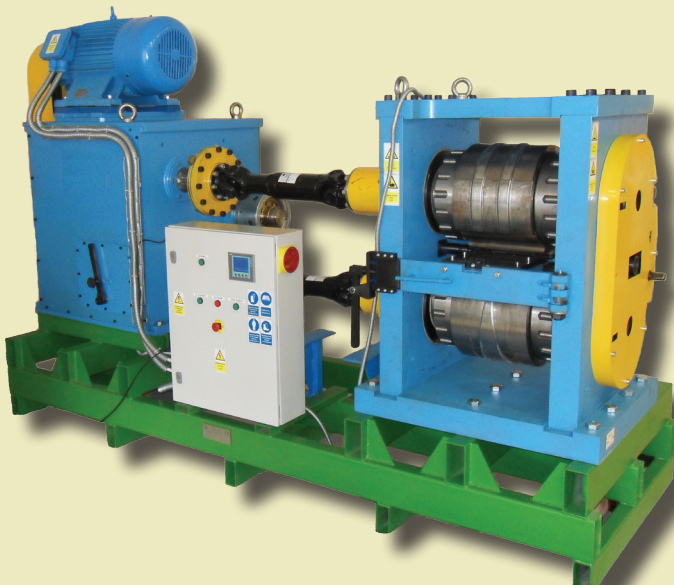


*Arkadiusz Tofil*

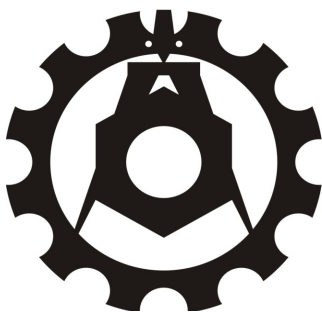
# Procesy kształtowania półwyrobów w uniwersalnej walcarce kuźniczej



Lublin 2016

Procesy kształtowania  
półwyrobów w uniwersalnej  
walcarce kuźniczej

# Monografie – Politechnika Lubelska



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

Arkadiusz Tofil

# Procesy kształtowania półwyrobów w uniwersalnej walcarce kuźniczej



Politechnika Lubelska  
Lublin 2016

Recenzent:

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

Redakcja i skład: Arkadiusz Tofil

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-185-0

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

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

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

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

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

---

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

Nakład: 100 egz.

# Spis treści

<b>Streszczenie</b> .....	7
<b>Abstract</b> .....	8
<b>Wstęp</b> .....	9
<b>1. Analiza stanu zagadnienia z zakresu walcowania kuźniczego</b> .....	11
1.1. Przegląd konstrukcji walcarek kuźniczych .....	11
1.1.1. Walcarki kuźnicze wzdłużne .....	14
1.1.2. Walcarki poprzeczno-klinowe .....	26
1.1.3. Walcarki skośne .....	38
1.2. Przegląd prac badawczych w zakresie walcowania kuźniczego .....	43
1.2.1. Walcowanie wzdłużne .....	44
1.2.2. Walcowanie poprzeczne .....	51
1.2.3. Walcowanie skośne .....	57
1.3. Przegląd metod dzielenia bezodpadowego prętów .....	60
1.3.1. Cięcie na nożycach i w matrycach .....	60
1.3.2. Dzielenie z wykorzystaniem obciążeń udarowych .....	65
1.3.3. Dzielenie w wyniku pęknięcia materiału .....	65
<b>2. Cel i uzasadnienie podjęcia tematu</b> .....	73
<b>3. Uniwersalna walcarka kuźnicza</b> .....	75
3.1. Główne założenia konstrukcyjne uniwersalnej walcarki kuźniczej .....	75
3.2. Konstrukcja walcarki kuźniczej .....	76
3.3. Analiza wytrzymałościowa uniwersalnej walcarki kuźniczej .....	96
<b>4. Badania procesu walcowania kuźniczego odkuwek w uniwersalnej walcierce kuźniczej</b> .....	103

4.1. Konstrukcja narzędzi do walcowania kuźniczego odkuwki wałka .....	103
4.2. Weryfikacja numeryczna opracowanych wykrojów kuźniczych .....	106
4.3. Badania doświadczalne walcowania odkuwki wałka stopniowanego.	110
<b>5. Badania procesu walcowania odkuwek w układzie poprzeczno- -klinowym .....</b>	<b>115</b>
5.1. Modelowanie numeryczne procesu WPK .....	116
5.2. Badania doświadczalne WPK odkuwki wałka stopniowanego .....	122
<b>6. Dzielenie bezodpadowe prętów w uniwersalnej walcierce kuźniczej ...</b>	<b>127</b>
6.1. Konstrukcja narzędzi do dzielenia bezodpadowego prętów .....	128
6.2. Analiza numeryczna dzielenia bezodpadowego prętów w uniwersalnej walcierce kuźniczej .....	131
6.3. Badania doświadczalne dzielenia prętów .....	135
<b>7. Badania procesu walcowania przedkuwki dźwigni w uniwersalnej walcierce kuźniczej .....</b>	<b>141</b>
7.1. Konstrukcja narzędzi do walcowania przedkuwki .....	142
7.2. Analiza numeryczna procesu WPK przedkuwki dźwigni .....	144
7.3. Weryfikacja doświadczalna walcowania poprzeczno-klinowego przedkuwki dźwigni .....	151
<b>Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>159</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>163</b>

# Streszczenie

W monografii przedstawiono wyniki prowadzonych prac badawczych, związanych z opracowaniem i weryfikacją konstrukcji wielozadaniowej walcarki kuźniczej, przeznaczonej do realizacji takich procesów jak: walcowanie kuźnicze wzdłużne, walcowanie poprzeczno-klinowe oraz dzielenie bezodpadowe prętów. Prace projektowe zrealizowano w środowisku CAD, zaś obliczenia sprawdzające sztywność i wytrzymałość konstrukcji przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Weryfikację przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych oraz możliwości technologicznych walcarki wykonano podczas prób uruchomieniowych maszyny. Próby kształtowania półwyrobów zrealizowano w warunkach laboratoryjnych w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie, gdzie została zainstalowana uniwersalna walcarka kuźnicza. Uzyskane wyniki z badań doświadczalnych w pełni potwierdziły przydatność maszyny do realizacji założonych na wstępie technologii.

Pracę podzielono na trzy tematycznie związane ze sobą części. Po krótkim wprowadzeniu w pierwszej części dokonano przeglądu stanu wiedzy z zakresu konstrukcji i eksploatacji walcarek kuźniczych. Omówiono również aspekty związane z technologią walcowania kuźniczego (wzdłużnego, poprzecznego i skośnego), a także przedstawiono alternatywne metody dzielenia prętów. Następnie w oparciu o dokonany przegląd literatury przedstawiono koncepcję uniwersalnej walcarki kuźniczej, po czym szczegółowo omówiono przyjęte na etapie projektowania rozwiązania konstrukcyjne. Opisano tutaj również wyniki numerycznej analizy wytrzymałościowej klatki walcowniczej. Kolejne rozdziały pracy poświęcono omówieniu wyników badań związanych z weryfikacją zakładanych możliwości technologicznych maszyny. Przedstawiono między innymi wyniki analizy teoretyczno-doświadczalnej procesu walcowania wzdłużnego, walcowania poprzeczno-klinowego oraz dzielenia bezodpadowego. Trzecią część pracy zamyka rozdział poświęcony procesowi walcowania poprzeczno-klinowego przedkuwek z wykorzystaniem innowacyjnych narzędzi, których konstrukcja umożliwia efektywne walcowanie półfabrykatów na stosunkowo krótkiej drodze kształtowania. Przedstawione w tym rozdziale rozwiązanie jest dedykowane szczególnie do kształtowania odkuwek z większymi redukcjami przekroju poprzecznego w układzie poprzeczno-klinowym w walcarkach, charakteryzujących się niewielką średnicą roboczą walców.

Opracowanie zamyka krótkie podsumowanie, w którym w zwięzły sposób dokonano zestawienia uzyskanych zrealizowanych prac badawczych.



## **Abstract**

The monograph reports the results of research on development and verification of the design of a universal roll forging mill for such processes as longitudinal roll forging, cross wedge rolling and steel bar cropping. The research work was performed in the CAD environment, while the computations of the machine's rigidity and strength were performed by the finite element method. The design and technological potential of the roll forging mill were verified by machine activation tests. These laboratory tests were performed at the State School of Higher Education in Chelm, where the machine was installed. The results fully confirm the machine's suitability for the above processes.

The monograph is divided into three thematically linked sections. Following a brief introduction, the first section gives an overview of state-of-the-art on the design and operation of roll forging mills. In addition, it discusses various aspects of forge rolling (longitudinal, cross and skew rolling processes) as well as presents alternative methods for separating semi-finished products. Next, based on the literature survey, the concept of a new universal roll forging mill is presented, followed by a detailed discussion of the adopted design solutions. This section of the monograph also reports the numerical results of strength analysis of the mill stand. Successive chapters discuss the results of experimental tests performed to verify technological potential of the machine. Among others, the theoretical and experimental results of longitudinal rolling, cross wedge rolling and bar cropping processes are reported. The third section of the monograph ends with a chapter on a cross wedge rolling process using innovative tools, the design of which enables effective rolling of semi-finished products on a relatively short forming path. This solution is particularly dedicated to formation of parts with large cross sectional reductions by cross wedge rolling using a roll mill with small effective diameter of rolls.

The monograph ends with a concluding section, which briefly sums up the results of the conducted research work.

# Wstęp

Ważnymi czynnikami wpływającymi na strukturę kosztów i determinującymi rentowność produkcji są zużycie materiałów, energii oraz robocizny, konieczne do wytworzenia gotowego wyrobu. W dobie gospodarki rynkowej są to główne powody, powodujące dynamiczny rozwój wysokowydajnych technologii.

Powszechną tendencją w światowym kuźnictwie jest systematyczny wzrost technologii rotacyjnego kształtowania metali i ich stopów, które w dużej mierze bazują na procesach walcowniczych. Jeszcze do niedawna walcowanie kuźnicze wykorzystywano głównie do kształtowania prostych elementów, będących przedkawkami w dalszych procesach kucia matrycowego. Obecnie procesy walcowania znajdują zastosowanie zarówno do kształtowania różnego rodzaju półwyrobów, jak i gotowych wyrobów o dość złożonych kształtach. W trakcie walcowania dochodzi do zgniatania materiału przez obracające się walce. Taka kinematyka ruchu narzędzi jest bardzo efektywna i wiąże się z szeregiem zalet. Do najważniejszych można zaliczyć dużą wydajność, mniejsze zużycie energii i materiałów oraz znacznie mniejsze siły kształtowania. W rezultacie walcowanie jest najbardziej rozpowszechnionym sposobem obróbki plastycznej metali. Szacuje się, że obecnie tym sposobem jest przerabiane ponad 80% produkowanej stali i stopów metali nieżelaznych (licząc łącznie walcowanie hutnicze i kuźnicze).

Szerokie zastosowanie technologii walcowania sprawia, że procesy te ciągle są rozwijane i unowocześniane. Miedzy innymi w Politechnice Lubelskiej od przeszło dwudziestu lat prowadzone są prace badawcze nad procesami rotacyjnego kształtowania metali i ich stopów, które w dużej mierze bazują na technologiach walcowania kuźniczego. W tym okresie opracowano i wykonano również szereg prototypowych maszyn i urządzeń do walcowania wzdłużnego i poprzeczno-klinowego odkuwek, obciskania obrotowego, przepychania obrotowego. Jedną z innowacyjnych maszyn, która powstała w efekcie prowadzonych prac jest uniwersalna walcarka kuźnicza, przeznaczona do realizacji takich procesów jak: walcowanie poprzeczne, walcowanie wzdłużne oraz dzielenie bezodpadowe. Maszynę zainstalowano w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie i służy ona do realizacji innowacyjnych metod walcowania odkuwek oraz dzielenia bezodpadowego prętów. Obecnie na świecie praktycznie nie spotyka się tego typu walcarek, które charakteryzowałyby się tak szerokimi możliwościami technologicznymi.

W niniejszej pracy przedstawiono najważniejsze aspekty związane z procesami walcowania kuźniczego. Dokonano także przeglądu maszyn kuźniczych, zabezpieczających realizację procesów walcowania odkuwek. Opierając się na zgromadzonych informacjach zaproponowano nowatorskie rozwiązanie konstrukcyjne wielozadaniowej walcarki kuźniczej. Jej innowacyjność wynika z możliwości realizacji dwóch różnych kinematycznie procesów walcowania kuźniczego: wzdłużnego i poprzecznego, a także dzielenia bezodpadowego prętów. Wykonana weryfikacja doświadczalna opracowanej konstrukcji potwierdziła możliwości technologiczne maszyny. Ponadto szczegółowa analiza struktury wyrobów kształtowanych przez kuźnie wykazała, że na rynku istnieje zapotrzebowanie na maszyny uniwersalne, które w przypadku małych serii produkcyjnych są niezastąpione. Obecnie dostępne na rynku walcarki kuźnicze (głównie zagranicznych producentów) należą do maszyn specjalizowanych i charakteryzują się znacznie węższym zakresem możliwości technologicznych. Dodatkowo, są to urządzenia stosunkowo drogie, przez co ich eksploatacja staje się opłacalna dopiero w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej. Natomiast nieliczne walcarki kuźnicze znajdujące się na wyposażeniu polskich kuźni mają po kilkadziesiąt lat, a stopień ich wyeksploatowania często uniemożliwia ich przemysłowe zastosowanie. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom krajowej branży kuźniczej opracowano konstrukcję wielozadaniowej walcarki kuźniczej, która ze względu na dużą funkcjonalność i niskie koszty eksploatacji może być ciekawą alternatywą dla maszyn specjalizowanych.

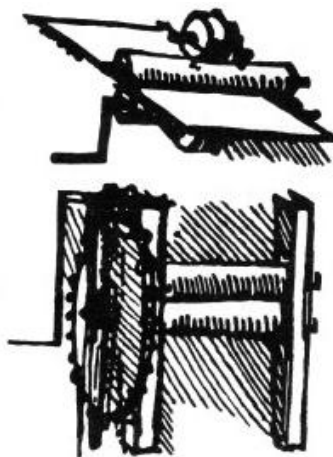
Na zakończenie autor chciałby złożyć wyrazy podziękowania osobom, które przyczyniły się do wykonania prac badawczych w zakresie walcowania kuźniczego i dzielenia bezodpadowego prętów w uniwersalnej walcierce kuźniczej. W szczególności wdzięczność należy się pracownikom Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, którzy czynnie uczestniczyli w badaniach i wspierali autora swoim bogatym doświadczeniem zawodowym. Osobne wyrazy wdzięczności kierowane są do recenzenta monografii – prof. dr hab. inż. Jana Kazaneckiego, którego cenne uwagi i spostrzeżenia wpłynęły na ostateczną postać opracowania.

*Autor*

# 1. Analiza stanu zagadnienia z zakresu walcowania kuźniczego

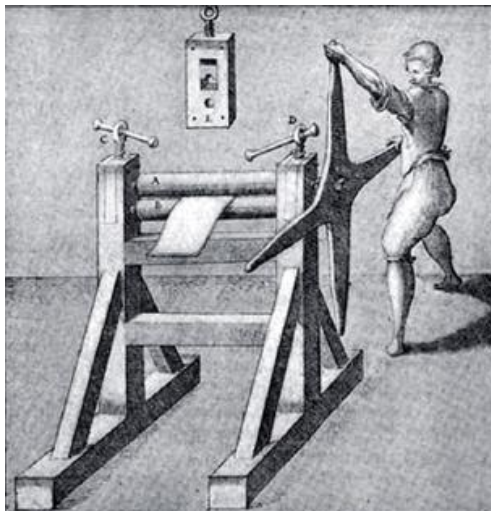
## 1.1. Przegląd konstrukcji walcarek kuźniczych

Historia walcownictwa jest bardzo długa i sięga okresu średniowiecza. Po raz pierwszy do wykonania blach użyto mechanicznych urządzeń w 1409 r. w Badenii (Niemcy). Były to napędzane ręcznie walcarki, których zadaniem było ostateczne wyrównanie grubości blachy oraz zwiększenie jej gładkości po ręcznym kuciu. Pierwszy udokumentowany projekt walcarki o napędzie ręcznym został wykonany w 1495 r. przez Leonarda da Vinci [46] (rys.1.1). Maszyny te był on również autorem wielu innych konstrukcji walcarek, do napędu których wykorzystał koło wodne. Maszyny te początkowo służyły jedynie do walcowania blach z metali miękkich, ale podobno już w 1420 r. zastosowano walcarkę do wykańczania blach żelaznych.



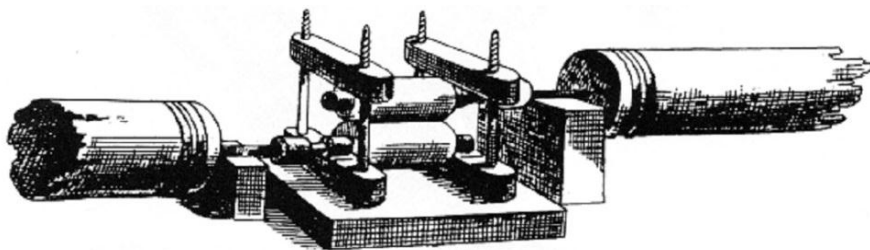
*Rys. 1.1. Opracowana przez Leonarda da Vinci koncepcja walcarki z gładkimi walcami [46]*

Bardziej zaawansowaną konstrukcję walcarki o napędzie ręcznym przedstawił w 1615 r. Salomon de Caus (rys. 1.2). Walcarka wyposażona była w dwa stojaki, w których łożyskowano walce robocze. Cechą charakterystyczną urządzenia była możliwość zmiany odległości osi górnego walca przy pomocy niezależnych mechanizmów śrubowych, umieszczonych w stojakach walcarki.



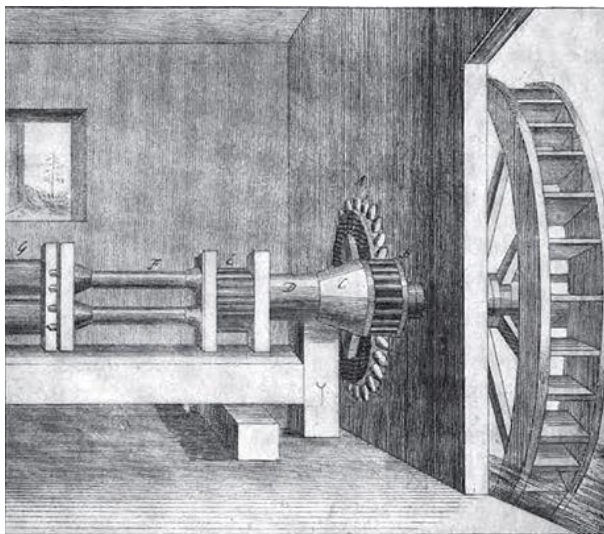
**Rys. 1.2.** *Walcarka według projektu Salomona de Caus z 1615 r. [187]*

Dynamiczny rozwój walcownictwa nastąpił w momencie wprowadzenia do napędu walcarek koła wodnego (rys. 1.3). Walcarki te były stosunkowo prymitywnymi maszynami, a z uwagi na realizację napędu walców przez dwa osobne koła, charakteryzowały się dość dużą różnicą w prędkościach obrotowych walców, co przekładało się na dużą niedokładnością walcowanych blach [123].



**Rys. 1.3.** *Walcarka do walcowania na gorąco blach stalowych, napędzana przez koła wodne, opracowana przez John Hanbury w 1697 r. [123]*

Późniejsze konstrukcje walcarek napędzanych kołami wodnymi wyposażone były w przekładnię rozdzielającą napęd na dwa wały, dzięki której uzyskiwano jednakowe prędkości obrotowe walców. O tego typu walcarkach pisze między innymi Emanuel Swedenborg w pracy „De Ferro” [147], wydanej w 1734 r. (rys. 1.4). Swedenborg podaje, że takie walcarki wykorzystywano w Szwecji, Anglii oraz Niemczech do walcowania na gorąco blach i płyt, które następnie cięto na pasy przy pomocy nożyc krążkowych, umieszczonych obok klatki walcowniczej. Następnie z tak ukształtowanych pasów zwijano obręcze.



