużne występy klinowe o zarysie półokrągłym, które kształtują odkuwki kul z półfabrykatu przygotowanego w pierwszym etapie procesu. W pierwszej fazie procesu walcowania wsad 12 w postaci główki odciętej od złomowanej szyny kolejowej umieszczany jest w strefie wejściowej między dwoma płaskimi narzędziami 1 i 2 na ścieżkach prowadzących 3 (rys. 6.11). Następnie narzędzia 1 i 2 wprawiane są w przeciwny ruch postępowy z taką samą prędkością v . Przemierzając się wraz z narzędziami płaskie występy 7 o klinowych powierzchniach bocznych 6 wcinają się we wsad 12, wprawiając go w ruch obrotowy i kształtują półfabrykat 13 w postaci pręta o średnicy d_o zbliżonej do wymiaru gotowej kuli D_k (rys. 6.12). W kolejnym etapie procesu ukształtowany w pierwszej strefie półfabrykat 13 chwytny jest przez ścieżki prowadzące 8 umieszczone na początku drugiej strefy narzędzi i wprawiany w ruch obrotowy. Jednocześnie następuje stopniowe zagłębianie się w materiał klinów 9, na powierzchniach których umieszczone są wzdłużne występy 10, rozdzielające bruzdy 11 o wklęsłych powierzchniach bocznych. W wyniku oddziaływania przemieszczających się

występów 10 kształtowane są kule 14, które w ostatniej fazie walcowania są oddzielane od siebie przy pomocy noży rozcinających (rys. 6.13). Proces walcowania kul bezpośrednio z główek złomowanych szyn kolejowych można również zrealizować w układzie, w którym tylko jedno z płaskoklinowych narzędzi wykonuje ruch postępowy, zaś drugie pozostaje nieruchome, dzięki czemu możliwe jest uproszczenie konstrukcji walcarki.



Rys. 6.12. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek złomowanych szyn kolejowych – drugi etap procesu (opis w tekście)



Rys. 6.13. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek złomowanych szyn kolejowych – koniec procesu (opis w tekście)

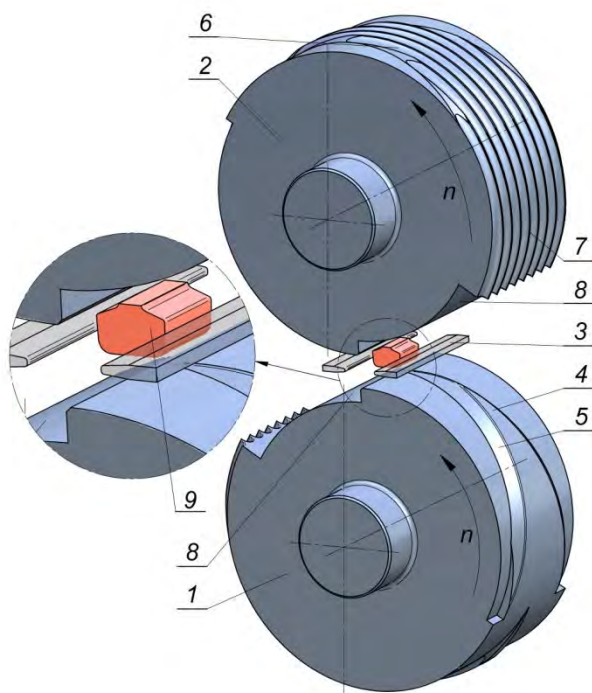
Główną zaletą opracowanego procesu walcowania jest możliwość jednoczesnego kształtowania wielu kul bezpośrednio z półfabrykatów w postaci główek odciętych od

złomowanych szyn kolejowych. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie taniego materiału o wysokich parametrach wytrzymałościowych bez konieczności stosowania dodatkowych operacji.

6.8.2. Walcowanie poprzeczno-klinowe kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami w kształcie walców

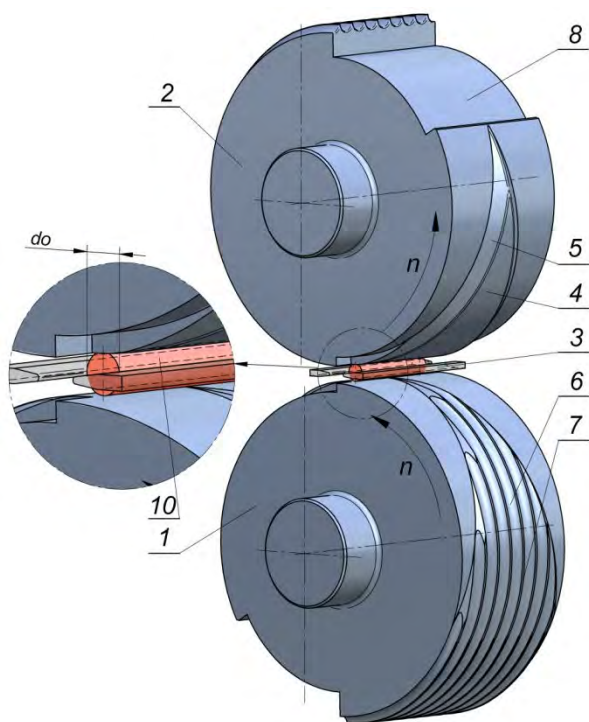
Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek kul bezpośrednio z główek złomowanych szyn kolejowych przy wykorzystaniu płaskich narzędzi charakteryzuje się szeregiem zalet, które czynią proces praktycznie bezkonkurencyjny w stosunku do innych metod wytwarzania tego typu elementów. Jednak ograniczeniem procesu może być stosunkowo duża długość segmentów narzędziowych (wynikająca z dwuetapowego kształtowania wyrobów w czasie jednego skoku narzędzi), która przekłada się na wielkość walcerek, na których można przeprowadzić walcowanie. Występuje tutaj również ruch jałowy (powrotny) narzędzi, który negatywnie wpływa na wydajność procesu. Dlatego też opracowano proces WPK kul z główek złomowanych szyn kolejowych przy pomocy narzędzi w kształcie walców [83]. Opracowana metoda stanowi modyfikację poprzednio opisywanej technologii, w której klinowe powierzchnie robocze narzędzi umieszczone zostały na obwodzie walców. Takie rozwiązanie umożliwia wyeliminowanie jałowego ruchu narzędzi.