**Rys. 1.4.** *Walcarka wzdłużna do walcowania blach i płyt, napędzana jednym kołem wodnym, 1734 r. [147]*

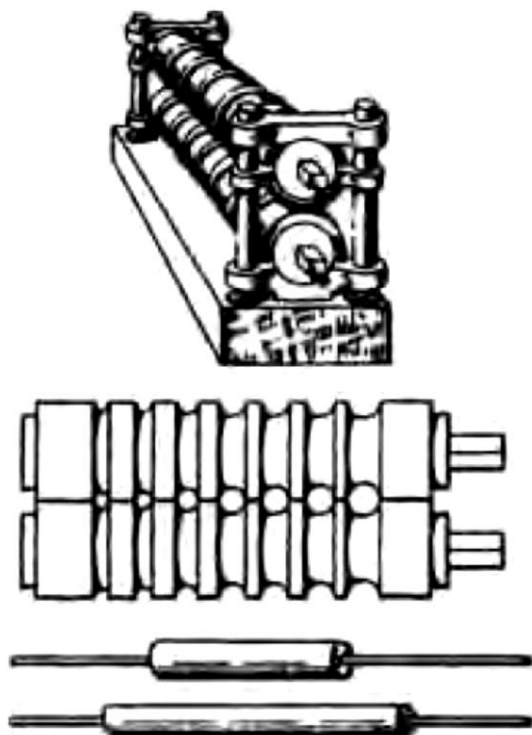
Zakłada się, że do 1728 r. procesy walcowania realizowane były wyłącznie w walcach gładkich. Protoplastą walcowania bruzdowego był John Payne (Anglia), który w 1728 r. opatentował walce do walcowania prętów okrągłych z wsadu kutego (rys. 1.5) [43, 123, 146]. Od tego czasu zaczęto powszechnie wykorzystywać walcarki do wytwarzania kształtowników na skalę przemysłową.

W tym samym czasie opracowano konstrukcję pierwszej walcarki, która była w stanie walcować blachę stalową bezpośrednio z materiału otrzymywanego z pieców hutniczych. Autorem rozwiązania był Anglik J. Hanbury.

Kolejnym etapem w rozwoju walcownictwa było pojawienie się silników parowych, które powszechnie zaczęto wykorzystywać do napędu walcarek. Od tego czasu rozpoczął się okres dynamicznego rozwoju technologii procesów walcowniczych.

Cechą charakterystyczną wyrobów walcowanych do połowy XIX wieku była niezmienna kształt przekroju poprzecznego [123]. Wynikało to z konstrukcji narzędzi, które miały kształt cylindrycznych walców (gładkich lub bruzdowych), możliwych do wykonania na ówczesnych obrabiarkach. Dopiero pod koniec XIX wieku zaczęto szerzej wykorzystywać procesy walcowania kuźniczego (wzdłużnego i poprzecznego), które pozwalały na kształtowanie elementów o zmiennym przekroju. Jednak intensywny rozwój technologii walcowania kuźniczego przypada dopiero na pierwszą połowę XX wieku. W tym okresie opracowano szereg metod przemysłowego zastosowania procesów walcowania kuźniczego, począwszy od przedkuwek po gotowe odkuwki [2, 181]. Głównym motorem napędowym rozwoju walcownictwa kuźniczego w tym okresie był wzrost zapotrzebowania na odkuwki dla przemysłu zbrojeniowego

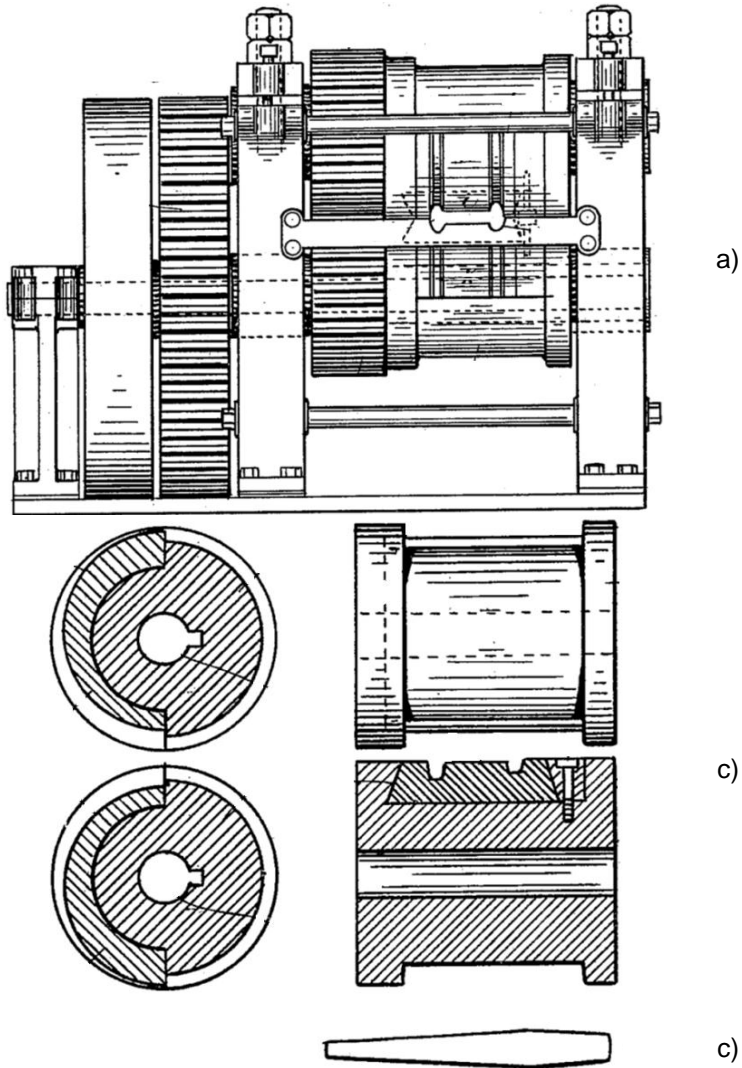
i motoryzacyjnego [53, 185]. Opracowane w tym czasie technologie walcowania kuźniczego są do dziś wykorzystywane i rozwijane na całym świecie.



*Rys. 1.5. Walce zaprojektowane przez Johna Payne do produkcji prętów okrągłych, 1728 r. [123, 43]*

### 1.1.1. Walcarki kuźnicze wzdłużne

Wzdłużne walcarki kuźnicze stanowią obecnie najliczniejszą grupę walcarek, przeznaczonych głównie do kształtowania przedkuwek, a często również odkuwek. Pierwsze znane konstrukcje walcarek kuźniczych do walcowania wzdłużnego odkuwek pochodzą z końca XIX wieku. Przykładem może być walcarka opatentowana przez John'a R. Blakeslee'a w 1900 r. (rys. 1.6), która przeznaczona była do walcowania prętów kształtowych o zmiennym przekroju. Maszyna wyposażona była w sztywną klatkę walcowniczą, w której osadzono walce robocze. Walce sprzężone były ze sobą wewnątrz klatki przy pomocy kół zębatych, dzięki czemu zachowano jednakowe prędkości obrotowe narzędzi. Napęd pochodził od przekładni pasowej, która za pośrednictwem koła zamachowego i przekładni zębatej napędzała wały główne walcarki. W walcierce po raz pierwszy zastosowano wymienne segmenty narzędziowe, które mocowane były na walcach maszyny.



**Rys. 1.6.** Walcarka kuźnicza z 1900 r. wg patentu John R. Blakeslee'a: a) schemat walcarki, b) schemat narzędzi, c) walcowany element [24]

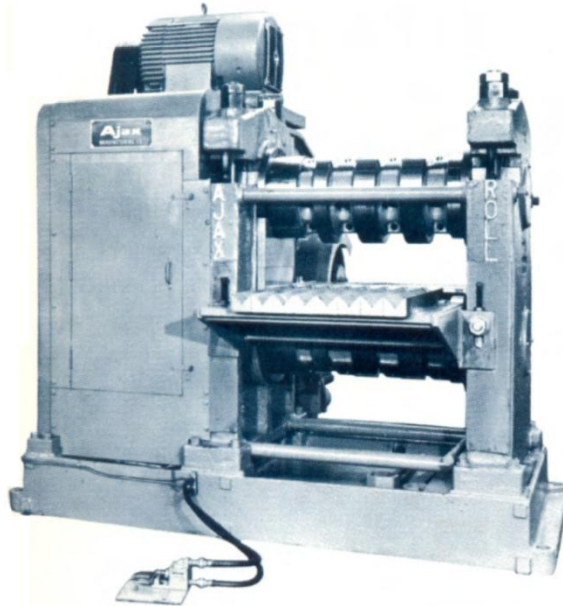
Walcarki kuźnicze przypominają swoją budową i zasadą działania walcarki hutnicze duo. Głównym kryterium klasyfikacji walcarek kuźniczych jest sposób podparcia walców roboczych oraz ich cechy technologiczne [8].

Do podstawowych rodzajów walcarek kuźniczych można zaliczyć między innymi:

- walcarki ramowe,
- walcarki konsolowe,
- walcarki ramowo-konsolowe,
- specjalne automaty walcownicze.



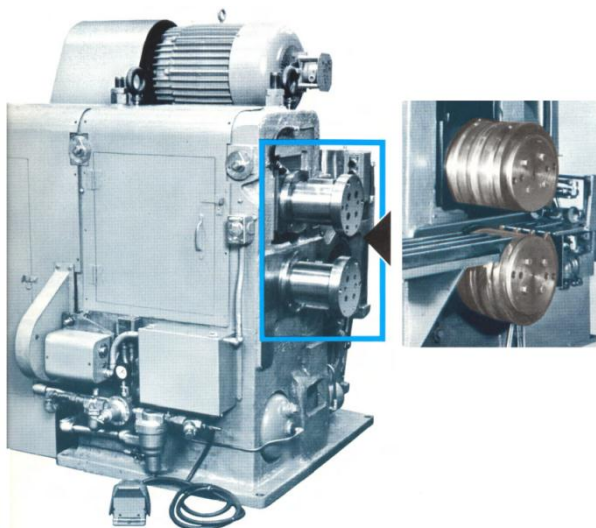
Walcarki ramowe charakteryzują się zwartą konstrukcją, w której walce robocze łożyskowane są dwustronnie w korpusie maszyny (rys. 1.7). Szttywna konstrukcja walcarek ramowych pozwala na uzyskiwanie wyrobów o wyższej dokładności niż w przypadku walcarek konsolowych. Natomiast dwustronne podparcie wałów pozwala na wydłużenie wałów roboczych dzięki czemu zwiększa się liczba wykrojów, w których można kształtować odkuwki. Regulacja rozstawu osi walców roboczych jest zazwyczaj realizowana poprzez zmianę położenia jednego z walców.



**Rys. 1.7.** *Walcarka kuźnicza, ramowa firmy AJAX [146]*

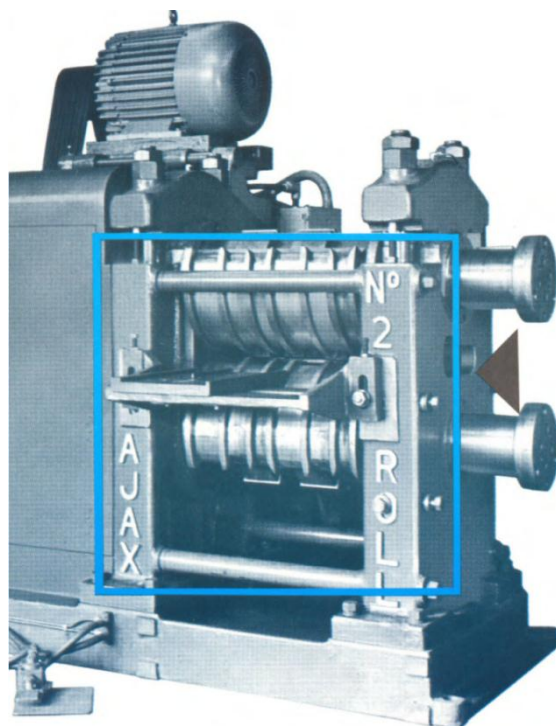
Walcarki konsolowe charakteryzują się jednostronnym łożyskowaniem walców roboczych (rys. 1.8). Narzędzia umieszcza się na wysięgowych czopach walców, znajdujących się z boku walcarki. Regulacja rozstawu osi walców w tych walcarkach realizowana jest zazwyczaj przy użyciu tulei mimośrodowej, w której łożyskowany jest jeden z walców. Z uwagi na mniejszą sztywność, średnica segmentów roboczych jest znacznie mniejsza niż w walcarkach ramowych i wynosi od 200 mm do 500 mm. Dodatkowo wartość jednorazowych gniotów przyjmowanych podczas walcowania jest mniejsza w stosunku do walcarek dwustojakowych. Zaletą walcarek kuźniczych konsolowych jest łatwy dostęp do przestrzeni roboczej oraz znacznie łatwiejszy i szybszy sposób wymiany narzędzi.

Można spotkać również rozwiązania konstrukcyjne walcarek, w których wysięgowe czopy są dodatkowo spięte specjalną obejmą, zwiększającą sztywność walców [166].



**Rys. 1.8.** Walcarka kuźnicza z konsolowo położonymi walcami firmy AJAX [146]

Walcarki ramowo-konsolowe (rys. 1.9) są maszynami najbardziej rozpowszechnionymi w kuźniach matrycowych. Posiadają one walce robocze zarówno w układzie ramowym, jak i konsolowym.

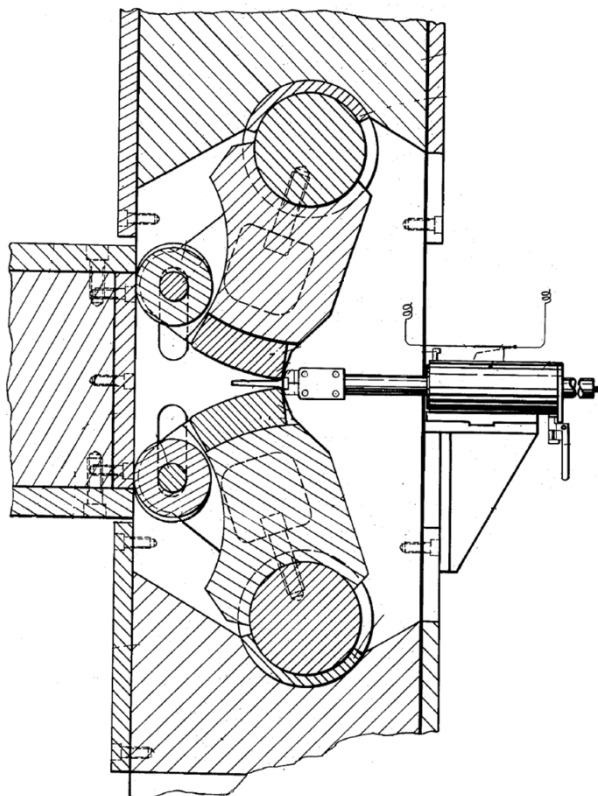


**Rys. 1.9.** Walcarka kuźnicza, ramowo-konsolowa firmy AJAX [146]

Walcarki tego typu łączą w sobie cechy i zalety walcarek ramowych i konsolowych. Wykorzystywane są do walcowania przedkuwek oraz odkuwek. Charakteryzują się większymi prędkościami obrotowymi walców w stosunku do walcarek ramowych lub konsolowych.

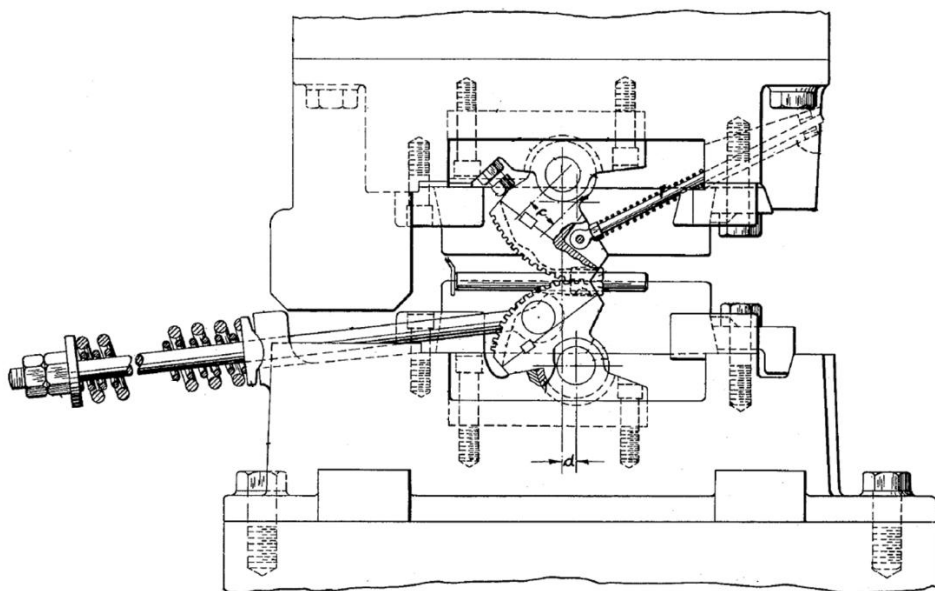
Do maszyn o specjalnej konstrukcji zalicza się automaty walcownicze, przystosowane do kształtowania odkuwek i przedkuwek. Cechą charakterystyczną tego typu maszyn jest wydzielenie poszczególnych wykrojów w niezależne klatki walcownicze. Spotyka się tutaj automaty, zawierające od dwóch do dziewięciu klatek walcowniczych (wykrojów).

Były podejmowane również próby realizacji procesów walcowania kuźniczego w specjalnych przyrządach, montowanych na prasach [23]. Między innymi takie rozwiązanie zastosowano do walcowania przedkuwek łopatek turbin ze stopów tytanu (rys. 1.10). Przedkuwka kształtowana była z pręta podczas ruchu suwaka prasy do dołu. Podawanie półfabrykatu do przestrzeni roboczej urządzenia odbywało się mechanicznie. Następnie odwalcowany półfabrykat, przenoszony był do wykroju matrycującego, gdzie kuto odkuwkę łopatki turbiny.



**Rys. 1.10.** Przyrząd kuźniczy do walcowania przedkuwek łopatek turbin, współpracujący z prasą ciągową [57]

Nieco inne rozwiązanie zastosowano w przyrządzie do walcowania przedkuwek wałka rozrządu (rys. 1.11). Segmenty walcownicze zostały sprzężone ze sobą wycinkami kół zębatych, których osie obrotu położone są mimośrodkowo względem osi wieńców zębatych. W rezultacie podczas ruchu suwaka prasy do dołu nadają one obrót segmentom. W czasie ruchu powrotnego suwaka następuje obrót segmentów do położenia wyjściowego w wyniku działania sprężyn [23].

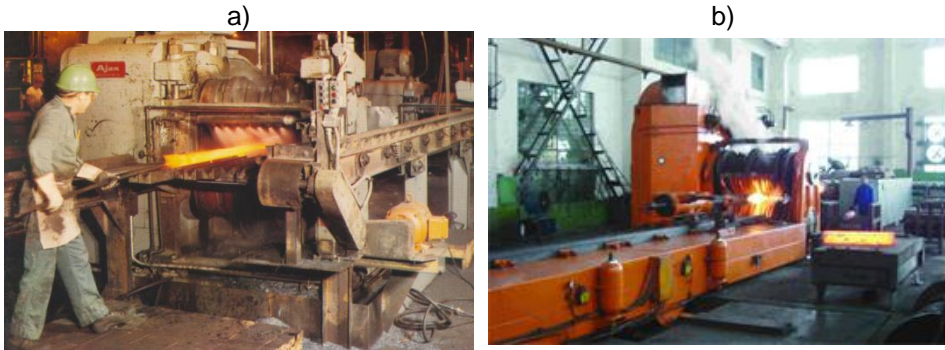


**Rys. 1.11.** Przyrząd kuźniczy do walcowania przedkuwek wałka rozrządu na prasie MAXI [23]

Pomimo znacznie mniejszych kosztów oprzyrządowania w stosunku do ceny walcarek kuźniczych, walcowanie przedkuwek i odkuwek w przyrządach kuźniczych montowanych na prasach nie znalazło szerszego zastosowania ze względu na stosunkowo małą efektywność procesu.

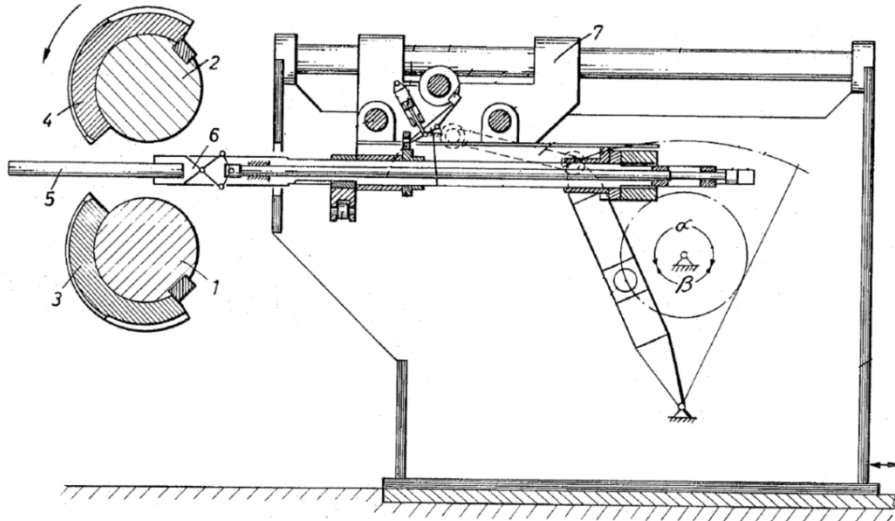
Za kolejne kryterium klasyfikacji wzdłużnych walcarek kuźniczych można przyjąć sposób podawania prętów do przestrzeni roboczej. W starszych konstrukcjach walcarek wsad podawany jest do wykrojów ręcznie, za pomocą kleszczy i przez cały czas trwania procesu materiał jest utrzymywany przez kowala (rys. 1.12a). W nowszych rozwiązaniach do podawania i pozycjonowania wsadu wykorzystywane są manipulatory (1.12b).

Napęd manipulatorów może pochodzić od walcarki, wtedy jest zsynchronizowany z ruchem walców przy pomocy układów mechanicznych i elektrycznych. Również często wykorzystuje się manipulatory z niezależnym napędem, realizowanym przy pomocy serwonapędów sterowanych mikroprocesorem.



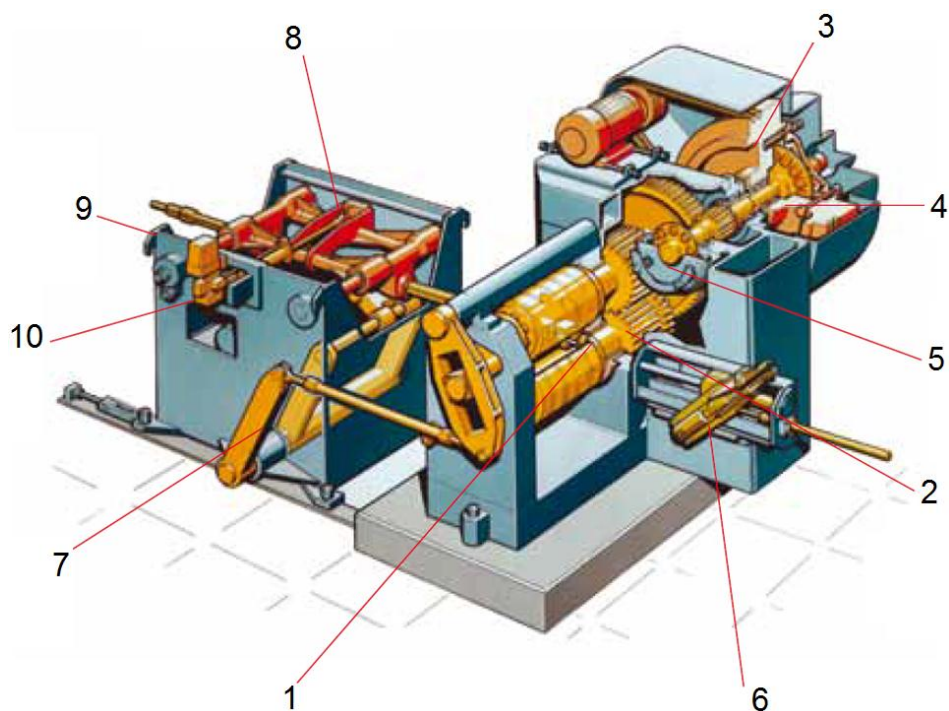
**Rys. 1.12.** Metody podawania wsadu do walcarki kuźniczej: a) ręcznie, b) przy pomocy manipulatora [146, 181]

Po raz pierwszy manipulatory zostały wykorzystane w walcarkach produkowanych przez firmę Eumuco w 1967 r. [3, 53]. Były to urządzenia o napędzie pneumatyczno-mechanicznym i służyły do podawania materiału do wykrojów, a następnie przenoszenia jego między wykrojami (rys. 1.13). Sterowanie pracą manipulatora odbywało się przy pomocy impulsów pochodzących z przełączników krańcowych, umieszczonych w zderzakach walcarki. Dzięki wyposażeniu walcarek w manipulatory, mogły one pracować w układzie automatycznym lub półautomatycznym. Pozwoliło to na zwiększenie prędkości walcowania i realizację procesu walcowania, a następnie kucia odkuwek z jednego nagrzewu.



**Rys. 1.13.** Schemat manipulatora zastosowanego w walcarni ARWS firmy Eumuco [3]:  
1, 2 – wały walcarki, 3, 4 – segmenty narzędziowe, 5 – wsad, 6 – chwytak,  
7 – manipulator

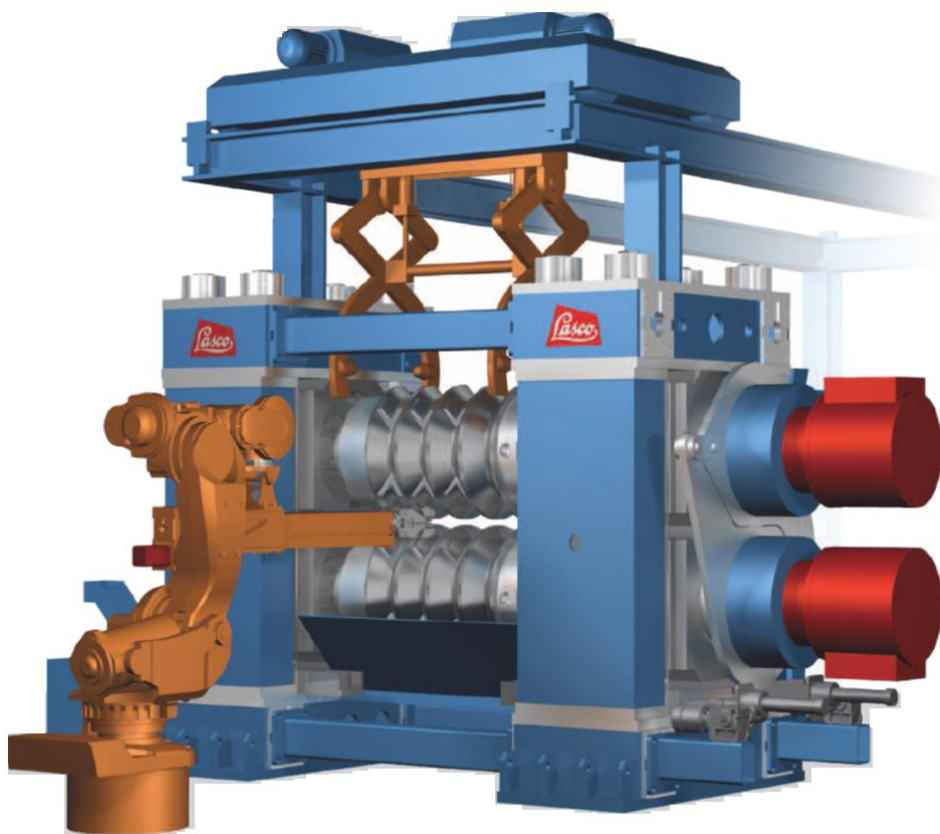
Obecnie budowane walcarki kuźnicze są już w większości wyposażone w urządzenia automatyzujące pracę maszyny. Ze względu na sposób automatyzacji można wyróżnić dwie grupy maszyn: walcarki, które mogą pracować w sposób manualny, zaś automatyzacja maszyny polega na dostawieniu dodatkowego ramienia z manipulatorem, sterowanym numerycznie (robota) oraz automatyczne walcarki kuźnicze, w których manipulator stanowi integralny zespół maszyny. Między innymi walcarki typu ARWS oferowane przez firmę SMS MEER zaliczane są do maszyn automatycznych (rys. 1.14). Klatka walcownicza związana jest mechanicznie z manipulatorem, przy pomocy układu dźwigniowego. Napęd wzdłużnego przesuwu ramienia manipulatora oraz ruchu obrotowego pochodzi od walca górnego, natomiast napęd poprzeczny (przesuwu między wykrojami) realizowany jest przy pomocy serwonapędu.



**Rys. 1.14.** Schemat automatycznej walcarki kuźniczej ARWS [185]: 1 – tuleja mimośrodowa regulacji dolnego walca, 2 – napęd walców wraz z układem automatycznej regulacji, 3 – koło zamachowe, 4 – sprzęgło cierne, 5 – hamulec, 6 – podajnik, 7 – ramię napędu manipulatora, 8 – ramię przesuwu poprzecznego, 9 – kompensator wydłużenia, 10 – serwonapęd ramienia

Najszerszą grupą obecnie produkowanych walcarek kuźniczych są maszyny, w których walcarka i manipulator stanowią dwa niezależne zespoły, powiązane ze sobą jedynie za pomocą sterownika z mikroprocesorem. Przykładem mogą być walcarki kuźnicze typu RCW oferowane przez firmę Lasco. Walcarka tego

typu ma konstrukcję ramową (rys. 1.15) i zbudowana jest z dwustojakowego korpusu, wstępnie sprężonego, w którym łożyskowane są wały wraz z narzędziami. Walce robocze napędzane są przez dwa niezależnie, wzajemnie zsynchronizowane układy napędowe, znajdujące się na czopach wyciągowych wałów. Takie rozwiązanie napędu pozwoliło na wyeliminowanie układów sprzęgłowo-hamulcowych oraz na wprowadzenie bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej walców. Nad walcarką umieszczono przesuwny manipulator z chwytakami, który ułatwia wymianę narzędzi. Z walcarką współpracuje sterowany numerycznie manipulator, który jest zsynchronizowany z obrotem walców. Dane techniczne wybranych modeli walcerek kuźniczych produkowanych przez firmę Lasco zestawiono w tabeli 1.1.

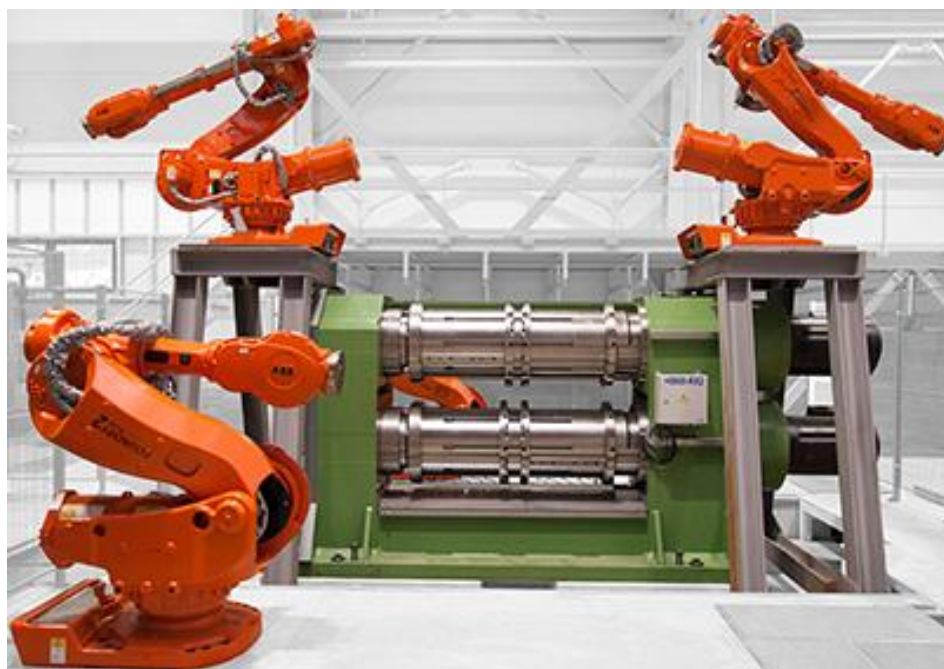


**Rys. 1.15.** Walcarka kuźnicza RCW firmy Lasco wraz z manipulatorem [139]

**Tab. 1.1.** Podstawowe dane techniczne walcarek kuźniczych serii RCW firmy Lasco [139]

Seria RCW / wielkość		460	560	930
Średnica walców	mm	460	560	930
Długość robocza walców	mm	560	700	1120
Średnica wsadu max.	mm	63	80	125
Długość wsadu max.	mm	315	400	630
Udźwig chwytaków narzędzi	kg	1200	2200	8000
Zakres regulacji walców	mm	20	25	30
Moc zainstalowanych silników	kW	125	200	500
Długość walcarki	mm	3800	4800	7500
Wysokość walcarki	mm	1800	2300	3500
Szerokość walcarki	mm	1200	1500	2400
Masa walcarki	kg	15000	25000	100000

Ciekawe rozwiązanie walcarek kuźniczych oferuje firma Smeral (rys. 1.16). Są to walcarki ramowe w układzie podwójnym, dedykowane do walcowania odkuwek i przedkuwek ze stopów aluminium.



**Rys. 1.16.** Walcarka kuźnicza KV 120R/AL firmy Smeral [184]



Do walcowania odkuwek stalowych producent proponuje układ pojedynczy tego typu walcarek. Konstrukcja walcarek umożliwia jednoczesny montaż na wałach maszyny dwóch różnych zestawów narzędziowych. Podobnie jak w rozwiązaniu Lasco, walce napędzane są przez dwa niezależne układy napędowe, umieszczone na wysięgowych czopach wałów. Wsad podawany jest do przestrzeni roboczej przy pomocy sterowanych numerycznie manipulatorów. Główne parametry techniczne walcarek kuźniczych firmy Smeral zestawiono w tabeli 1.2.

**Tab. 1.2.** Podstawowe dane techniczne walcarek kuźniczych KV firmy Smeral [184]

Model walcarki		KV 70	KV120
Średnica wałców	mm	540	840
Średnica walcowanego materiału	mm	70	120
Długość narzędzi	mm	450	2x700
Długość walcowanego materiału	mm	400	1000
Długość odkuwki	mm	700	1200
Zakres regulacji osi walca	mm	20	20
Liczba obrotów	obr/min	65	58
Wymiary walcarki W x H x D	m	3,8x0,9x1,9	5,6x1,5x2,3

Na rynku dostępne są również walcarki ramowo-konsolowe w wersji manualnej (podawanie wsadu odbywa się ręcznie). Przykładem może być maszyna serii DL Carl.La.C firmy Lazar Sales (Stany Zjednoczone) (rys. 1.17). Walcarka składa się z podstawy, na której umieszczona jest klatka walcownicza oraz zespół napędowy. Klatka robocza zbudowana jest z dwóch odlewanych stojaków, w których łożyskowane są wały główne. Segmenty narzędziowe mogą być montowane w centralnej części wałów (wewnątrz klatki) oraz na wysięgowych czopach, poza stojakiem. Zespół napędowy stanowi przekładnia zębata, napędzana silnikiem elektrycznym. Przeniesienie napędu z przekładni na wały walcarki odbywa się za pośrednictwem łączników przegubowych. Walcarka wyposażona jest w układ rolkowy, który umożliwia jej transport w halach produkcyjnych i instalowanie przy różnych maszynach kuźniczych. Główne parametry techniczne walcarek serii DL zestawiono w tabeli 1.3.



**Rys. 1.17.** Walcarka kuźnicza model DL Carl.La.C [182]

**Tab. 1.3.** Podstawowe dane techniczne walcarek kuźniczych serii DL [182]

Model		DL-200	DL-260	DL-350	DL-460	DL-600
Średnica osadzenia narzędzi	mm	100	180	240	300	360
Średnica walców	mm	200	268	360	460	600
Szerokość strefy roboczej	mm	250	300/400	500/700	700/1000	800/1200
Długość walcowania	mm	300	420	555	710	900
Przekrój wasdu	mm	20x20	40x40	65x65	90x90	120x120
Zakres regulacji osi walców	mm	20	20	25	30	40
Moc silnika napędowego	kW	10	20	50	75	100
Masa walcarki	kg	1500	3500	8000	14000	24000

Walcarki tego typu charakteryzują się dużą uniwersalnością i są przeznaczone głównie do walcowania szerokiej grupy drobnych odkuwek i przedkuwek (rys. 1.18).



### Walcarki poprzeczno-klinowe o obrotowym ruchu narzędzi

Walcarki o obrotowym ruchu narzędzi są obecnie najczęściej wykorzystywanymi maszynami do realizacji procesu walcowania poprzeczno-klinowego. Charakteryzują się one szeregiem zalet, wśród których najważniejsze to: duża dokładność walcowania, możliwość walcowania wyrobów z pręta, duża trwałość narzędzi oraz możliwość ich wielokrotnej regeneracji. Podstawowymi mankamentami eksploatacyjnymi tych walcarek jest konieczność prowadzenia walcowanego materiału między walcami oraz trudności związane z wykonawstwem narzędzi. Obecnie produkowane walcarki poprzeczno-klinowe mają zbliżoną do siebie konstrukcję, co wynika ze specyfiki procesu. Pierwsze maszyny przemysłowe tego typu zostały opracowane w dawnej Czechosłowacji w latach 50. XX wieku. Ich przeznaczeniem było walcowanie odkuwek wałków na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego [181]. Późniejsze rozwiązania z lat 60. (typy walcarek dwuwalcowych, oznaczonych w zależności od ich wielkości symbolami UI-35, UI-60 i UI-100) [34], były już powszechnie wykorzystywane w kuźniach całego świata. Obecnie czeskie zakłady Šmeral z Brna są wiodącym producentem walcarek poprzeczno-klinowych. Oferują pięć typów walcarek o oznaczeniu ULS, różniących się parametrami technicznymi i konstrukcją. Dane techniczne walcarek poprzeczno-klinowych, produkowanych przez zakłady Šmeral zestawiono w tabeli 1.4. Natomiast na rysunku 1.19 pokazano przykładową walcarkę ULS 100 RA.

**Tab. 1.4.** Wybrane parametry techniczne produkowanych obecnie w zakładach Šmeral (Czechy) dwuwalcowych walcarek poprzeczno-klinowych typu ULS [185]

Typ walcarki		ULS 70	ULS 70 RA	ULS 100 RA	ULS 100 RA/AL	ULS 160 RA
Średnica wsadu	mm	35-80	40-70	40-100	40-100	50-160
Maksymalna długość wsadu	mm	300	300	500	500	500
Maksymalna długość odkuwek	mm	550	550	900	900	800
Średnica walców	mm	700	700	1000	1000	1000
Długość walców	mm	600	700	1000	1000	800
Liczba obrotów walców	obr/min	13,6	5-13	5-10	5-10	5-10
Czas cyklu roboczego	s	6,5	6,5	7,5	7,5	9
Moc silników napędowych	kW	93	102	240	240	268
Wymiary walcarki HxWxD	m	3,3x3,9x2,1	3,3x3,9x2,1	4,1x4,4x2,5	3,1x4,9x5,3	4,4x5,1x3,4

Walcarki tego typu charakteryzuje zwarta budowa oraz sztywna klatka walcownicza. Do napędu walców wykorzystuje się specjalnej konstrukcji silniki, które umieszczone są na wysięgowych czopach wałów napędowych. Ponadto nad przestrzenią roboczą klatki walcowniczej umieszczone są belki

wspornikowe, po których może przemieszczać się układ jezdny wciągarki, wykorzystywanej podczas wymiany narzędzi.