Schemat procesu WPK kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami w kształcie walców przedstawiono na kolejnych rysunkach 6.14 – 6.15.



Rys. 6.14. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami w kształcie walców – pierwszy etap procesu (opis w tekście)

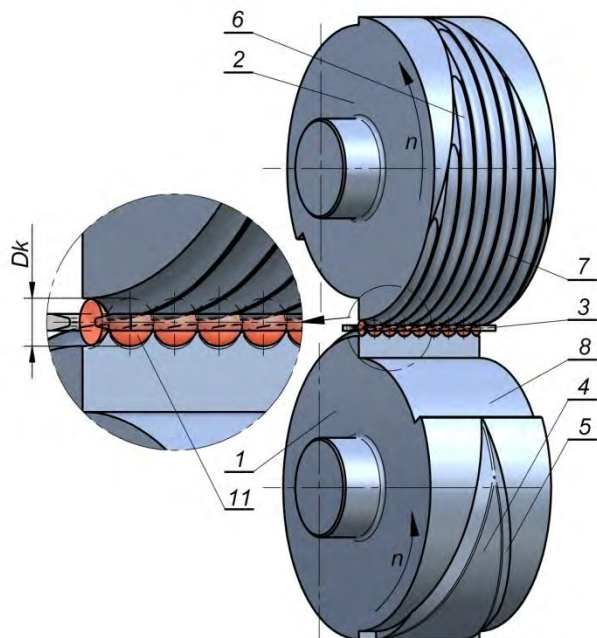
Powierzchnie robocze narzędzi można podzielić na trzy podstawowe strefy. Wejściową 8, obniżoną w stosunku do średnicy roboczej walców, w której następuje załadunek wsadu oraz usunięcie ukształtowanych kul z przestrzeni roboczej narzędzi. Strefy wstępnego kształtowania półfabrykatu, z gładkimi wystęgami 4 o klinowych powierzchniach bocznych 5, w której walcowane są pręty o przekroju kołowym. W ostatniej strefie na obwodzie walców umieszczone są klinowe kołnierze 7, rozdzielające bruzdy 6 o wklęsłych powierzchniach bocznych, przy pomocy których walcowane są kule. Sam przebieg procesu jest zbliżony do opisanego w podrozdziale 6.8.1. Po umieszczeniu główki złomowanej szyny kolejowej 9 w przestrzeni roboczej, pomiędzy dwiema prowadnicami 3, narzędzia wprawiane są w ruch obrotowy (rys. 6.14) i obracając się ze stałą prędkością n w tym samym kierunku zagłębiają się we wsad i powodują jego obrót. W pierwszym etapie procesu w wyniku oddziaływania powierzchni klinowych narzędzi z główki szyny kolejowej kształtowany jest półfabrykat w postaci pręta 9 o średnicy d_o zbliżonej do wymiaru walcowanych kul D_k (rys. 6.15). W kolejnej fazie procesu w wyniku oddziaływania przemieszczających się kołnierzy o wklęsłych powierzchniach bocznych walcowane są kule (rys. 6.16). W ostatnim etapie ukształtowane półfabrykaty usuwane są samoistnie z przestrzeni roboczej narzędzi, opadając pod własnym ciężarem do zbiornika umieszczonego pod narzędziami, gdzie poddawane są hartowaniu.



Rys. 6.15. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami w kształcie walców – drugi etap procesu (opis w tekście)

Proces WPK kul z główek szyn kolejowych narzędziami obrotowymi charakteryzuje się większą wydajnością w stosunku do kształtowania narzędziami płaskimi, co w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej ma istotne znaczenie ekonomiczne.

Jednak przy takim rozwiązaniu niezbędne jest stosowanie prowadnic, które utrzymują wsad w przestrzeni roboczej agregatu. Również koszt wykonania i regeneracji narzędzi w kształcie walców jest znacznie większy w stosunku do segmentów płaskich.



Rys. 6.16. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami w kształcie walców – końcowy etap procesu (opis w tekście)

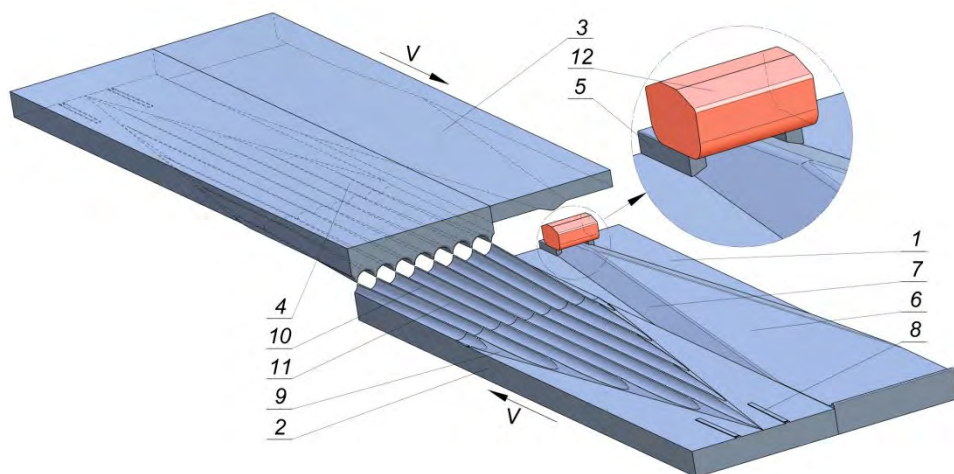
6.8.3. Dwuetapowe walcowanie poprzeczno-klinowe kul z główek złomowanych szyn kolejowych narzędziami płaskimi

Kolejną metodą wytwarzania kul bezpośrednio z główek szyn kolejowych, którą opracowano w ramach prowadzonych badań w Politechnice Lubelskiej jest proces dwuetapowego walcowania poprzeczno-klinowego [82]. Kule walcowane są między dwoma płaskimi narzędziami, przemieszczającymi się w przeciwnych kierunkach. Przy czym cechą charakterystyczną procesu jest brak ruchu jałowego narzędzi.

Przebieg procesu dwuetapowego WPK odkuwek kul z główek złomowanych szyn kolejowych przedstawiono na kolejnych rysunkach 6.17 – 6.19. Konstrukcja narzędzi wykorzystywanych do walcowania bazuje na rozwiązaniu przedstawionym w podrozdziale 6.8.1. Jednak zasadnicza różnica w stosunku do poprzedniego rozwiązania polega na tym, że poszczególne strefy robocze (wstępnego kształtowania półfabrykatu oraz właściwego walcowania kul) zostały umieszczone równolegle obok siebie i skierowane w przeciwnych kierunkach. Dzięki temu znacznie skrócono długość narzędzi i wyeliminowano jałowy ruch powrotny maszyny.

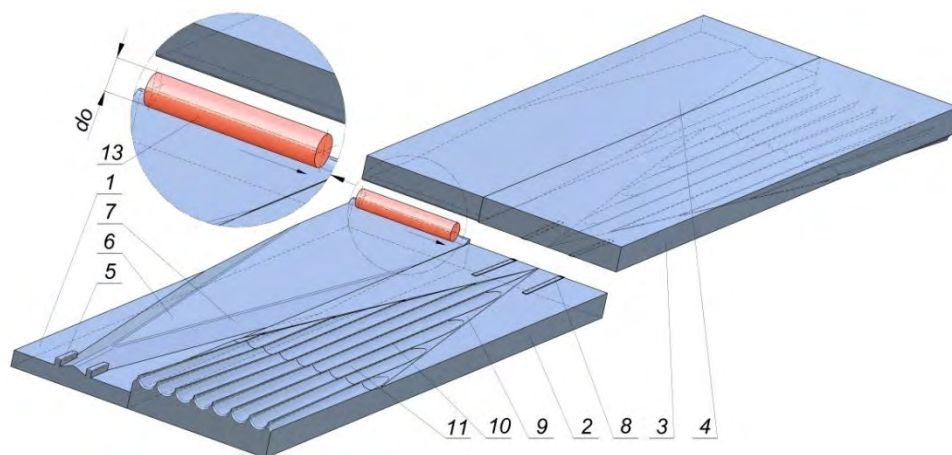
W pierwszym etapie walcowania wsad 12 w kształcie główki szyny kolejowej umieszczany jest w przestrzeni roboczej segmentów 1 oraz 3, na których znajdują się płaskie występy 6 o klinowych powierzchniach bocznych 7 (rys. 6.17). Początkowe położenie wsadu ustalane jest za pomocą dwóch ścieżek prowadzących 5. Następnie

uruchamiany jest przeciwbieżny ruch postępowy narzędzi, które przemieszczając się z jednakowymi prędkościami v , zagłębiają się we wsad 12, wprawiając go w ruch obrotowy. W tym czasie z główki szyny kolejowej kształtowany jest półfabrykat 13 w postaci pręta o przekroju kołowym i średnicy d_o zbliżonej do wymiaru kuli D_k . Po osiągnięciu przez narzędzia skrajnego położenia wyłączany jest ich ruch postępowy, a ukształtowany półfabrykat 13 zostaje przesunięty do przestrzeni roboczej, utworzonej przez segmenty 2 oraz 4 (rys. 6.18), zajmując położenie na dwóch ścieżkach prowadzących 8. Na powierzchniach roboczych segmentów 2 i 4 wykonane są wzdłużne występy 10 rozdzielające bruzdy 11 o zarysie półokrągłym. W kolejnym etapie procesu (po przesunięciu półfabrykatu między segmenty 2 oraz 4) uruchamiany jest powrotny ruch narzędzi, które przemieszczając się przeciwbieżnie, wprawiają półfabrykat 13 w ruch obrotowy. W wyniku oddziaływania przemieszczających się występów 10 o wklęsłych powierzchniach bocznych 11 kształtowane są kule, które w ostatniej fazie procesu rozdzielane są od siebie za pomocą noży rozcinających (rys. 6.19).