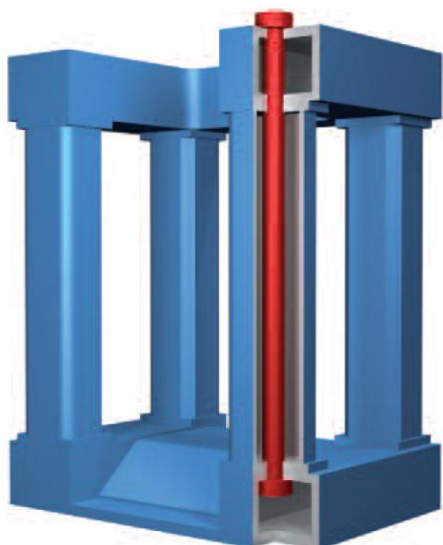
**Rys. 1.19.** *Walcarka poprzeczno-klinowa firmy Šmeral typu ULS 100 RA [185]*

Ostatnio również niemiecka firma Lasco oferuje walcarki poprzeczno-klinowe serii QKW, charakteryzujące się zaawansowaną konstrukcją. Przykładową walcarkę poprzeczno-klinową firmy Lasco, model QKW 700 pokazano na rys. 1.20. Maszyna wyposażona jest w szereg innowacyjnych rozwiązań, które zwiększają jej możliwości technologiczne i poprawiają bezpieczeństwo pracy.

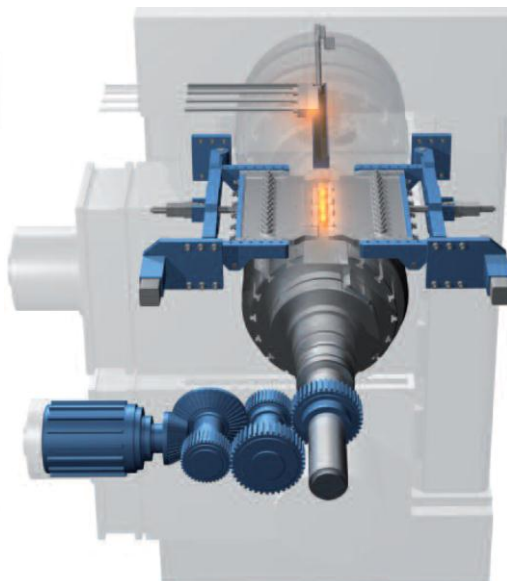


**Rys. 1.20.** Walcarka poprzeczno-klinowa firmy Lasco model QKW 700 [140]

Dwustojakowa klatka robocza wykonana jest jako cienkościenna konstrukcja spawana, a wymagana sztywność korpusu utrzymana jest dzięki wstępnemu sprężeniu przy pomocy stalowych ściągaczy (rys. 1.21).

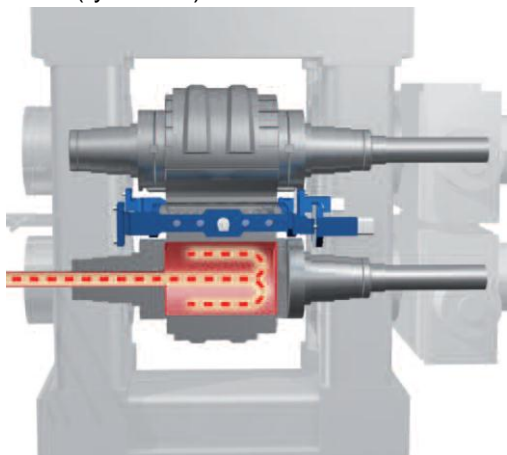


**Rys. 1.21.** Korpus klatki walcowniczej walcarki poprzeczno-klinowej QKW 700 [140]



**Rys. 1.22.** Napęd walców walcarki poprzeczno-klinowej QKW 700 [140]

Wewnątrz stojaków klatki umieszczone są korpusy łożysk, w których osadzone są wały robocze. Napęd walców realizowany jest za pośrednictwem dwóch niezależnych układów napędowych, składających się z silnika elektrycznego i przekładni zębatej (rys. 1.22). Walcarka została wyposażona w układ regulacji temperatury narzędzi (rys. 1.23), który podczas rozruchu maszyny podgrzewa segmenty narzędziowe, zaś podczas długotrwałej pracy odprowadza nadmiar ciepła z narzędzi i wałów. Ciekawym rozwiązaniem jest system mocowania narzędzi, który umożliwia wymianę narzędzi w ciągu kilku minut (rys. 1.24).



**Rys. 1.23.** Sposób regulacji temperatury w walcierce poprzeczno-klinowej QKW 700 [140]



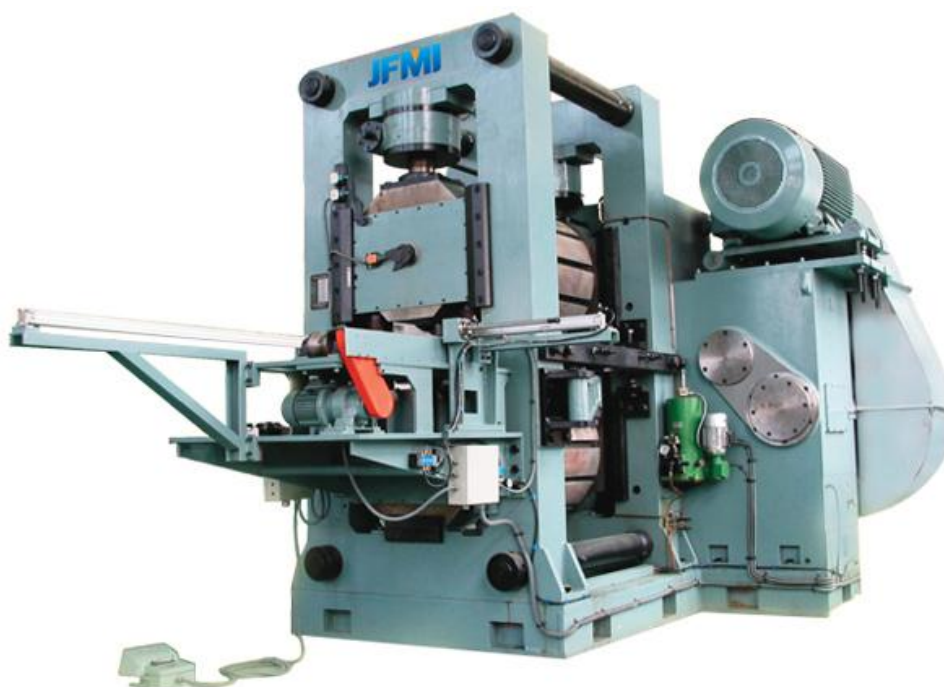
**Rys. 1.24.** Sposób mocowania narzędzi w walcierce poprzeczno-klinowej QKW 700 [140]

W tym celu zastosowano hydrauliczne siłowniki, umieszczone w czopach wałów roboczych, które powodują zaciśnięcie osiowe walców między dwiema tarczami z krzyżowymi występami. Hydrauliczne mocowanie pełni również rolę kompensatora zmian długości walców podczas ich nagrzewania i chłodzenia. Podstawowe parametry walcarek poprzeczno-klinowych serii QKW firmy Lasco zestawiono w tabeli 1.5.

Na rynku można spotkać również walcarki poprzeczno-klinowe produkcji azjatyckiej (Chiny, Indie). Konstrukcja tych maszyn jest nieco inna, aniżeli europejskich producentów. Przykładem może być walcarka produkowana w zakładach Jinan Foundry and Metalforming Machinery Research Institute Co., Ltd (JFMI), (rys. 1.25). Cechą charakterystyczną jest płytowy korpus klatki walcowniczej, w którym osadzono korpusy łożysk walców głównych. Walce napędzane są przez zintegrowany układ napędowy, składający się z silnika elektrycznego i przekładni zębatej. Dodatkowo układ napędowy wyposażony został w zespół sprzęgłowo-hamulcowy, umożliwiający cykliczny ruch obrotowy walców. Wybrane parametry techniczne walcarek JFMI przedstawiono w tabeli 1.6.

**Tab. 1.5.** Podstawowe dane techniczne walcarek poprzeczno-klinowych serii QKW firmy Lasko [140]

Model walcarki QKW		500	700	1000
Średnica walców	mm	500	700	1000
Długość walców	mm	500	700	1000
Średnica wsadu	mm	50	70	110
Długość wsadu	mm	300	400	560
Zakres regulacji położenia walców	mm	40	60	80
Moc zainstalowanych silników	kW	22	55	90
Długość walcarki	m	3,0	5,0	6,2
Wysokość walcarki	m	2,0	3,3	4,7
Szerokość walcarki	m	1,5	2,4	3,6
Masa walcarki	kg	15000	25000	50000



**Rys. 1.25.** Walcarka poprzeczno-klinowa JFMI produkcji chińskiej [189]



**Tab. 1.6.** Podstawowe dane techniczne walcarek poprzeczno-klinowych JFMI, w zależności od wielkości maszyny [189]

Parametr	Wielkość walcarki								
	mm	315	400	500	630	800	1000	1250	1500
Odległość między walcami	mm	315	400	500	630	800	1000	1250	1500
Średnica walca	mm	250	320	400	500	630	780	980	1150
Długość walca	mm	250	300	400	500	650	800	1100	1300
Maksymalna średnica wsadu	mm	15	25	35	50	80	100	120	160
Zakres regulacji rozstawu osi	mm	± 8	± 10	± 12	± 15	± 20	± 25	± 30	± 35
Prędkość obrotowa walców	obr/min	12÷16	12÷16	10÷14	10÷14	8÷12	6÷10	6	6
Zakres regulacji kątowej walców	-	± 3°							
Moc silnika napędowego	kW	15	22	30	45	75	110	160	200

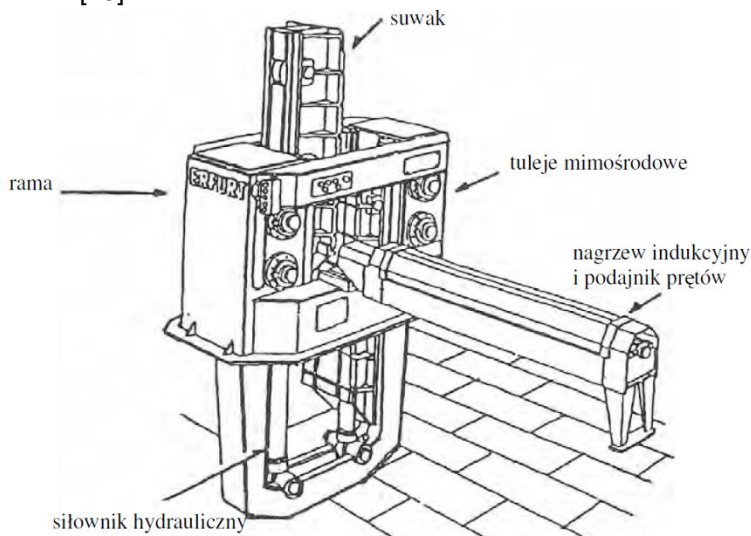
### Walcarki płaskoklinowe

Pomimo powszechnego wykorzystania walcarek poprzecznych o obrotowym ruchu narzędzi, w przemyśle znalazły również zastosowanie walcarki płaskoklinowe. Maszyny tego typu charakteryzują się szeregiem zalet, do których można zaliczyć między innymi prostą konstrukcję narzędzi, wyeliminowanie prowadnic utrzymujących półfabrykat w przestrzeni roboczej walcarki oraz możliwość wielokrotnej regeneracji narzędzi. Natomiast do głównych wad można zaliczyć przede wszystkim występowanie ruchu jałowego narzędzi, który zajmuje nawet 40% czasu całego cyklu roboczego oraz znacznie większe wymiary gabarytowe maszyny.

Pierwsze przemysłowe walcarki płaskoklinowe pochodzą z lat 60. ubiegłego wieku [38]. Produkowane były przez zakłady Erfurt i charakteryzowały się pionowym kierunkiem ruchu suwaka (rys. 1.26). Zbudowane były z korpusu o konstrukcji spawanej, wewnątrz którego przemieszczały się po rolkach dwa suwaki. Napęd suwaków realizowany był przy pomocy dwóch siłowników hydraulicznych, które znajdowały się poniżej poziomu podłogi hali produkcyjnej. W kolejnych latach konstrukcje walcarek tego typu były rozwijane i na ich bazie opracowano szereg nowych modeli, które charakteryzowały się dużymi prędkościami roboczymi suwaków (do 1 m/s).

Również w byłym Związku Radzieckim od 1970 r. budowane były przemysłowe walcarki płaskoklinowe. Radzieckie konstrukcje walcarek płaskoklinowych wyposażone były tylko w jeden ruchomy segment

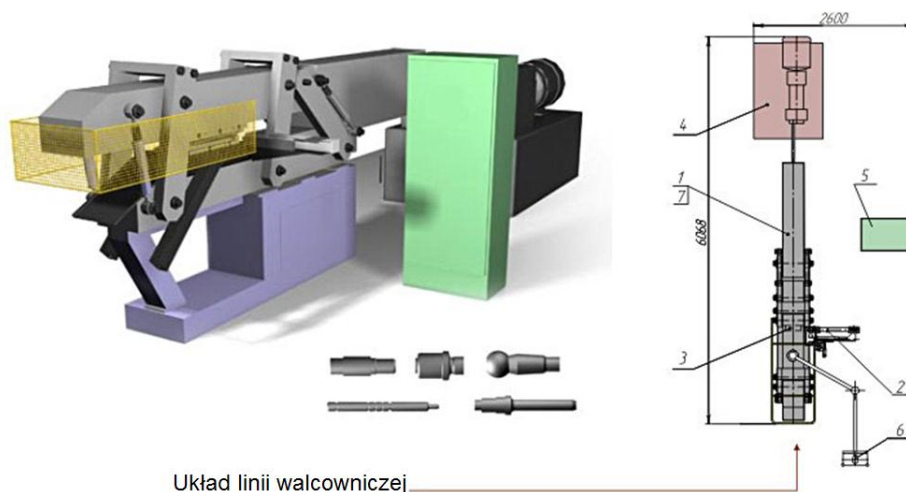
narzędziowy [144]. W sumie w byłym Związku Radzieckim opracowano i wdrożono do początku lat 80. aż osiem typów walcarek, oznaczonych symbolami PM [40].



**Rys. 1.26.** Walcarka płaskoklinowa UWQ 40x400 [72]

Po rozpadzie Związku Radzieckiego, kontynuowano rozwój i budowę walcarek płaskoklinowych w zakładach Beltehnologia & M, gdzie do dziś są one produkowane pod oznaczeniem SP. Walcarki tego typu, dzięki zastosowaniu płytowych korpusów charakteryzują się dużą sztywnością. Klatka walcownicza ma konstrukcję odkrytą, co ułatwia chłodzenie suwaka i narzędzi podczas pracy. Suwaki walcarek prowadzone są w prowadnicach smarowanych gazowo, co zmniejsza opory ruchu i sprzyja chłodzeniu zespołów narzędziowych. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne walcarki SP1250-1 pokazano na rys. 1.27. Walcarki mogą być produkowane w dwóch wersjach: z ruchomym jednym suwakiem, lub z dwoma suwakami przemieszczającymi się w przeciwnych kierunkach.

Obecnie walcarki płaskoklinowe produkowane są również przez białoruską firmę AMT Inżyniring, która oferuje dwanaście modeli walcarek serii WRL, zdolnych walcować odkuwki o średnicach od 7 mm do 200 mm i długościach dochodzących do 1200 mm [29]. Płaskoklinowe walcarki serii WRL wyposażone są w ruchomy suwak górny, który przemieszcza się na rolkowym układzie jezdnym. Napęd suwaka pochodzi od siłownika hydraulicznego. W czasie pracy walcarki, wszystkie elementy maszyny, stykające się z gorącym materiałem są intensywnie chłodzone wodą. Przykładową walcarkę płaskoklinową WRL 4012, produkowaną przez zakłady AMT Inżyniring pokazano na rys. 1.28.



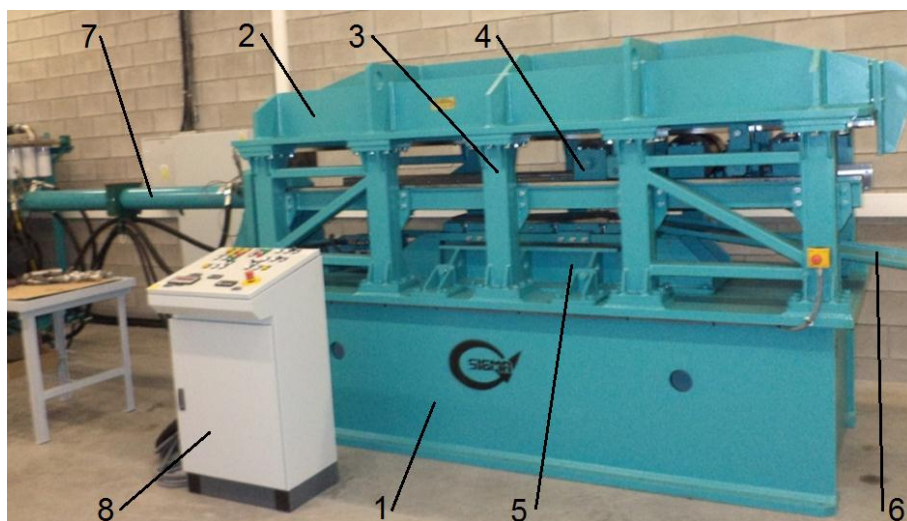
**Rys. 1.27.** Walcarka płaskoklinowa SP-1250-1, produkowana przez zakłady Beltechnologia & M [181]: 1 – walcarka płaskoklinowa, 2 – mechanizm podawania wsadu, 3 – napęd pneumatyczny, 4 – napęd hydrauliczny, 5 – szafa sterownicza, 6 – pulpit sterowniczy, 7 – zespół ustawiania narzędzi



**Rys. 1.28.** Walcarka płaskoklinowa WRL 4012, produkowana przez zakłady AMT Inżyniring [180]

Również Polska ma swój wkład w rozwój walcarek płaskoklinowych. W 2004 r. opracowano konstrukcję walcarki płaskoklinowej do walcowania wyrobów śrubowych dla kolejnictwa [30]. Walcarka według tego projektu została zbudowana w 2014 r. i jest wykorzystywana do weryfikacji doświadczalnej innowacyjnych technologii WPK w warunkach zbliżonych do przemysłowych [73, 74]. Walcarka wykonana jest jako ażurowa konstrukcja skręcana. Główne

zespoły walcarki to korpus dolny, korpus górny oraz układ jezdny (rys. 1.29). Oba korpusy urządzenia wykonane są jako uźebrowane konstrukcje spawane z płyt stalowych. Korpusy połączone są ze sobą przy pomocy słupów, które spinają obie części w sztywną ramę. W dolnej części korpusu osadzony jest stół, do którego mocowane jest płaskoklinowe narzędzie dolne. Położenie pionowe stołu regulowane jest za pomocą układu klinowego, napędzanego siłownikiem hydraulicznym. Narzędzie górne, mocowane jest do płyty układu jezdnego, który ma możliwość przemieszczania się wraz z narzędziem wzdłuż osi urządzenia. Napęd układu jezdnego realizowany jest przy pomocy siłownika hydraulicznego.