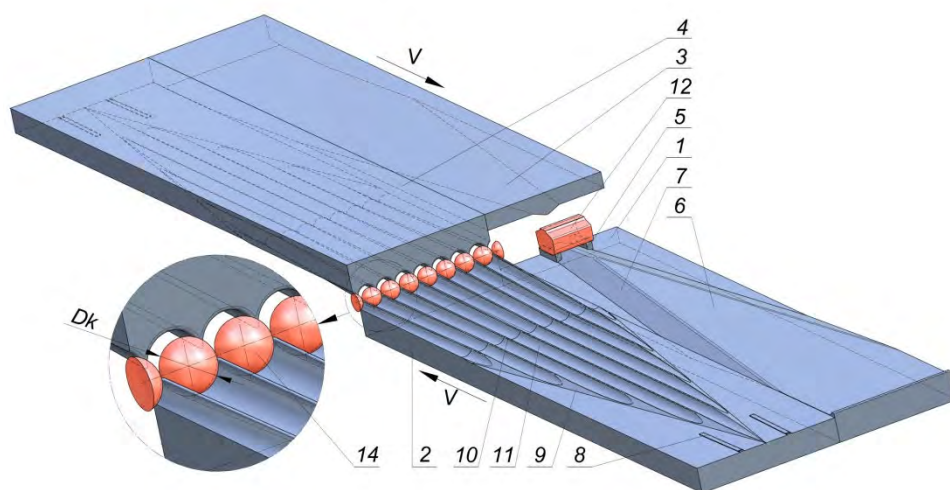


Rys. 6.17. Schemat dwuetapowego procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek szyn kolejowych – pierwszy etap procesu (opis w tekście)

Opracowaną metodą walcowania można kształtować od kilku do kilkunastu kul jednocześnie (w zależności od mocy walcarki oraz średnicy kul), co znacząco podnosi wydajność procesu w stosunku do kucia lub odlewania. Cenną zaletą jest również prosta konstrukcja narzędzi, które dzięki segmentowej budowie mogą być niezależnie poddawane regeneracji. Jednak największą zaletą opracowanej technologii jest wyeliminowanie ruchu jałowego (powrotnego) narzędzi, dzięki czemu w znacznym stopniu można skrócić czas pełnego cyklu kształtowania kul oraz ograniczyć zużycie energii.



Rys. 6.18. Schemat dwuetapowego procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek szyn kolejowych – drugi etap procesu (opis w tekście)



Rys. 6.19. Schemat dwuetapowego procesu walcowania poprzeczno-klinowego kul bezpośrednio z półfabrykatu w kształcie główek szyn kolejowych – koniec procesu (opis w tekście)

Podsumowanie

W bieżącym opracowaniu przedstawiono wyniki prowadzonych prac badawczych procesów walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) odkuwek kul. Analizę teoretyczną procesów WPK półfabrykatów kul przeprowadzono w oparciu o techniki numeryczne, bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). W obliczeniach wykorzystano komercyjne pakiety oprogramowania MES (DEFORM-3D w wersji 10.0 oraz Simufact Forming w wersji 10.0), które były wielokrotnie wykorzystywane 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. Znaczną część z analizowanych numerycznie procesów WPK kul zweryfikowano doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, wykorzystując zainstalowaną tam walcarkę płaskoklinową.

Po krótkim wprowadzeniu w rozdziale pierwszym, w którym scharakteryzowano obszar zastosowania wyrobów w kształcie kul oraz główne metody ich wytwarzania, przedstawiono rys historyczny dotyczący ewoluowania procesów walcowania poprzecznego kul. Pierwsze wzmianki dotyczące przemysłowego walcowania odkuwek kul pochodzą z końca XIX wieku. Był to okres, w którym zapotrzebowanie na elementy w kształcie kul gwałtownie wzrosło w skutek dynamicznie rozwijającego się przemysłu. Wtedy to również opracowano szereg metod walcowania wyrobów w kształcie kul, na których opiera się znaczna część obecnie stosowanych technologii. W rozdziale drugim przedstawiono istotę procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek. Przybliżono również podstawowe wiadomości z zakresu teorii i technologii procesów WPK wyrobów osiowo-symetrycznych oraz odkuwek ze stopniami kształtowymi. Omówiono także kierunki rozwoju procesów WPK. Rozdział drugi zamyka krótka charakterystyka konstrukcji agregatów kuźniczych, na których można zrealizować procesy WPK. W kolejnym rozdziale opisano wyniki badań numerycznych, przeprowadzonych przy wykorzystaniu MES, opracowanych procesów WPK odkuwek kul. Omówiono wpływ parametrów geometrycznych na przebieg walcowania oraz jakość uzyskanych wyrobów. Przybliżono również sposób kalibrowania narzędzi klinowych oraz podano zakresy parametrów geometrycznych, gwarantujących stabilny przebieg procesu walcowania. Rozdział czwarty poświęcono doświadczalnej weryfikacji procesów WPK odkuwek kul, którą zrealizowano w warunkach laboratoryjnych. Porównano tutaj wyniki symulacji numerycznych WPK półfabrykatów kul z rezultatami badań doświadczalnych. Pozwoliło to na ostateczne po-

twierdzenie możliwości kształtowania kul opracowanymi metodami walcowania poprzecznego. Wyniki prób walcowania kul w warunkach przemysłowych opisano w rozdziale piątym. Walcowanie kul na skalę przemysłową zrealizowano według dwóch schematów: WPK kul metodą zwykłą oraz walcowania poprzecznego kul ze spęczaniem. W trakcie procesów kształtowania odkuwek analizie poddano parametry geometryczne oraz własności wytrzymałościowe odwalcowanych wyrobów. Monitorowano również trwałość i sposób zużywania się powierzchni roboczych narzędzi. Nowatorskie metody walcowania poprzecznego oraz poprzeczno -klinowego kul, które opracowano w ramach prowadzonych badań opisano w rozdziale szóstym. Omówiono tutaj między innymi procesy walcowania poprzecznego kul dwoma walcami takimi metodami jak: wgłębna, styczna, planetarna, z ciągłym podawaniem półfabrykatu. Przybliżono również procesy walcowania kul o dużych wymiarach w układzie pojedynczym. Ostatni podrozdział poświęcono walcowaniu kul bezpośrednio z półfabrykatów w postaci główek złomowanych szyn kolejowych.

Summary

The book presented the results of the conducted experimental research on cross wedge rolling (CWR) of ball forgings. The theoretical analysis of the CWR processes of semi-finished balls was conducted using numerical techniques based on the finite elements method (FEM). The calculations were done using the commercial FEM software (DEFORM-3D v 10.0 and Simufact Forming v 10.0); the software had been applied by the authors on numerous occasions to analyze rotary forming processes of metals and alloys, and the obtained analysis results had been positively verified in the course of experimental tests. The simulations of ball rolling were performed in a three-dimensional state of strain, and the thermal phenomena occurring during the forming process were taken into account. As a result of the calculations done, the basic force and kinematic parameters of the process were determined and the possibility of producing ball forgings with the newly-developed rolling methods could be investigated. Also, the potential occurrence of phenomena interrupting the process stability that could affect negatively the quality of formed semi-finished products was investigated. A substantial part of the numerically analyzed CWR processes of balls was then experimentally verified in laboratory conditions at the Department of Computer Modelling and Metal Forming Technologies at Lublin University of Technology, using the flat wedge mill available there.

Chapter one began with a brief introduction describing both the application fields and main production methods of ball-shaped products. The chapter also presented a historical outline of the development of cross rolling of balls. Industrial processes for rolling ball forgings were first mentioned in the late nineteenth century, when a demand for ball-shaped elements suddenly increased due to the rapid development of industry. Consequently, numerous methods for rolling ball-shaped products were developed, and many of the currently applied technologies are based on them. The essence of the cross wedge rolling process was presented in chapter two. The chapter provided some basic information on both the theory and process technology of cross wedge rolling of axially symmetric products and forgings with formed steps. Also, new trends in the development of CWR processes were discussed. The chapter ended with a short description of how forging units used in CWR processes are built. The following chapter described the results of the FEM numerical calculations for the developed CWR processes of ball forgings. The chapter discussed the effect of geometric parameters on both the course of the rolling processes and the quality of the obtained products. Also, the method of sizing the wedge tools was explained and the geometric parameters ranges which ensure the stability of rolling were given. Chapter four discussed the experimental tests conducted in laboratory conditions to verify the numerically calculated data for the CWR processes of ball forgings. The results of the numerical simulations of CWR of semi-finished balls were then compared with the experimental test results. Consequently, the developed cross rolling methods were found to be

suitable for forming balls. In chapter five, the results of rolling balls in industrial conditions were described. The rolling process was conducted in two ways: as the standard CWR process and as cross rolling with upsetting. In the course of the forming processes, the geometric parameters and strength properties of the rolled products were analyzed. The durability as well as wear and tear of the working surfaces of the tools were investigated, too. Chapter six described the innovative methods for cross rolling and cross wedge rolling of balls that were developed as part of the conducted research. The chapter discussed, among other things, the processes for cross rolling of balls by two rolls, using the deep-rolling method, the tangent method, the planetary method, and the method of rolling with a continuous feed of the semi-finished product. The chapter also outlined the processes for rolling balls of large dimensions in the single configuration. The final subchapter of chapter six was devoted to the problem of rolling balls directly out of semi-finished parts in the form of heads of scrap railway rails.