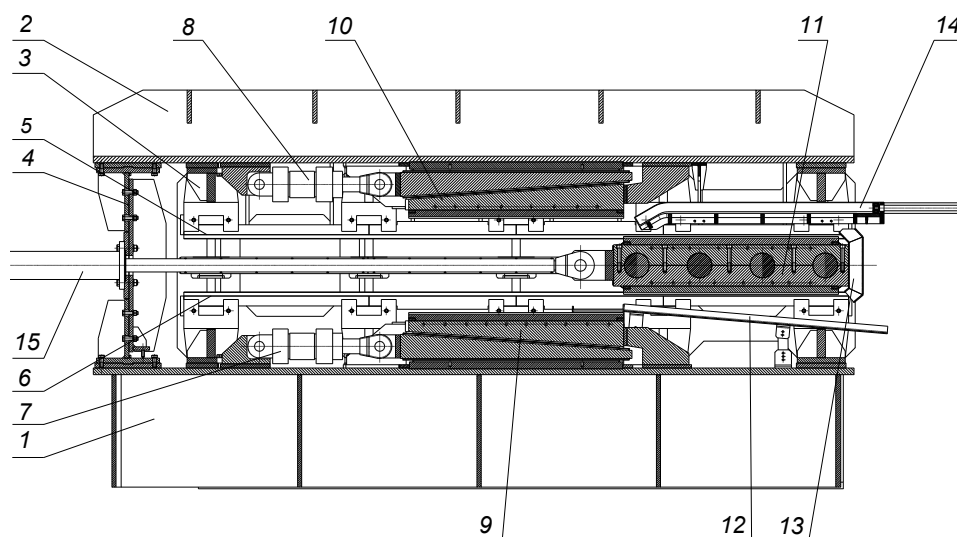
**Rys. 1.29.** *Walcarka płaskoklinowa opracowana w Politechnice Lubelskiej [77]: 1 – korpus dolny, 2 – korpus górny, 3 – słupy łączące, 4 – suwak, 5 – stół wraz z narzędziami, 6 – rynna, 7 – siłownik hydrauliczny, 8 – pulpit sterowniczy*

Walcarkę wyposażono w indywidualny napęd hydrauliczny, w skład którego wchodzi: zasilacz hydrauliczny wraz z układami rozdzielaczy, zaworów i urządzeń sterujących. Maszyna wyposażona jest w układ pomiarowy, umożliwiający cyfrową rejestrację siły nacisku siłownika hydraulicznego. Parametry techniczne walcarki zestawiono w tabeli 1.7.

W 2014 r. opracowano w Politechnice Lubelskiej konstrukcję kolejnej walcarki płaskoklinowej – nawrotnej, przeznaczonej do walcowania odkuwek kul bezpośrednio z główek złomowanych szyn kolejowych [71]. W 2015 r. walcarka została wykonana przy współdziałaniu firmy SIGMA (producenta maszyn górniczych). Cechą charakterystyczną maszyny jest możliwość walcowania odkuwek przy ruchu suwaka w obu kierunkach, dzięki czemu wyeliminowano główny mankament tego typu maszyn (długi czas ruchu jałowego). Nawrotna walcarka poprzeczno-klinowa zbudowana jest jako konstrukcja modułowa (rys. 1.30 oraz rys. 1.31).

**Tab. 1.7.** Parametry walcarki płasko klinowej, znajdującej się w Politechnice Lubelskiej

Długość urządzenia	mm	6000
Szerokość urządzenia	mm	1350
Wysokość urządzenia	mm	2000
Nominalna prędkość ruchu tłoka siłownika głównego (przy nominalnej wartości nacisku)	m/s	0,3
Nominalna siła nacisku tłoka (przy $v = 0,3$ m/s)	kN	105
Maksymalna siła nacisku tłoka (przy $v = 0,2$ m/s)	kN	200
Skok roboczy siłownika głównego	mm	2000
Skok tłoczyska siłownika pomocniczego	mm	125
Średnica robocza siłownika pomocniczego	mm	125
Masa urządzenia bez zasilacza hydraulicznego	kg	10500
Moc silnika	kW	55
Maksymalna długość walcowanych odkuwek	mm	310
Maksymalna średnica odkuwek	mm	70



**Rys. 1.30.** Schemat nawrotnej walcarki płaskoklinowej opracowanej w Politechnice Lubelskiej: 1 – korpus dolny, 2 – korpus górny, 3 – rama łącząca, 4 – wspornik siłownika, 5, 6 – tory jezdne, 7, 8 – siłowniki ustawcze, 9 – dolny zestaw narzędziowy, 10 – górny zestaw narzędziowy, 11 – suwak, 12 – rynna, 13 – prowadnica pośrednia, 14 – podajnik wsadów, 15 – siłownik główny



**Rys. 1.31.** Nawrotna walcarka płaskoklinowa opracowana w Politechnice Lubelskiej

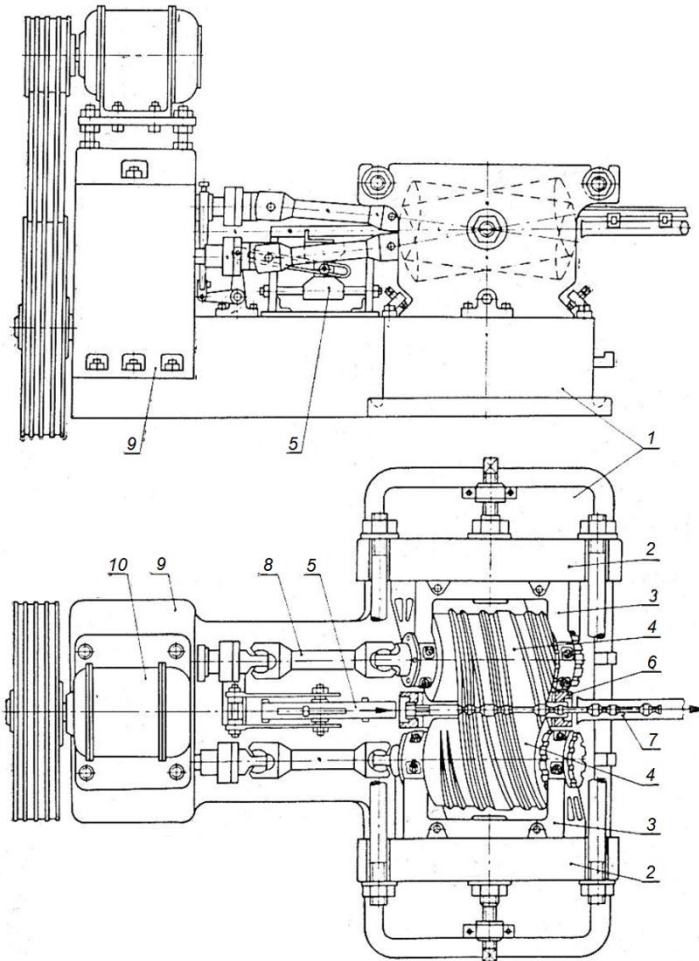
**Tab. 1.8.** Podstawowe parametry technologiczne nawrotnej walcarki płaskoklinowej, opracowanej w Politechnice Lubelskiej

Skok suwaka	mm	2600
Ciśnienie robocze	MPa	18
Maksymalna siła pchająca suwak	kN	280
Maksymalna siła ciągnąca suwak	kN	180
Maksymalna długość narzędzi	mm	1250
Maksymalna szerokość narzędzi	mm	410
Odległość między płytami narzędziowymi górnymi	mm	130
Odległość między płytami narzędziowymi dolnymi	mm	130
Zakres regulacji pionowej narzędzia górnego	mm	8
Zakres regulacji pionowej narzędzia dolnego	mm	8
Prędkość ruchu roboczego suwaka	m/s	0,35
Moc silnika napędowego	kW	136
Długość walcarki	mm	8956
Szerokość walcarki	mm	2274
Wysokość walcarki	mm	2411
Masa walcarki	kg	32000

Składa się z trzyczęściowego korpusu spawanego z płyt stalowych (podstawa, uźebrowanej płyty górnej oraz łączników). Suwak napędzany jest siłownikiem hydraulicznym i porusza się na czterech parach rolek oporowych po torach jezdnych, umieszczonych między podstawą korpusu i płytą górną. Ruchome narzędzia montowane są z obu stron suwaka (górnej i dolnej), zaś narzędzia stałe montowane są do płyty górnej oraz do płyty podstawy korpusu. Przedkuwki ukształtowane w górnym zestawie narzędziowym przemieszczane są samoczynnie do dolnego zestawu narzędziowego, gdzie następuje walcowanie odkuwek przy ruchu powrotnym suwaka. Ukształtowane w dolnym zestawie narzędziowym odkuwki usuwane są z przestrzeni roboczej specjalną rynną odbiorczą, która umieszczona jest w tylnej części maszyny. Walcarka jest zasilana przez indywidualny napęd hydrauliczny. Parametry techniczne walcarki nawrotnej zestawiono w tabeli 1.8.

### **1.1.3. Walcarki skośne**

Osiowosymetryczne odkuwki można walcować również w walcarkach o skośnym położeniu osi walców. Wsadem w takim procesie są pręty o długościach wielokrotnie przewyższających długość walcowanych odkuwek. W trakcie walcowania śrubowe występy umieszczone na walcach zgniatają materiał, jednocześnie wprawiając go w ruch obrotowy i postępowy. Zaletą technologii walcowania skośnego odkuwek jest duża wydajność (w czasie jednego obrotu walców zostaje ukształtowany przynajmniej jeden wyrób). Główną wadą walcowania skośnego jest skomplikowany kształt powierzchni roboczej walców oraz złożona konstrukcja walcarek. Dlatego też obecnie proces ten wykorzystywany jest w ograniczonym stopniu, głównie do walcowania odkuwek kul oraz drobnych odkuwek elementów osiowo-symetrycznych. W przeszłości były podejmowane próby walcowania odkuwek bardziej złożonych, między innymi w 1949 r. w Fabryce Samochodów w Gorki kształtowano w wykrojach śrubowych przedkuwki korbowodów [6, 72]. Cechą charakterystyczną walcarek wykorzystywanych do walcowania skośnego odkuwek jest możliwość skręcenia osi walców. Podstawowym kryterium klasyfikacji tego typu walcarek jest liczba walców. Wyróżnia się kuźnicze walcarki skośne dwu- oraz trójwalcowe. Przykładowy schemat walcarki skośnej, obrazujący ideę walcowania pokazano na rys 1.32. W trakcie walcowania walce o osiach skośnych obracają się z jednakowymi prędkościami w tym samym kierunku. W tym czasie pręt podawany jest do przestrzeni roboczej narzędzi wzdłuż osi walcowania w podajniku przymocowanym do powierzchni czołowej korpusu. Podobnie jak to miało miejsce w walcarkach poprzeczno-klinowych. Walcowany półwyrob utrzymywany jest między walcami przy pomocy dwóch prowadnic.



**Rys. 1.32.** Kuźnicza walcarka skośna z dwoma walcami śrubowymi [53]: 1 – korpus, 2 – klatka walcownicza, 3 – uchwyt łożyskowy, 4 – walec śrubowy, 5 – podajnik, 6 – prowadnica, 7 – uchwyt, 8 – wał napędowy, 9 – przekładnia, 10 – silnik napędowy

Obecnie głównym producentem kuźniczych walcarek skośnych są Chiny i Rosja. Przykładową walcarkę skośną produkowaną w Rosji przez zakłady VNIIMETMASH przedstawiono na rysunku 1.33. Charakteryzuje się ona zwartą i sztywną konstrukcją klatki roboczej, wewnątrz której zabudowane są dwa walce w układzie poziomym. Walce ustawione są skośnie w stosunku do osi walcowania (w płaszczyźnie pionowej), a kąt ich zukosowania może być zmieniany w zakresie  $0 \div 10^\circ$ . Dodatkowo walce robocze mają możliwość regulacji położenia w płaszczyźnie poziomej. Napęd walców pochodzi od niezależnego układu napędowego (przekładni i silnika) przekazywanego do klatki za pośrednictwem wałów przegubowych. Klatka walcownicza wyposażona jest w dwie regulowane prowadnice (górną i dolną), które utrzymują półwyrob między



narzędziami w trakcie procesu walcowania [94]. Obecnie zakłady VNIIMETMASH produkują trzy rodzaje walcarek skośnych o oznaczeniu ШПС (tab. 1.9), które przystosowane są do kształtowania kul stalowych o średnicach od 20 mm do 125 mm [186].



**Rys. 1.33.** Klatka robocza walcarki skośnej ШПС 20-60 firmy VNIIMETMASH [186]

**Tab. 1.9.** Parametry techniczne rosyjskich walcarek skośnych do walcowania kul firmy VNIIMETMASH [94, 186]

Model walcarki		ШПС 20-60	ШПС 40-100	ШПС 80-125
Średnica walcowanej kuli	mm	20 - 60	40 - 100	80 - 125
Maksymalna długość prętów	m	4 - 5	4 - 6	4 - 6
Temperatura walcowania	°C	1000 - 1100	1000 - 1100	1000 - 1100
Średnica walców	mm	350	500, 560	690
Moc silnika napędowego	kW	250	630	900
Wymiary gabarytowe agregatu	m	~ 2,7 x 15,5	~ 4,0 x 21	~ 5,4 x 25
Wydajność procesu walcowania kul o podanych średnicach	t/h	Ø20 mm - 1,2 Ø30 mm - 1,5 Ø40 mm - 2,0 Ø50 mm - 3,4 Ø60 mm - 4,0	Ø40 mm - 5,4 Ø50 mm - 6,2 Ø60 mm - 7,9 Ø70 mm - 8,5 Ø80 mm - 9,7 Ø90 mm - 12,7 Ø100 mm - 15,0	Ø80 mm - 13,0 Ø90 mm - 13,5 Ø100 mm - 14,0 Ø110 mm - 16,5 Ø125 mm - 17,0

Chińskie walcarki skośne produkowane są między innymi w zakładach Anyang Forging Press Machinery Industry, oraz Suchuang Machinery Equipment Manufacturing Co. Oba zakłady specjalizują się w budowie całych linii do walcowania skośnego kul. Przykładową linię walcowniczą do walcowania skośnego kul o wymiarach  $\varnothing 60$  mm, oferowaną przez firmę Anyang Forging Press Machinery Industry, pokazano na rysunku 1.34.



**Rys. 1.34.** Linia walcownicza do walcowania skośnego kul o wymiarach  $\varnothing 60$  mm firmy Anyang Forging Press Machinery Industry (Chiny) [183]

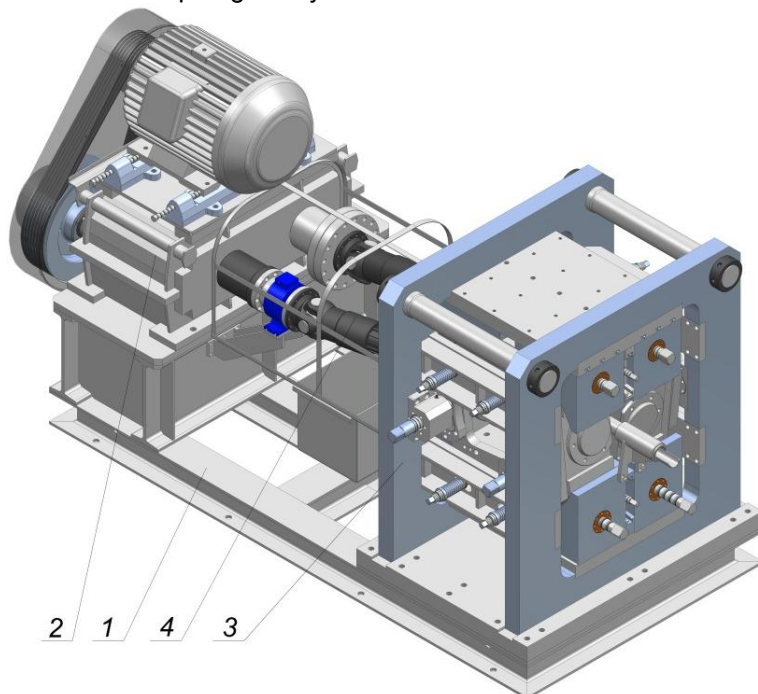
Składa się ona ze skośnej klatki walców roboczych, klatki walców zębatach, redukcyjnej przekładni zębatach, silnika elektrycznego, nagrzewnicy indukcyjnej oraz urządzenia przenośnikowego do normalizacji temperatury odkuwek [34]. Proces walcowania realizowany jest w dwustojakowej klatce skośnej, pomiędzy walcami, na powierzchni których wykonane są wykroje śrubowe. Zakłady Anyang Forging Press Machinery produkują sześć wielkości walcarek, które umożliwiają kształtowanie kul stalowych w zakresie średnic od  $\varnothing 20$  mm do  $\varnothing 105$  mm. Podstawowe parametry techniczne linii walcowniczych zestawiono w tabeli 1.10.

W ostatnim czasie również w Politechnice Lubelskiej podjęto prace badawcze nad procesami walcowania skośnego odkuwek. Jednym z rezultatów prowadzonych prac było zaprojektowanie a następnie wykonanie kuźniczej walcarki skośnej [158]. Walcarka została zainstalowana w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Walcarkę charakteryzuje segmentowa budowa (rys. 1.35). Składa się ona z ramy nośnej, układu napędowego, klatki walcowniczej oraz układu przeniesienia napędu. Rama wykonana jest jako ażurowa konstrukcja spawana z cienkościennych kształtowników hutniczych. Do ramy przymocowano układ napędowy oraz klatkę walcowniczą. Zespół napędowy składa się z silnika elektrycznego, przekładni pasowej oraz przekładni zębatach.

**Tab. 1.10.** Parametry techniczne walcerek skośnych produkcji chińskiej firmy Anyang Forging Press Machinery Industry [94, 183]

Oznaczenie		Ø30	Ø40	Ø50	Ø60	Ø80	Ø100
Zakres wymiarów walcowanych kul	mm	20 - 32	30 - 42	30 - 52	40 - 63	60 - 84	80 - 105
Prędkość obrotowa walców	obr/min	100	90	71,5	71,5	64	40
Wydajność	t/h	0,74	1,57	2,44	4,22	8,96	10,94
Moc silnika napędowego	kW	37	90	132	185	450	630
Moc nagrzewnicy indukcyjnej	kW	300	600	1000	1600	3500	4000
Masa agregatu	t	3,1	5,8	10	16	27	57

W klatce walcowniczej łożyskowane są w układzie poziomym dwa walce robocze wraz z narzędziami. Układ napędowy wyposażono w dwubiegowy silnik, dzięki czemu istnieje możliwość zwiększenia wydajności walcowania w przypadku kształtowania drobnych odkuwek. Przeniesienie momentu obrotowego z układu napędowego na wały główne klatki walcowniczej realizowane jest za pośrednictwem wałów przegubowych.



**Rys. 1.35.** Model przestrzenny kuźniczej walcarki skośnej, opracowanej w Politechnice Lubelskiej: 1 – rama nośna, 2 – układ napędowy, 3 – klatka walcownicza, 4 – układ przeniesienia napędu

Walcarka została wyposażona również w układy pomiaru momentu obrotowego i siły nacisku narzędzi, które współpracują z układem sterowania maszyny i zabezpieczają układ napędowy i narzędzia przed przeciążeniem. Parametry technologiczne walcarki zestawiono w tabeli 1.11.