Literatura

1. Bartnicki J., Pater Z.: Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165 (2005), 1154-1159
2. Bartnicki J., Pater Z.: The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156 (2004), 1867-1873
3. Baumgartner J. R. et al: *Forging apparatus*. US Patent No 3,478,556 (18.11.1969)
4. Blicharski M.: *Inżynieria materiałowa*. Stal. Warszawa, WNT 2004
5. Bornemann J.: *Machine for manufacturing balls or other bodies*. US Patent No 672,664 (23.04.1901)
6. Brandt F. H. G.: *Apparatus for forging and forming balls*. US Patent No 2,269,899 (13.01.1942)
7. Brenholtz G. E.: *Art of manufacturing solid balls*. US Patent No 1,951,234 (13.03.1934)
8. Brisben W. W.: *Machine for making steel balls*. US Patent No 607,015 (12.06.1898)
9. Canda A.: *Ball forging machine*. US Patent No 1,447,121 (2.11.1926)
10. Canda F. M.: *Ball rolling apparatus*. US Patent No 1,399,686 (6.12.1921)
11. Canda F. M.: *Ball rolling apparatus*. US Patent No 1,399,687 (6.12.1921)
12. Canda F. M.: *Ball rolling apparatus*. US Patent No 1,447,121 (27.02.1923)
13. Canda F. M.: *Ball rolling apparatus*. US Patent No 1,465,208 (14.08.1923)
14. Canda F. M.: *Ball rolling mill*. US Patent No 1,266,402 (14.05.1918)
15. Canda F. M.: *Continuous process of forming metal balls*. US Patent No 1,525,222 (3.02.1925)
16. Canda F. M.: *Method of and apparatus for rolling balls*. US Patent No 1,367,299 (1.02.1921)
17. Canda F. M.: *Process of and apparatus for forging balls*. US Patent No 1,204,127 (7.11.1916)
18. Canda F. M.: *Roll for rolling mills*. US Patent No 1,428,142 (5.09.1922)
19. Choi S., Yoon D. J., Lee G. A., Lee H. W., Na K. H.: Cold Rolling Technique for Eliminating Cutting Process in Manufacturing Precise Product using Non-heat-treated Micro Alloys, *Materials Science Forum*, 475-479 (2005), 3235-3238
20. Coates W. K.: *Ball forging machine*. US Patent No 1,522,416 (6.01.1925)
21. Coates W. K.: *Ball forging machine*. US Patent No 1,965,489 (3.06.1934)
22. Deng Z., Lovell M. R., Tagavi K. A.: Influence of Material Properties and Forming Velocity on the Interfacial Slip Characteristics of Cross Wedge Rolling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123 (2001), 647-653
23. Dong Y., Lovell M. R., Tagavi K.: Analysis of interfacial slip in cross-wedge rolling: an experimentally verified finite-element model, *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81 (1998), 273-281

24. Dong Y., Tagavi K. A., Lovell M. R., Deng Z.: Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure, *International Journal of Mechanical Sciences*, 42 (2000), 1233-1253
25. Dong Y., Tagavi K. A., Lovell M. R.: Analysis of interfacial slip in cross-wedge rolling: a numerical and phenomenological investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, 97 (2000), 44-53
26. Fang G., Lei L. P., Zeng P.: Three-dimensional rigid-plastic finite element simulation for two-roll cross-wedge rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (2002), 245-249
27. Fu X. P., Dean T. A.: Past Developments, Current Applications and Trends in the Cross Wedge Rolling Process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 33-3 (1993), 367-400
28. Gray H. H.: *Machine for shearing rails into small pieces for use in a forging machine*. US Patent No 2,966,087 (27.12.1960)
29. Gronemeyer H. W.: *Continuous method and apparatus for forming balls*. US Patent No 2,801,556 (6.08.1957)
30. Hanks G. R.: *Grinding body and method of producing same*. US Patent No 1,451,335 (10.04.1923)
31. Herzfeld A.: *Ball grinding mill*. US Patent No 569,828 (20.10.1896)
32. Hill C. C.: *Machine for rolling balls*. US Patent No 600,532 (15.03.1898)
33. Hodge G. O.: *Machine for forming balls*. US Patent No 1,665,361 (10.04.1928)
34. <http://amtengine.com/en/content/purpose/crswg/>
35. <http://jntritiger.en.ec21.com/>
36. <http://www.beltechnologia.com/en/about/>
37. <http://www.lasco.de/db/lasco/index-neu-englisch.nsf>
38. <http://www.smeral.cz/GBTvarPKV.html>
39. http://www.vniimetmash.ru/products/detaleprokatka/klin_e.shtml
40. Kikuchi T.: *Ball rolling apparatus*. US Patent No 3,186,204 (1.06.1965)
41. Kreiss E.: *Disintegrator*. US Patent No 639,406 (19.12.1899)
42. Lee H. W., Lee G. A., Yoon D. J., Choi S., Na K. H., Hwang M. Y.: Optimization of design parameters using a response surface method in a cold cross-wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 201 (2008), 112-117
43. Li Q., Lovell M. R.: Predicting Critical Friction in a Two-Roll Cross Wedge Rolling Process, *Transactions of ASME*, 125 (2003) 200-203
44. Li Q., Lovell M.: On the interfacial friction of a two-roll CWR process, *Journal of Materials Processing Technology*, 160 (2005), 245-246
45. Li X., Wang M., Du F.: The coupling thermal-mechanical and microstructural model for the FEM simulation of cross wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 172 (2006), 202-207
46. Lovell M. R.: Evaluation of Critical Interfacial Friction in Cross Wedge Rolling, *Transactions of the ASME-F-Journal of Tribology* 123-2 (2001), 424-429
47. Marcy F. E.: *Ball rolling machine*. US Patent No 1,534,726 (21.04.1925)
48. Munro A. C.: *Ball forming machine*. US Patent No 1,691,248 (13.10.1928)
49. Munro A. C.: *Ball forming machine*. US Patent No 1,746,671 (11.02.1930)