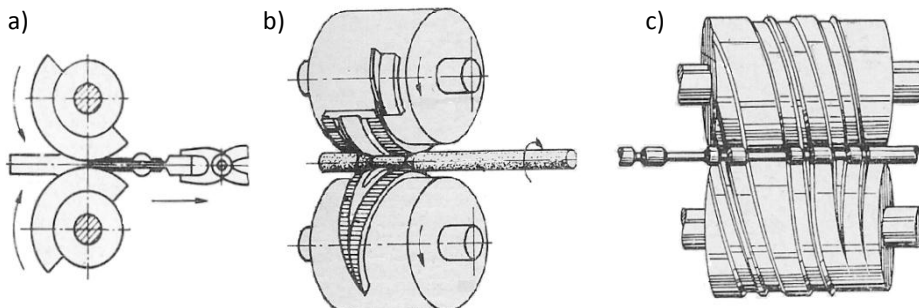
**Tab. 1.11.** Podstawowe parametry walcarki skośnej, opracowanej w Politechnice Lubelskiej

Położenie walców w klatce roboczej		poziome
Średnica nominalna walców	mm	320
Długość robocza beczki walców	mm	400
Minimalna odległość osi walców	mm	300
Maksymalna odległość osi walców	mm	350 mm
Możliwość skręcenia osi wałów względem osi walcowania	°	+/- 12
Minimalna prędkość obrotowa walców	obr/min	15
Maksymalna prędkość obrotowa walców	obr/min	30
Moment nominalny na jednym walcu (dla 15 obr/min)	kNm	20
Moment nominalny na jednym walcu (dla 30 obr/min)	kNm	10
Wymiary gabarytowe maszyny	m	3,2 x 1,8 x 2,1
Masa maszyny	kg	17500
Moc silnika napędowego	kW	60/80

## 1.2. Przegląd prac badawczych w zakresie walcowania kuźniczego

Procesy walcowania kuźniczego realizowane są zazwyczaj w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, przy czym ze względu na rodzaj ruchu oraz kształt i ustawienie walców wyróżnia się;

- walcowanie wzdłużne (rys. 1.36a), w trakcie którego materiał wykonuje ruch postępowy, a walce ułożone równolegle obracają się w stronę przeciwną; w trakcie kształtowania punkty styczności walców z materiałem przemieszczają się ruchem postępowym w kierunku długości elementu walcowanego;
- walcowanie poprzeczne (rys. 1.36b), podczas którego materiał wykonuje ruch obrotowy, a walce ustawione równolegle obracają się w tym samym kierunku; punkty styczności materiału z narzędziami przemieszczają się po obwodzie przedmiotu obrabianego w płaszczyźnie prostopadłej do jego osi;
- walcowanie skośne (rys. 1.36c), w którym materiał wykonuje ruch postępowo-obrotowy, a walce ustawione skośnie względem siebie obracają się w tym samym kierunku; punkty styczności walców z materiałem przemieszczają się ruchem śrubowym.



**Rys. 1.36.** Metody walcowania kuzniczego: a) wzdłużne, b) poprzeczne, c) skośne [88]

### 1.2.1. Walcowanie wzdłużne

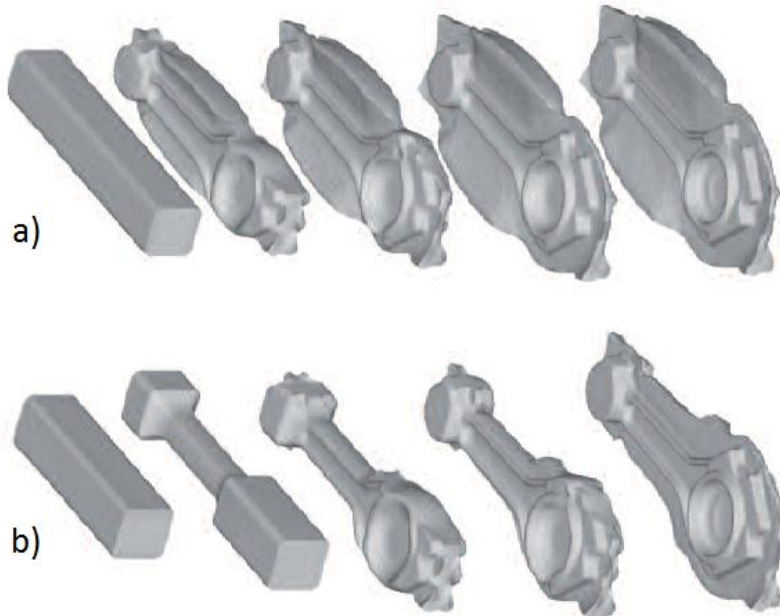
Walcowanie kuznicze wzdłużne stanowi najpopularniejszą odmianę walcowania kuzniczego i jest wykorzystywane przede wszystkim do kształtowania przedkuwek i odkuwek wydłużonych, kutek następnie na prasach kuzniczych (rys. 1.37). Podstawowe zalety tej technologii wytwarzania stanowią: zmniejszenie zużycia materiału w procesach kształtowania odkuwek (nawet o 30%);

- polepszenie warunków kucia matrycowego odkuwek w efekcie usunięcia zgorzeliny w trakcie walcowania przedkuwki;
- zwiększenie żywotności matryc następujące wskutek optymalizacji kształtu przedkuwki;
- automatyzacja procesów wytwarzania przedkuwek;
- możliwość kształtowania przedkuwek o przekroju różnym od kołowego (np. kwadratowym, prostokątnym, owalnym), które są bardzo trudne do otrzymania w procesach walcowania poprzecznego i skośnego.

Walcowanie wzdłużne przedkuwek prowadzi się w jednym lub w kilku wykrojach. Rozróżnia się przy tym kilka podstawowych systemów walcowania, które schematycznie przedstawiono na rys. 1.38. Przy czym kombinacje pokazane na tym rysunku mogą być wykonywane dowolną ilość razy. Dla obliczenia wymiarów poszczególnych wykrojów można zastosować jeden ze znanych sposobów kalibrowania walców (np. Spiessa, Hollera, Bachtinowa-Sztiernowa, Smirnowa, Artoszenki, Kaufmana, Martynowa), których szczegółowy opis znaleźć można np. w monografii [40].

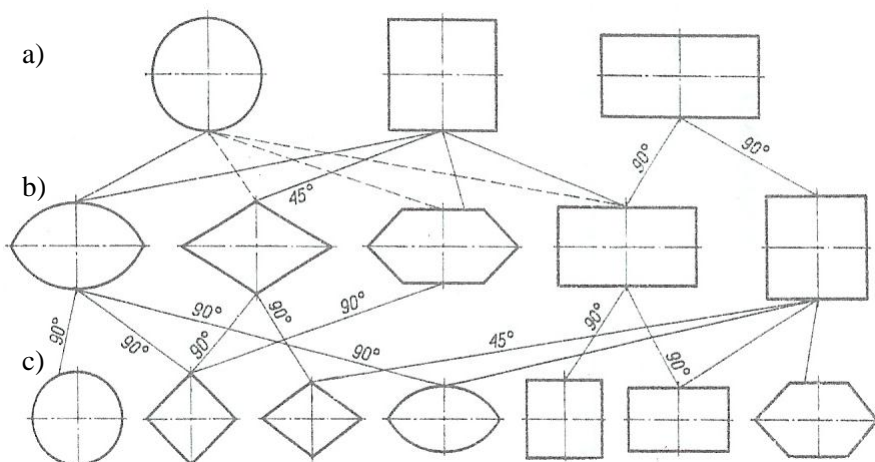
Pomimo szerokiego wykorzystywania walcowania kuzniczego wzdłużnego w praktyce ilość nowych opracowań naukowych, dotyczących tego procesu kształtowania, jest stosunkowo niewielka. Wcześniejsze prace badawcze w zakresie walcowania wzdłużnego opierały się na badaniach doświadczalnych oraz analizie inżynierskiej. Przykładem w tym zakresie może służyć opracowanie [200], w którym opisano wyniki prób eksperymentalnych, dotyczących określenia

wielkości poszerzenia, w zależności od zastosowanej redukcji przekroju podczas walcowania piór resorów.



**Rys. 1.37.** Porównanie procesów kucia matrycowego odkuwki korbowodu samochodu ciężarowego: a) z wsadu (pręta) o przekroju poprzecznym kwadratowym – zużycie materiału 100%, b) z przedkuwki walcowanej wzdłużnie – zużycie materiału 67% [16]

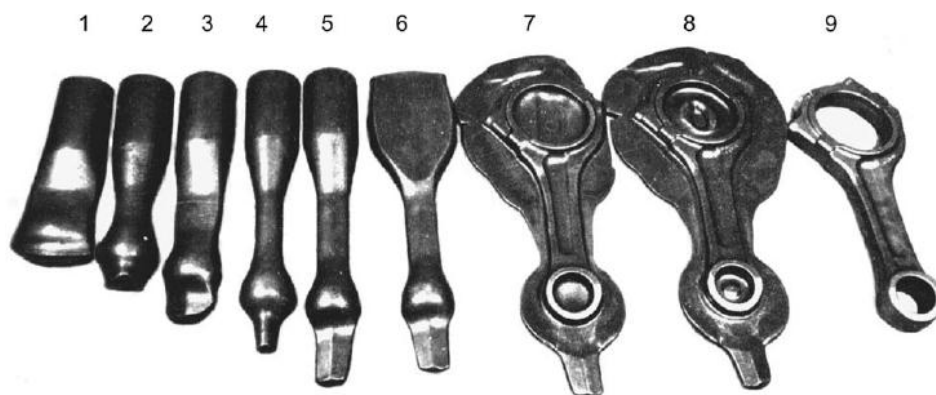
Z kolei w pracy [202] przedstawiono proces walcowania przedkuwek ze stopów aluminium przeznaczonych na korbowody (po walcowaniu przedkuwki były ponownie nagrzewane i realizowany był proces kucia na prasie kuzniczej).



**Rys. 1.38.** Systemy walcownicze wykrojów wydłużających: a) materiał wyjściowy, b) wykroj pierwszy, c) wykroj drugi [88]

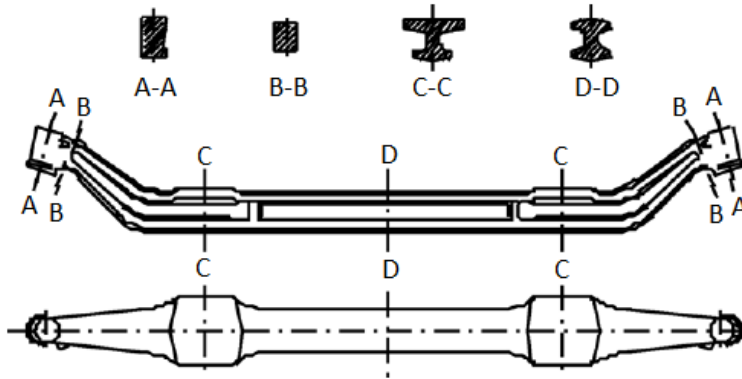
W późniejszym okresie (po roku 2000) w badaniach procesów walcowania kuźniczego zaczęto dość powszechnie stosować analizę numeryczną bazującą na MES. W obliczeniach tych wykorzystywano oprogramowanie komercyjne, takie jak: MSC.AutoForge, MSC.SuperForm, QForm, Deform-3D. Wykonywane symulacje numeryczne miały na celu m.in.:

- zmniejszenie zużycia materiału w efekcie optymalizacji kształtu przedkuwki walcowanej [138];
- określenie kinematyki płynięcia materiału, rozwoju mikrostruktury oraz rozkładu lokalnych własności wytrzymałościowych w trakcie pięciu przepustów, w których walcowano przedkuwkę na korbówód (rys. 1.39) [31, 32, 59];
- opracowanie nowych typów wykrojów, w tym: owalno-płaskiego oraz owalno-rombowego [36, 209], których stosowanie ujednorodniało rozkład intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym wydłużanego pasma.

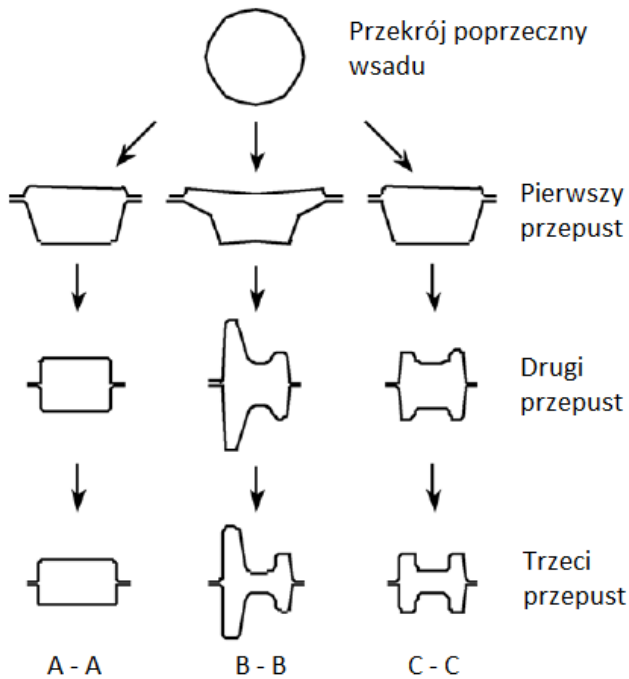


**Rys. 1.39.** Progresja kształtu półwyrobu w procesie wytwarzania odkuwki korbowodu, gdzie: 1-5 - kolejne przepusty walcowania wzdłużnego, 6 – spłaszczanie, 7 i 8 – kucie matrycowe, 9 – okrawanie wypływki [32]

Szereg opracowań [10, 48, 49, 50, 51, 189] poświęcono problematyce walcowania wzdłużnego belek osi przedniej samochodów ciężarowych rys. 1.40. W artykule [10] podano sposób precyzyjnego wyznaczania kształtu wykrojów do walcowania tego wyrobu, na podstawie którego dobrany został system kalibrowania wykrojów, pokazany na rys. 1.41.



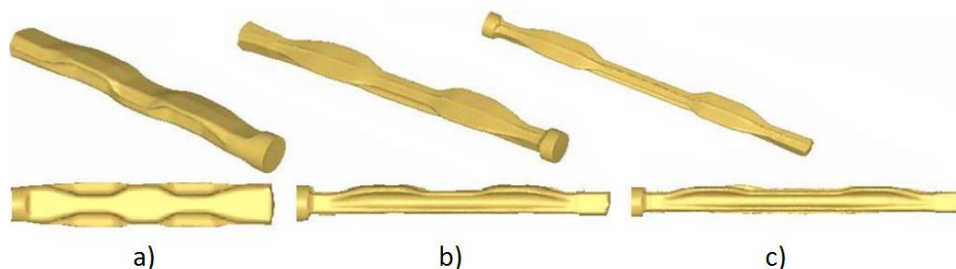
Rys. 1.40. Szkic typowej belki osi przedniej samochodu ciężarowego [10]



Rys. 1.41. System kalibrowania wykrojów stosowany w procesie walcowania wzdłużnego belki osi przedniej samochodu ciężarowego; oznaczenia przekroji zgodnie z rys. 1.39 [10]

Zgodnie z proponowanym rozwiązaniem belka osi przedniej walcowana jest wpływkowo w trzech przepustach, a następnie jest ona gięta i dokuwana na prasie celem uzyskania zakładanego kształtu. W pracach [48–50, 189] przedstawiono rezultaty symulacji numerycznych, weryfikujących opracowane rozwiązanie, w trakcie których analizowano w poszczególnych przejściach: zmiany kształtu odkuwki (rys. 1.42), parametry siłowe, rozkłady temperatury oraz intensywności odkształcenia i naprężenia.





**Rys. 1.42.** Obliczony MES kształt półwyrobu w procesie walcowania wzdłużnego belki osi przedniej samochodu ciężarowego: a) po pierwszym przepuście, b) po drugim przepuście, c) po trzecim przepuście [50]

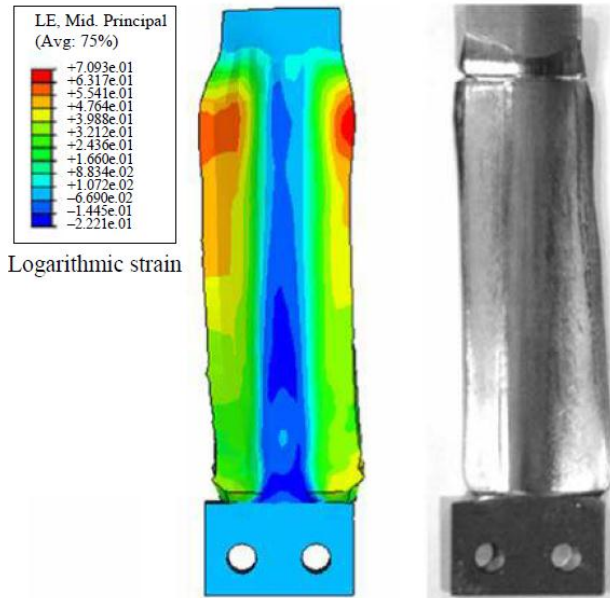
W efekcie wykonanych prac rozwojowych uruchomiono w Chinach aż 30 linii do produkcji belek osi przedniej samochodów – rys. 1.43, w skład których wchodzi walcarki wzdłużne oraz prasy śrubowe o nacisku 25+40 MN. Roczna wydajność tych linii wynosi od 50.000 do 1.000.000 szt. belek (w zależności od ich gabarytów), które kształtowane są z przy uzysku materiału w zakresie 85÷92%. Żywotność segmentów walcowniczych wynosi 8÷15 tys. szt. przedkuwek i jest dwukrotnie większa od żywotności matryc kuźniczych, w których belki są gięte i dokuwane [117].

W literaturze specjalistycznej znaleźć można także nieliczne informacje na temat walcowania wzdłużnego półwyrobów ze stopów metali nieżelaznych. I tak, w pracy [164] przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu walcowania przedkuwki dźwigni ze stopu magnezu w gatunku AZ31. Przy czym symulacje numeryczne wykonano dla dwóch różnych metod walcowania, tj. wzdłużnego oraz poprzeczno-klinowego. Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że ze względu na możliwość pęknięcia materiału bardziej korzystne jest kształtowanie przedkuwki dźwigni w procesie walcowania wzdłużnego. W artykule [9] przedstawiono z kolei wyniki prób laboratoryjnych walcowania wzdłużnego, w których z powodzeniem kształtowano ze stopu aluminium 2014 przedkuwki dźwigni. Badania wykonano na walcierce laboratoryjnej, o średnicy walców 320 mm, znajdującej się w Politechnice Lubelskiej. Natomiast, w pracy [128] przedstawiono wyniki badań teoretyczno-doświadczalnych w zakresie walcowania wzdłużnego na zimno łopatki sprężarki, wykonywanej ze stopu Inconel-718 (rys. 1.44). Badania te były ukierunkowane na zwiększenie dokładności walcowania poprzez uwzględnienie w gniotach odkształceń sprężystych występujących w układzie narzędzia – walcarka.

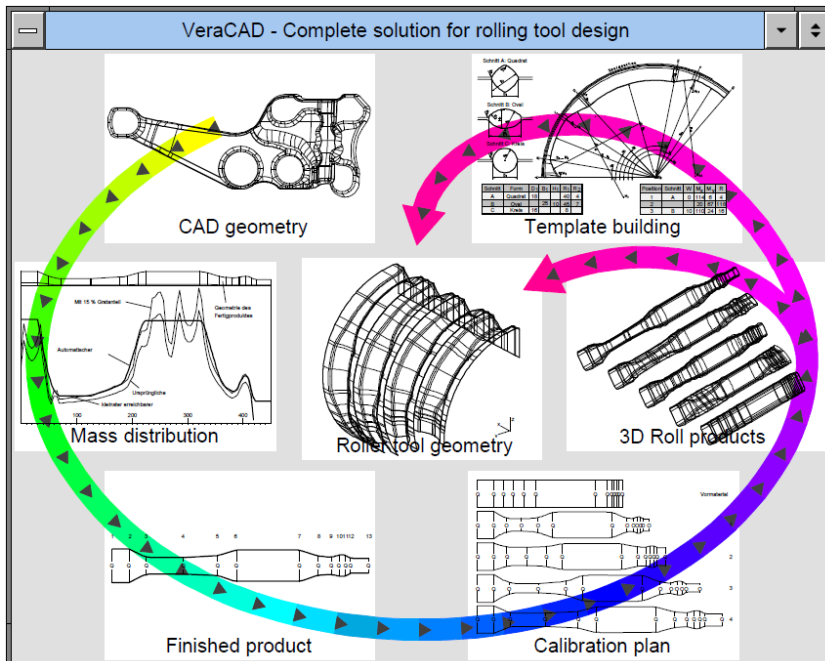


**Rys. 1.43.** Widok linii do wytwarzania belek osi przedniej samochodu wraz z wyprodukowanymi w niej przykładowymi wyrobami [117]

Popularność procesu walcowania kuźniczego spowodowała, iż w firmie Eratz-Engineering opracowano komercyjny program specjalistyczny, wspomagający konstruowanie segmentów narzędziowych wykorzystywanych w walcowaniu kuźniczym. Program ten, o nazwie VeraCAD (rys. 1.45), na podstawie rysunku przestrzennego odkuwki wykonuje kolejno wykres przekrojów przedkuwki (z uwzględnieniem naddatków na wypływkę), rysunek przestrzenny przedkuwki walcowanej (o przekrojach poprzecznych kołowych, kwadratowych i owalnych), plan kalibrowania walców. Następnie przedstawia sposób kalibrowania walców, kształt przedkuwek po każdym przepuście, generuje model 3D segmentów narzędziowych (z możliwością wytworzenia kodu dla obrabiarek CNC) oraz ich dokumentację techniczną w 2D. Program VeraCAD ułatwia w sposób znaczący opracowanie technologii walcowania kuźniczego wzdłużnego, a informacje na temat jego wykorzystania znaleźć można w literaturze specjalistycznej, np. w [173].



**Rys. 1.44.** Porównanie kształtów, łopatkę sprężarki walcowanej na zimno ze stopu Inconel-718, obliczonego MES i uzyskanego w badaniach eksperymentalnych [128]



**Rys. 1.45.** Program VeraCAD wspomagający projektowanie segmentów narzędziowych do walcowania kuźniczego [169]

### 1.2.2. Walcowanie poprzeczne

Spośród licznych technologii walcowania poprzecznego największe zastosowanie w kuźnictwie znajduje proces walcowania poprzeczno-klinowego (WPK). Polega on na plastycznym kształtowaniu wyrobów osiowo-symetrycznych, w wyniku oddziaływania narzędzi w kształcie klinów, które montowane są na walcach, bądź płaskich lub wklęsłych płytach walcarek. Metoda WPK jest szeroko wykorzystywana do kształtowania części typu stopniowane osie i wały, jak również do wytwarzania przedkuwek kutyh następnie na prasach kuźniczych.

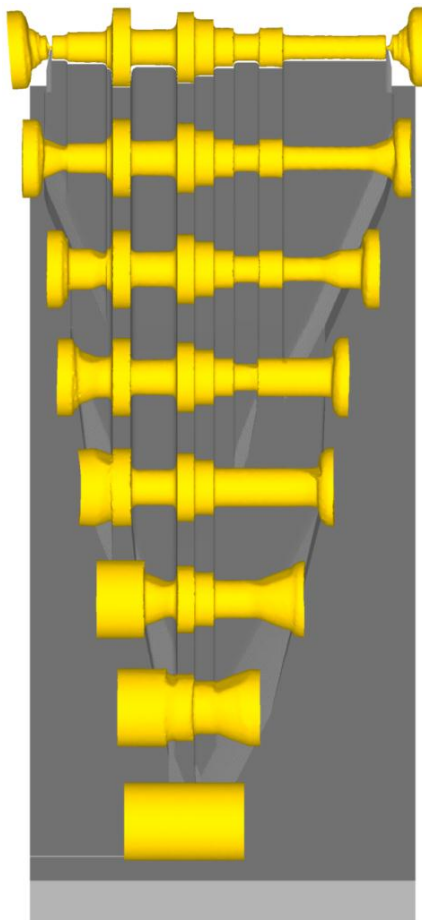
Stan wiedzy w zakresie rozwoju teorii i technologii WPK do 1992 r. został wyczerpująco przedstawiony w opracowaniu [25]. Jednakże w ostatnim dwudziestoleciu tej interesującej technologii wytwarzania poświęcono wiele prac naukowo-badawczych, które zdaniem autora wymagają krótkiego ich przybliżenia.

Początkowo do analizy procesu WPK wykorzystywano wyłącznie metody inżynierskie, za pomocą których szacowano głównie parametry siłowe. Następnie, pod koniec XX wieku opracowana została nowa metoda modelowania warstwowego [99, 105, 106], w której bazowano na podobieństwie przemieszczania się materiału w przekrojach poprzecznych wyrobów kształtowanych metodą WPK i obciskanych obrotowo. Koncepcja rozwiązania polegała na zamodelowaniu strefy odkształcenia za pomocą wzajemnie przylegających do siebie warstw, w których zakładano występowanie płaskiego stanu odkształcenia. Zastosowanie metody warstwowej umożliwiło obliczenie podstawowych parametrów siłowych na każdym etapie procesu oraz na prognozowanie stabilności przebiegu walcowania. Ponadto, metoda ta została wykorzystana do optymalizacji wielokryterialnej podstawowych parametrów procesu WPK [110].

Największe możliwości poznawcze w modelowaniu procesu WPK uzyskiwane są dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych (MES). Ze względu na złożoność odkształcenia, duży skok narzędzia (wielokrotnie przewyższający wymiary wyrobu walcowanego) oraz charakter kontaktu materiału z narzędziami proces WPK udało się skutecznie zamodelować w MES dopiero w bieżącym stuleciu. Do chwili obecnej opublikowano szereg opracowań, w których przedstawiano wyniki wykonanych symulacji numerycznych. W obliczeniach korzystano z następujących programów komercyjnych: ANSYS/LS-DYNA [13, 17-19, 20, 45, 47, 48, 55, 115, 125, 133, 135, 167,168, 190, 193, 197, 206], Deform 3D [21, 28, 26, 35, 37, 52, 56, 60, 79, 80, 103, 104, 111, 119, 120, 129, 132, 134, 142, 170-172, 175, 177, 191, 192, 194, 196, 198, 201, 205, 208, 210, 211], Forge 3 [58, 116], MSC.SuperForm i MARC.AutoForge [21, 52, 60, 120, 133, 170-172, 191, 192]. Duża część wykonanych analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych [9, 17-20, 47, 54, 55, 63, 100, 107, 116, 120, 167, 175, 197, 210, 211] zogniskowana była na modelowaniu ograniczeń stabilności

przebiegu procesu WPK, która może być zakłócona w wyniku: wystąpienia niekontrolowanego poślizgu, przewężenia kształtowanego stopnia odkuwki, wyginania odkuwki oraz pęknięcia materiału. Ponadto, stosując MES analizowano w procesach WPK parametry siłowe [7, 58, 115, 133] oraz jak zmienia się w wyrobie kształtowanym temperatura [50, 119, 118], mikrostruktura [26, 171, 191], stan naprężenia [19, 21, 75, 107, 135, 175, 190, 197, 205] i stan odkształcenia [35, 70, 75, 108, 120, 129, 190, 198].

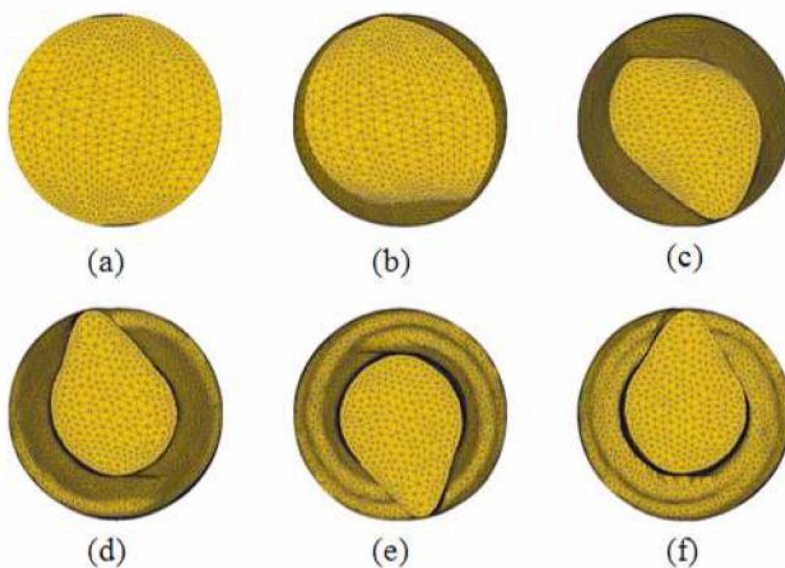
Rozwój programów do modelowania procesów kształtowania plastycznego oraz rosnące możliwości obliczeniowe maszyn cyfrowych sprawiły, że obecnie można modelować na komputerach osobistych nawet bardzo złożone przypadki procesów WPK. Przykładem w tym zakresie może być proces walcowania wałka napędowego, pokazany na rys. 1.46. W symulacji tej założono, że wałek kształtowany jest dwoma klinami płaskimi z wsadu o średnicy równej średnicy największego stopnia odkuwki.



**Rys. 1.46.** Zmiany kształtu odkuwki wałka pośredniego w zamodelowanym numerycznie procesie WPK [66]

W zaistniałej sytuacji skrajnie stopnie wałka walcowane są przy stopniach gniotu  $\delta$  (gdzie:  $\delta = d_0/d$ ;  $d_0$  – średnica wsadu,  $d$  – średnica stopnia walcowanego) dochodzących do 3,33. Osiągnięcie tak dużej redukcji średnicy wymaga zastosowania dwuetapowego schematu walcowania (najpierw realizowane jest walcowanie na średnicę pośrednią, a następnie na końcową).

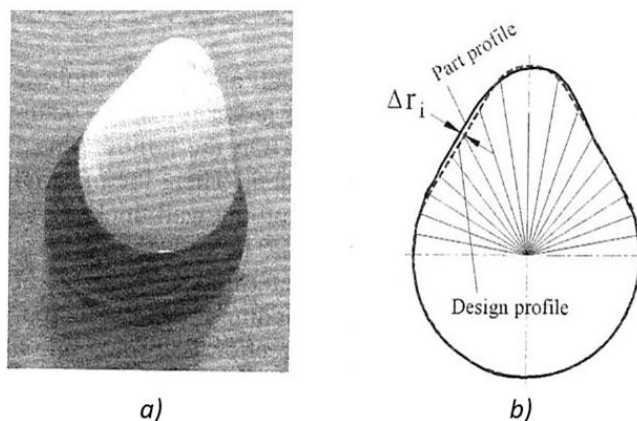
Dążąc do rozszerzenia możliwości technologicznych procesu walcowania poprzecznego wykonanych zostało szereg prac o charakterze teoretycznym i eksperymentalnym. Część z nich dotyczyła wytwarzania metodą WPK elementów mających stopnie o przekroju poprzecznym różnym od kołowego (np. kwadratowe, owalne, sześciokątne itp.). Stopnie takie można uzyskać stosując narzędzia mające specjalnie sprofilowane powierzchnie kalibrujące. Wykonane symulacje numeryczne oraz badania doświadczalne [4, 33, 56, 81, 208] wykazały przydatność opracowanej metody WPK w kształtowaniu wyrobów niesymetrycznych osiowo. Cechą charakterystyczną tych procesów kształtowania jest zmiana wahadłowa siły, będąca skutkiem zmieniającego się cyklicznie gniotu. Przykładem w tym zakresie może być proces kształtowania krzywek na wałku stopniowanym opisany w pracach [4, 33, 208]. Na rys. 1.47 pokazano kolejne stadia kształtowania krzywki, wyznaczone w programie Deform-3D. Natomiast na rys. 1.48 przedstawiono kształt krzywki uzyskanej w próbach przemysłowych walcowania.



**Rys. 1.47.** Zmiany kształtu przekroju poprzecznego krzywki uzyskiwanej w procesie WPK: a) – f) kolejne etapy kształtowania [208]

Pracami badawczymi objęto również procesy WPK mające na celu kształtowanie wałków posiadających uzwojenia zębate lub uzwojenia ślimaka. W tym przypadku na końcu segmentu narzędziowego, za strefą kalibrowania,

umieszczane są wkładki służące do kształtowania uzwojeń. Wyniki wstępnych prac wykonanych w zakresie walcowania wałków zębatach z uzębieniem normalnym (rys. 1.49) i skośnym [33, 37, 86, 201] oraz wałków ze ślimakami (rys. 1.50) [4, 81, 85, 86–87, 98, 114, 160, 194–196] są obiecujące. Wskazują one na możliwość kształtowania metodą WPK uzębień i ślimaków, których kształt podlegać będzie później niewielkiej korekcie, realizowanej za pomocą frezowania dokładnego lub szlifowania.



Rys. 1.48. Krzywka otrzymana w procesie WPK: a) widok przekroju, b) dokładność wykonania [4]

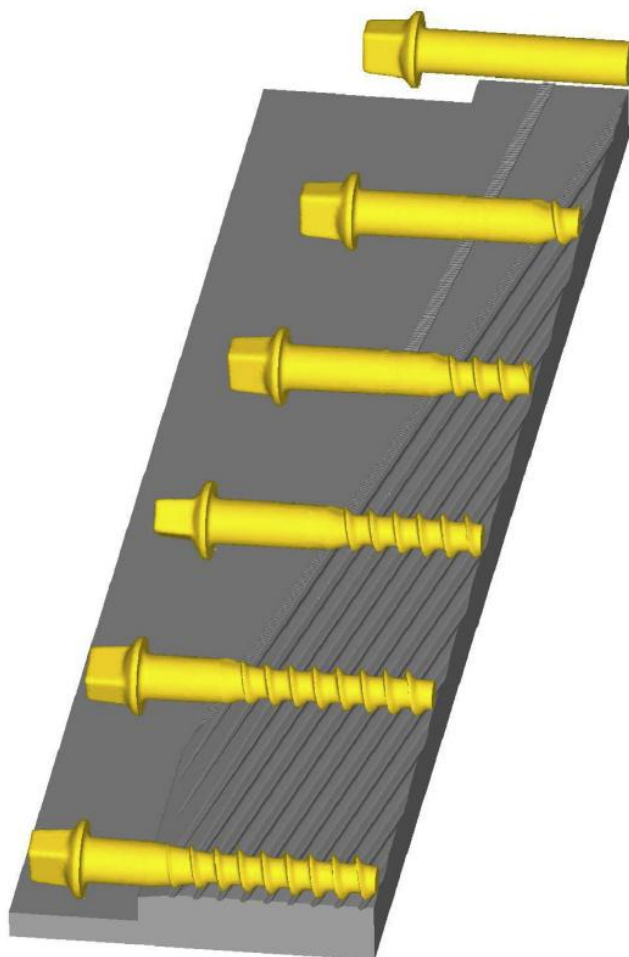


Rys.1.49. Wałek z uzębieniem prostym (liczba zębów 18, moduł 1,5) otrzymany metodą walcowania poprzecznego [81]



Rys. 1.50. Wałki ze ślimakami (uzwojenie jednokrotne, wysokość zwoju 3 mm) otrzymane metodą walcowania poprzecznego [81]

Należy też wspomnieć o tym, że proces WPK został wdrożony z sukcesem do wytwarzania wkrętów szynowych, kształtowanych w układzie podwójnym. Opracowana w Politechnice Lubelskiej nowa metoda wytwarzania wkrętów [27, 29, 82, 102, 113, 178] polega na zastosowaniu dwóch operacji kuźniczych. Pierwszą z nich stanowi kucie bezwyżywkowe łbów śrub kształtowanych w układzie podwójnym, tj. na obu końcach cylindrycznego pręta. Drugą operacją jest walcowanie poprzeczno-klinowe gwintu na dwóch wkrętach (w sposób pokazany na rys. 1.51), które w końcowej fazie procesu ulegają rozdzieleniu. Uzyskiwane tą metodą wkręty szynowe charakteryzują się dobrą jakością, właściwym przebiegiem włókien i dodatkowo mają korzystne zakończenie stożkowe (rys. 1.52).



**Rys. 1.51.** Symulacja numeryczna procesu walcowania gwintu wkrętów szynowych wykonana przy założeniu symetrii kształtowania [113]





**Rys. 1.52.** Przekrój wzdłużny przez część gwintowaną wkręta szynowego otrzymanego z wykorzystaniem procesu walcowania poprzeczno-klinowego [113]

Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na elementy drążone w budowie maszyn podejmowane były także próby w zakresie wytwarzania takich części metodami WPK. W wyniku wykonanych w tym zakresie dość licznych prac badawczych [5–8, 14, 22, 35, 39, 42, 61, 64, 65, 67, 68, 76, 78, 89-91, 94–97, 112, 121, 122, 124, 126, 127, 130, 131, 142, 159-163, 165, 167, 168, 174, 176, 198, 199, 203] stwierdzono, że:

- w procesie walcowania poprzecznego można kształtować wyroby z dokładnością porównywalną do uzyskiwanej przy walcowaniu wyrobów pełnych, przy czym stabilność kształtowania może być zakłócona przez: zgniecenie odkuwki, jej przewężenie lub znaczące zniekształcenie powierzchni wewnętrznej;
- kąty narzędzi (klinów) powinny być dobierane inaczej niż w przypadku walcowania wyrobów pełnych; zasady doboru tych kątów podano w opracowaniach [5, 6, 8];
- ze względu na zwiększoną owalizację przekroju poprzecznego należy wydłużyć strefę kalibrowania narzędzi do wielkości zapewniającej wykonanie przez odkuwkę ok. 3 obrotów.

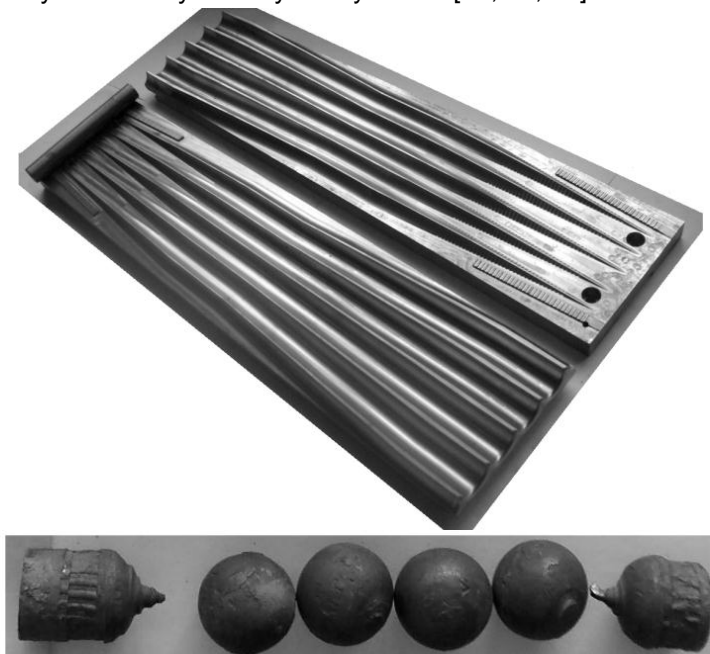
Na podstawie wykonanej analizy literatury specjalistycznej można stwierdzić, iż dotychczasowy rozwój technologii WPK zogniskowany był na kształtowaniu wyrobów stalowych i tylko w nieznacznym stopniu dotyczył wytwarzania wyrobów z metali nieżelaznych i ich stopów. Jak dotychczas podjęto próby w zakresie kształtowania części ze stopów tytanu [61, 79, 97], aluminium [80, 91, 165], magnezu [111], superstopów na bazie niklu [60], kul wytwarzanych z miedzi [126] oraz wałków ze stopu cynku wykorzystywanych w reaktorach atomowych [127]. Wydaje się, że badania w zakresie WPK wyrobów z materiałów nieżelaznych stanowią będą w najbliższej przyszłości jeden z głównych nurtów badawczych.

W ostatnim czasie szereg prac badawczych poświęconych zostało także problematyce walcowania wieloklinowego, w trakcie którego wyrób kształtowany jest jednocześnie przez więcej niż jedną parę klinów. Rozwiązanie takie prowadzi do znacznego skrócenia długości narzędzi, któremu towarzyszy jednak wzrost sił kształtowania. Komplikuje się także konstrukcja segmentów narzędziowych, gdyż

kształt klinów bocznych musi uwzględniać wydłużenie odkuwki powodowane działaniem klinów centralnych [67, 132, 203].

Potencjalnymi obszarami zastosowania walcowania wieloklinowego są:

- kształtowanie bardzo długich wałów i osi, np. samochodowych, kolejowych [135, 190, 206];
- jednoczesne wykonywanie kilku (a nawet więcej) wyrobów krótkich, takich jak kule do młynów kulowych i łożysk – rys. 1.53 [67, 68, 90].