50. Neugebauer R., Glass R., Kolbe M., Hoffmann M.: Optimisation of process routes for cross rolling and spin extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002), 856-862
51. Neugebauer R., Lorenz B., Steger J., Holstein D.: Cross Wedge Rolling in Preforming Titanium Alloy Aero Engine Vanes, *Steel Research International*, 79-1 (2008), 375-381
52. Neugebauer R., Putz M., Hellfritsch U.: Improved Process Design and Quality for Gear Manufacturing with Flat and Round Rolling, *Annals of the CIRP*, 56-1 (2007), 307-312
53. Pater Z., Bartnicki J., Samołyk G.: Numerical modelling of cross-wedge rolling process of ball pin, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165 (2005), 1235-1240
54. Pater Z., Bartnicki J.: Finished Cross-Wedge Rolling of Hollowed Cutters, *Archives of Metallurgy and Materials*, 51-2 (2006), 205-211
55. Pater Z., Gontarz A., Tomczak J.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o kształtach złożonych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011
56. Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls, *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (2006), 550-554
57. Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Cross-wedge rolling of balls, *Steel Research International "Special edition: Metal Forming 2008"*, 1 (2008), 369-374
58. Pater Z., Gontarz A., Wroński W.: New method of thread rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004), 722-728
59. Pater Z., Tofil A.: Experimental and Theoretical Analysis of the Cross-Wedge Rolling Process in Cold Forming Conditions, *Archives of Metallurgy and Materials*, 52-2 (2007), 289-297
60. Pater Z., Tomczak J. Cross – wedge rolling of parts with non – circular cross section. Proceedings of the 24th *International Manufacturing Conference*, IMC 24, Waterford Institute of Technology, Ireland, 2007, s. 1079-1086 -
61. Pater Z., Tomczak J. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego*. Obróbka Plastyczna Metali 2005 nr 2 s. 31-41
62. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Kazanecki J.: *Analiza teoretyczna procesu walcowania kul w walcierce skośnej*. Walcownictwo 2011, Procesy, Narzędzia, Materiały. Materiały konferencyjne, Ustroń 12 – 14 października 2011, ss. 69 – 74
63. Pater Z., Tomczak J.: *Narzędzie do równoczesnego kształtowania plastycznego wyrobów typu kula metodą walcowania poprzecznego*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394735, 2011
64. Pater Z., Tomczak J.: *Sposób plastycznego kształtowania wyrobów typu kula metodą walcowania poprzecznego dwoma tarczami w układzie pojedynczym*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.395042, 2011
65. Pater Z., Tomczak J.: *Sposób plastycznego kształtowania wyrobów typu kula metodą walcowania poprzecznego dwoma dyskami płaskimi w układzie pojedynczym*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.395043, 2011
66. Pater Z., Tomczak J.: *Sposób równoczesnego kształtowania plastycznego wyrobów typu kula metodą walcowania poprzecznego narzędziami płaskimi*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394737, 2011

67. Pater Z., Tomczak J.: *Sposób równoczesnego kształtowania plastycznego wyrobów typu kula metodą walcowania poprzecznego dwoma walcami*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394738, 2011
68. Pater Z., Tomczak J.: *Sposób walcowania poprzecznego dwoma tarczami wyrobów typu kula metodą wgłębną w układzie pojedynczym*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.395044, 2011
69. Pater Z., Weroński W., Kazanecki J., Gontarz A.: Study of process stability of cross wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93 (1999), 458-462
70. Pater Z., Weroński W.: Determination of the contact area between the rolling tools and the workpiece in cross rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 45 (1994), 105-110
71. Pater Z., Weroński W.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe kul*. *Materiały III Konferencji Naukowej, Walcownictwo 2005*, Ustroń 19-21 października 2005, 213-218
72. Pater Z.: A study of cross wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81 (1998), 370-375
73. Pater Z.: Cross-wedge rolling of shafts with an eccentric step. *Journal of Iron and Steel Research, International* 18 (2011) 26-30
74. Pater Z.: Finite element analysis of cross wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 173 (2006), 201-208
75. Pater Z.: *Narzędzie do walcowania poprzecznego wyrobów typu kula*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394832, 2011
76. Pater Z.: Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93 (1999), 468-473
77. Pater Z.: *Podstawy teoretyczne i badania eksperymentalne procesu walcowania klinowo-rolkowego*, Wyd. INOP, Poznań 2007
78. Pater Z.: Simulation of cross-wedge rolling process using the upper-bound method, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 27 (1998), 120-127
79. Pater Z.: *Sposób walcowania poprzecznego dwoma walcami wyrobów typu kula metodą wgłębną*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394836, 2011
80. Pater Z.: *Sposób walcowania poprzecznego dwoma walcami wyrobów typu kula metodą styczną*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394838, 2011
81. Pater Z.: *Sposób walcowania poprzecznego dwoma walcami wyrobów typu kula*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394833, 2011
82. Pater Z.: *Sposób walcowania poprzecznego dwoma walcami wyrobów typu kula, zwłaszcza z główek złomowych szyn*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.395348, 2011
83. Pater Z.: *Sposób walcowania poprzecznego narzędziami płaskimi wyrobów typu kula, zwłaszcza z główek złomowych szyn*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.395350, 2011
84. Pater Z.: *Sposób walcowania poprzecznego wyrobów typu kula, zwłaszcza z główek złomowych szyn*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P. 395349, 2011
85. Pater Z.: Stress State in Cross Wedge Rolling Process, *Archives of Metallurgy*, 48-1 (2003), 21-35
86. Pater Z.: The Analysis of the Strain in Parts Formed by Means of the Wedge-Rolls Rolling (WRR), *Archives of Metallurgy and Materials*, 50-3 (2005), 675-690

87. Pater Z.: Theoretical and experimental analysis of cross wedge rolling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (2000), 49-63
88. Pater Z.: Theoretical Method for Estimation of Mean Pressure on Contact Area Between Rolling Tools and Workpiece in Cross Wedge Rolling Processes, *International Journal of Mechanical Science*, 39-2 (1997), 233-243
89. Pater Z.: Tools optimization in cross-wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 138 (2003), 176-182
90. Pater Z.: W Wartość graniczna całki Cockrofta-Lathama dla stali kolejowej gatunku R200, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* nr 12 (2010), 702-706
91. Pater Z.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009
92. Pater Z.: Wartość graniczna całki Cockrofta-Lathama dla stali łożyskowej gatunku 100Cr6, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* nr 1 (2011), 101-103
93. Piedrahita F., Garcia Arana L., Chastel Y.: Three Dimensional Numerical Simulation of Cross-Wedge Rolling of Bars, *Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity ICTP*, Verona, 2005 (CD ROM)
94. Putnam H. M.: *Die for rolling metal balls*. US Patent No 618,584 (31.01.1899)
95. Qiang Y. F., Song P. B.: Analysis on temperature distribution in cross wedge rolling process with finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188 (2007), 392-196
96. Ščukin V. Ja., Kozevnikova G. V., Kirdun K. D.: 3rd Int. Scientific Technical Conference "Advanced Methods and Technologies for Materials Manufacture and Processing", Minsk 15-17.10.2008, 196-198
97. Ščukin V. Ja., Kozevnikova G. V.: 3rd Int. Scientific Technical Conference "Advanced Methods and Technologies for Materials Manufacture and Processing", Minsk 15-17.10.2008, 195-196
98. Ščukin V. Ja., Kozevnikova G. V.: 3rd Int. Scientific Technical Conference "Advanced Methods and Technologies for Materials Manufacture and Processing", Minsk 15-17.10.2008, 199-200
99. Simonds G. F., Grant J. J.: *Machine for making rolled forgings*. US Patent No 427,125 (6.05.1890)
100. Simonds G. F.: *Die for spherical articles*. US Patent No 319,756 (9.06.1885)
101. Simonds G. F.: *Machine for forging car axles and other metal articles*. US Patent No 319,752 (9.06.1885)
102. Simonds G. F.: *Method of making irregular shaped metal articles*. US Patent No 419,292 (14.01.1890)
103. Stalowe kule i cylpepsy do młynów. *Polska Norma* PN-H-94057
104. Tebbetts C. F.: *Device for rolling metallic bodies to spheroidal forms*. US Patent No 375,783 (3.01.1888)
105. Tofil A., Pater Z.: *Dzielenie bezodpadowe metalowych prętów okrągłych*. Wyd. PWSZ w Chełmie, Chełm 2009
106. Tomczak J. *Badania teoretyczno – doświadczalne procesu walcowania poprzeczno – klinowego wałków ze stopniami kształtowymi*. Praca doktorska, niepublikowana. Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny 2007
107. Tomczak J., Pater Z. Kształtowanie metodą walcowania poprzeczno – klinowego odkuwek o przekroju kwadratowym. W: *Badania teoretyczno-technologiczne*

- procesów plastycznego kształtowania metali. Monografia 2004. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej s. 87-108
108. Tomczak J., Pater Z.: Sposób walcowania poprzecznego dwoma walcami wyrobów typu kula metodą planetarną. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394967, 2011
109. Urankar S., Lovell M., Morrow C., Li Q., Kawada K.: Development of a critical friction model for cross wedge rolling hollow shafts, *Journal of Materials Processing Technology*, 137 (2006), 539-544
110. Urankar S., Lovell M., Morrow C., Li Q., Kawada K.: Establishment of failure conditions for cross-wedge rolling of hollow shafts, *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (2006), 545-549
111. Wang M., Li X., Du F., Zheng Y.: A coupled thermal-mechanical and microstructural simulations of the cross wedge rolling process and experimental verification, *Materials Science and Engineering A*, 391 (2005), 305-312
112. Wang M., Li X., Du F., Zheng Y.: Hot deformation of austenite and prediction of microstructure evolution of cross-wedge rolling, *Materials Science and Engineering A*, 379 (2004), 133-140
113. Wang M., Li X., Du F.: Analysis of Metal Forming in Two-Roll Cross Wedge rolling Process Using Finite Element Method, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 16-1 (2009), 38-43
114. Wells D. E.: *Ball forming mill*. US Patent No 2,409,649 (22.10.1946)
115. Weroński W., Pater Z., Gontarz A.: Zastosowanie metody linii poślizgu do wyznaczania współczynnika zwiększenia średnicy kształtowanej odkuwki w procesach walcowania poprzeczno-klinowego, *Obróbka Plastyczna Metali*, 4 (1994), 35-46
116. Xiong Y., Sun S., Li Y., Zhao J., Lu Z., Zhao D., Zheng Y., Fu W.: Effect of warm cross-wedge rolling on microstructure and mechanical property of high carbon steel rods, *Materials Science and Engineering A* 431 (2006), 152-157
117. Xu C. G., Liu G. H., Ren G. S., Shen Z., Ma C. P., Ren W. W.: Finite Element Analysis of Axial Feed Bar Rolling, *Acta Metallurgica Sinica*, 20-6 (2007), 463-468
118. Xuedao S., Chuanmin L., Jing Z., Zhenghuan H.: Theoretical and experimental study of varying rule of rolling-moment about cross-wedge rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188 (2007), 752-756