*Rys. 1.53. Narzędzia wieloklinowe oraz odwalcowane za ich pomocą kule stalowe o średnicy 22 mm [67]*

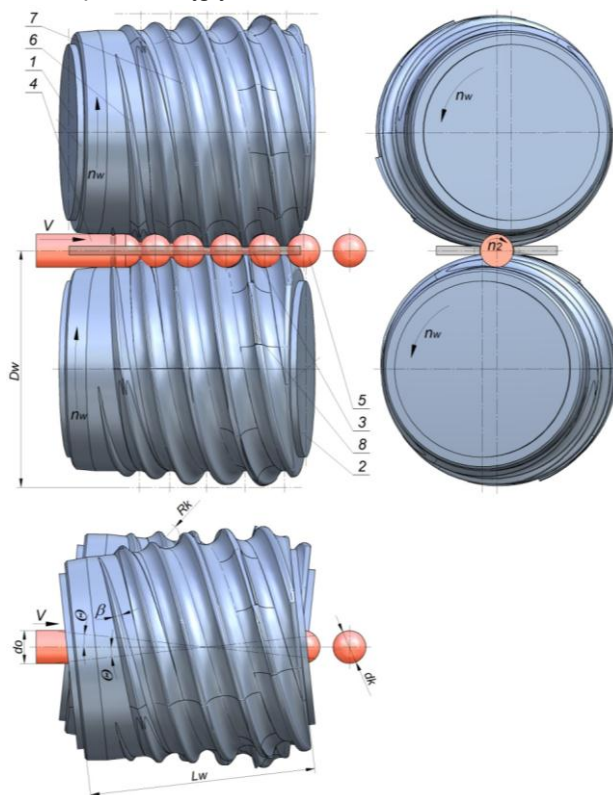
### 1.2.3. Walcowanie skośne

Procesy kuźniczego walcowania skośnego wykorzystywane są w praktyce przemysłowej bardzo rzadko. Dzieje się tak dlatego, że narzędzia (walce) stosowane w tym przypadku mają śrubowo nacięte na obwodzie bruzdy o zmiennym kształcie i skoku (wynikającym z zasady stałej objętości materiału kształtowanego, zamykanego w wykroju tworzonym przez dwie lub trzy bruzdy współpracujących walców), co znacząco utrudnia ich zaprojektowanie i wykonanie. Z tej też przyczyny stosowanie walcowania kuźniczego skośnego ograniczone jest do kształtowania wyrobów o stosunkowo prostym kształcie, takich jak pierścienie na łożyska toczne, czy kule wykorzystywane w łożyskach lub młynach kulowych.

Niewielki zakres wykorzystania kuźniczego walcowania skośnego przełożył się na małą liczbę opracowań dotyczących tego zagadnienia, opublikowanych ostatnio w literaturze specjalistycznej. Prace te dotyczyły przede wszystkim

modelowania numerycznego bazującego na MES procesów walcowania pierścieni [39, 124, 39] i kul [96, 121, 122, 130, 159, 162], jak również projektowania narzędzi zabezpieczających przeprowadzenie walcowania [96, 131, 174, 199].

W ostatnim okresie w Politechnice Lubelskiej realizowano szeroko zakrojony program badawczy mający na celu opracowanie nowej metody walcowania kul, wytwarzanych z główek złomowanych szyn stalowych [94]. W ramach tego projektu opracowano nową technologię walcowania skośnego, którą nazwano walcowaniem śrubowo-klinowym (WŚK). W procesie tym kliny nawinięte są na walce w sposób śrubowy jedno- lub wielozwojnie (rys. 1.54), co umożliwia kształtowanie kul w sposób ciągły.



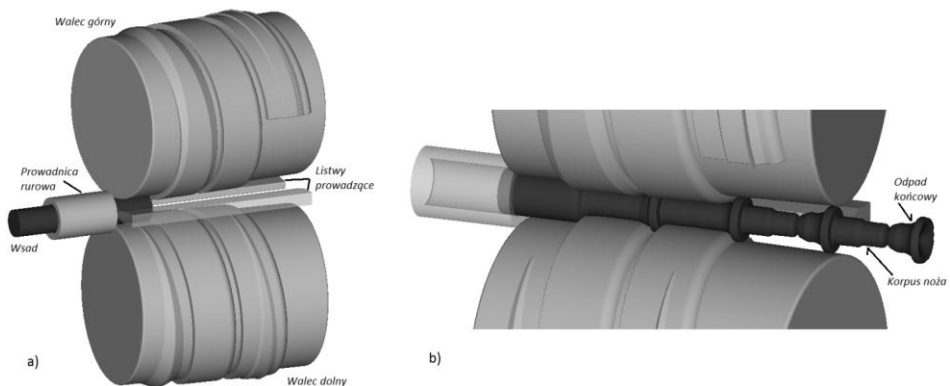
**Rys. 1.54.** Schemat procesu walcowania śrubowo-klinowego kul: 1, 2 – wielozwojne walce klinowo-śrubowe, 3 – listwa prowadząca, 4 – wsad, 5 – półwyrob (kula), 6, 7 – obrzeże klinowe, 8 – nóż odcinający [94]

Wykonane prace badawcze bazujące na analizie teoretycznej oraz badaniach doświadczalnych potwierdziły słuszność opracowanej koncepcji walcowania skośnego [78, 94, 95, 164]. Na rys. 1.55 pokazano narzędzia wykorzystywane w procesie WŚK kul oraz otrzymane przy ich wykorzystaniu półwyroby kul, które charakteryzowały dobrą jakością i dokładnością wykonania.

Zadowolające wyniki w zakresie WŚK kul skłoniły zespół badawczy z Politechniki Lubelskiej do poszukiwania innych wyrobów, które mogłyby być wytwarzane za pomocą tej nowoczesnej technologii wytwarzania. Wykonane analizy numeryczne (bazujące na MES), szczegółowo opisane w pracach [89, 65, 78, 64] wykazały, że metodą WŚK można będzie wytwarzać elementy złączne, stopniowane wałki oraz korpusy noży obrotowych – rys. 1.56. Równocześnie wskazano na konieczność dalszych prac badawczych w zakresie weryfikacji doświadczalnej procesu WŚK oraz rozszerzenia jego stosowania na inne wyroby, w tym drążone.



**Rys. 1.55.** Walce wykorzystywane w procesie walcowania śrubowo-klinowego (u góry) oraz kule o średnicy  $\varnothing 33$  mm uzyskane przy ich użyciu (u dołu) [78]



**Rys. 1.56.** Model geometryczny procesu walcowania śrubowego korpusu noża (a) oraz widok półwyrobu po wykonaniu przez walce 4 obrotów (b) [89]

### 1.3. Przegląd metod dzielenia bezodpadowego prętów

Cięcie prętów na odcinki jest powszechnie stosowaną operacją procesu technologicznego i ma na celu uzyskanie materiału wyjściowego o żądanej długości do produkcji elementów metodami obróbki skrawaniem, bądź też metodami obróbki plastycznej. Obecnie wykorzystuje się szereg metod cięcia, wśród których największe znaczenie mają procesy ubytkowe (np. cięcie na piłach) [22, 14], bezodpadowe (cięcie na nożycach, łamanie) [42, 176] oraz erozyjne (cięcie plazmowe, strugą wody, laserowe) [30, 141]. Większości metod cięcia stosowanych w procesach produkcyjnych towarzyszą negatywne zjawiska takie jak: duży ubytek materiału oraz zniekształcenia geometrii przecinanego pręta (owalizacja przekroju, zadziory i defekty na powierzchni przecięcia). Dlatego też wybór sposobu dzielenia prętów zdeterminowany jest takimi czynnikami jak: rodzaj ciętego materiału, przeznaczenie półfabrykatów, wymagana jakość powierzchni cięcia, dokładność kształtu i wymiarów oraz koszty cięcia [15].

Powszechnie stosowaną w budowie maszyn grupą wyrobów walcowanych są pręty o przekroju okrągłym, które dostarczane są przez huty w długościach od kilku do nawet kilkunastu metrów. Następnie w zakładach produkcyjnych pręty dzielone są na wymagane długości, w zależności od potrzeb. Masowość operacji cięcia powoduje, że coraz chętniej wykorzystuje się metody bezwiórowe, które oprócz znacznie mniejszych odpadów w stosunku do innych technologii, charakteryzują się dużą wydajnością. Jednak ciągle w większości przypadków podstawową wadą tych technologii jest niewielka dokładność uzyskanych półwyrobów.

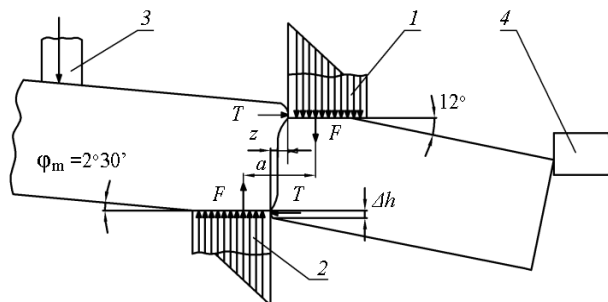
Bezodpadowe dzielenie prętów można zrealizować według trzech schematów [153]:

- w wyniku przecięcia na nożycach lub matrycach,
- w wyniku działania obciążeń udarowych,
- w wyniku pęknięcia (doraźnego i zmęczeniowego).

#### 1.3.1. Cięcie na nożycach i w matrycach

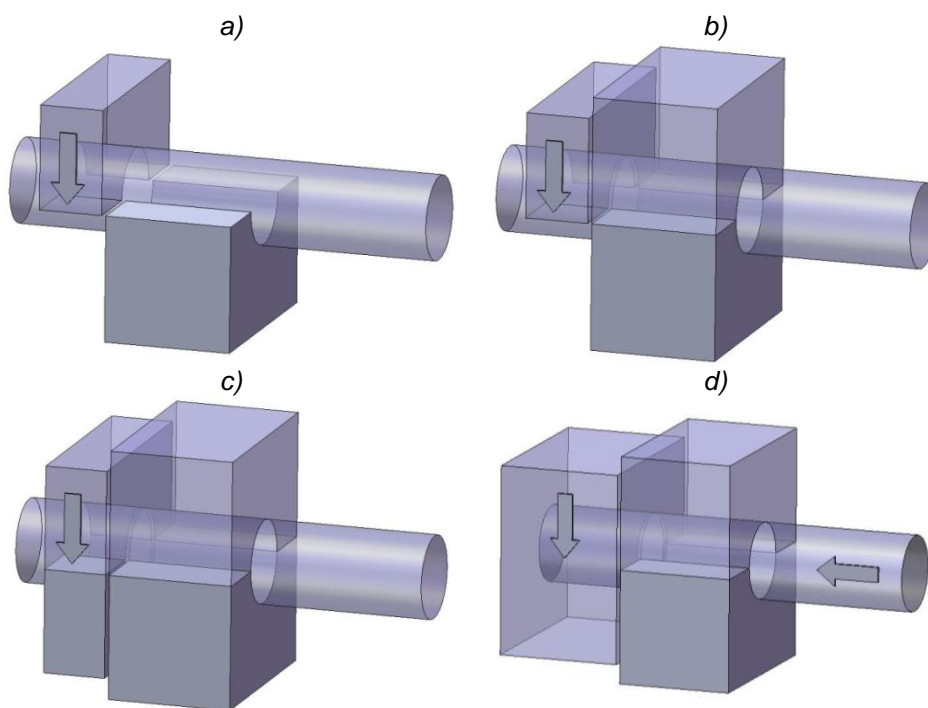
Cięcie na nożycach jest jedną z najczęściej stosowanych metod przecinania metalowych prętów okrągłych. Proces cięcia (rys. 1.57) realizowany jest poprzez ułożenie i dociśnięcie materiału dociskaczem – 3 do nieruchomego noża dolnego – 2, a następnie odcięcie ustalonego przez opór – 4 odcinka pręta przy pomocy noża górnego – 1, zamocowanego na suwaku prasy [41].

Wymagania jakościowe, stawiane przeciętym elementom przyczyniły się do rozwoju układów narzędziowych, wykorzystywanych podczas procesu cięcia na nożycach. W zależności od konstrukcji segmentu tnącego oraz prowadzenia materiału, wykorzystuje się cztery schematy procesu ciecicia [14, 15, 30, 42, 88, 141, 153, 176, 207]:



**Rys. 1.57.** Mechanizm cięcia na nożycach [41]: 1, 2 – noże; 3, 4 – opory

- cięcie bez docisku – rys. 1.58a,
- cięcie z dociskiem pręta (otwarte) – rys. 1.58b,
- cięcie z podtrzymaniem elementu ciętego i pręta (przymknięte) – rys. 1.58c,
- cięcie z podtrzymaniem elementu ciętego i pręta oraz z osiowym dociskiem elementu ciętego (zamknięte) – rys. 1.58d.

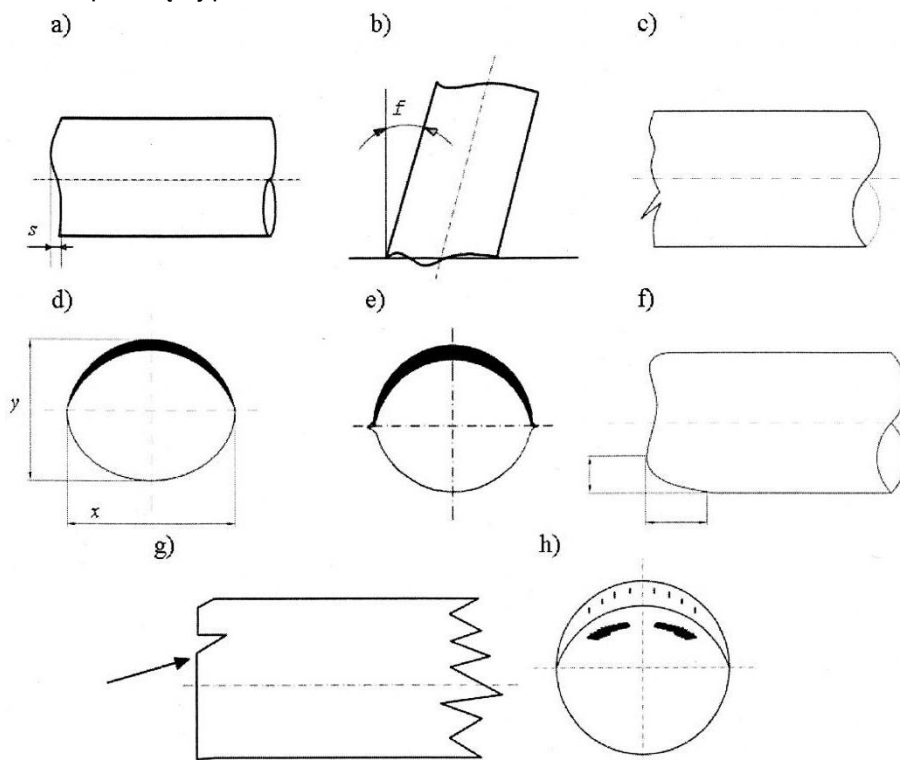


**Rys. 1.58.** Schematy cięcia [154]: a) bez docisku, b) z dociskiem, c) z podtrzymaniem pręta i ciętego elementu, d) z podtrzymaniem elementu ciętego i pręta oraz z osiowym dociskiem elementu ciętego

Wybór jednej z przedstawionych metod cięcia uzależniony jest od żądanej dokładności ciętych elementów oraz wielkości serii produkcyjnej [196].

Największą dokładność elementów uzyskuje się, wykorzystując schematy cięcia pokazane na rysunkach 1.58c oraz 1.58d. Jednocześnie są to sposoby najmniej wydajne i wymagające złożonych konstrukcji urządzeń.

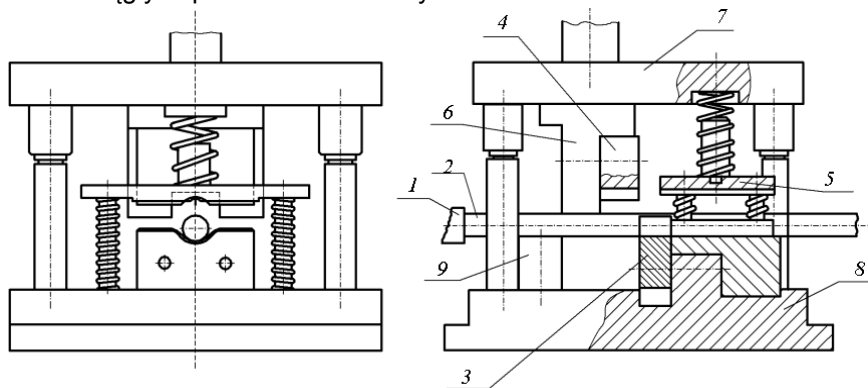
Kształt powierzchni przecięcia zależy głównie od wielkości luzu pomiędzy nożami oraz od własności ciętego metalu. Typowymi wadami występującymi w procesie cięcia metalowych prętów okrągłych na nożycach są (rys. 1.59): nierówna powierzchnia czołowa, brak prostokątności przeciętej powierzchni do osi, występy i zadziory, owalizacja przekroju, odkształcenie w płaszczyźnie poziomej, spłaszczenia końców pręta, pęknięcia, niejednorodna struktura przeciętej powierzchni.



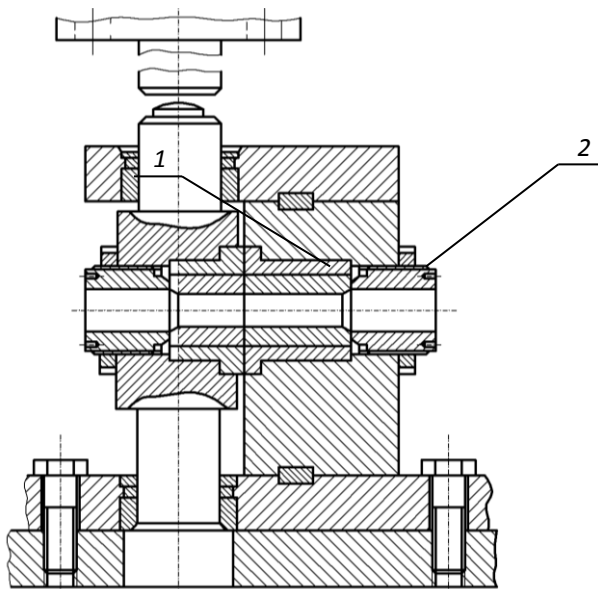
**Rys. 1.59.** Typowe wady, występujące podczas cięcia prętów na nożycach [88]:  
 a) nierówność powierzchni czołowych, b) brak prostokątności powierzchni cięcia,  
 c) występy i zadziory, d) owalizacja przekroju, e) odkształcenie w płaszczyźnie poziomej,  
 f) spłaszczenie końców pręta, g) pęknięcia, h) niejednorodna struktura w obszarze cięcia

Dokładność cięcia prętów można zwiększyć w wyniku realizacji procesu w matrycach. Matryce zaleca się stosować do cięcia krótkich odcinków materiału  $l_{min} = 0,3 d_0$  (gdzie  $d_0$  – średnica pręta). Przy czym metody tej nie stosuje się do dzielenia prętów o średnicach większych od 50 mm. Schemat cięcia prętów na prasach z wykorzystaniem matrycy pokazano na rys. 1.60.

Cięcie prętów kalibrowanych realizowane jest z wykorzystaniem matrycy z nożami okrągłymi. Zastosowanie niewielkiego luzu ( $0,3 \pm 0,5$  mm) pomiędzy średnicą otworu noża, a średnicą pręta umożliwia uzyskanie wysokiej jakości i dużej dokładności ciętych elementów. Dzięki wydłużeniu krawędzi tnącej noża okrągłego, uzyskuje się jego dużą trwałość. Pozwala to obniżyć koszty cięcia i poprawić wydajność procesu [149]. Schemat procesu cięcia prętów w matrycy z nożami okrągłymi przedstawiono na rys. 1.61.



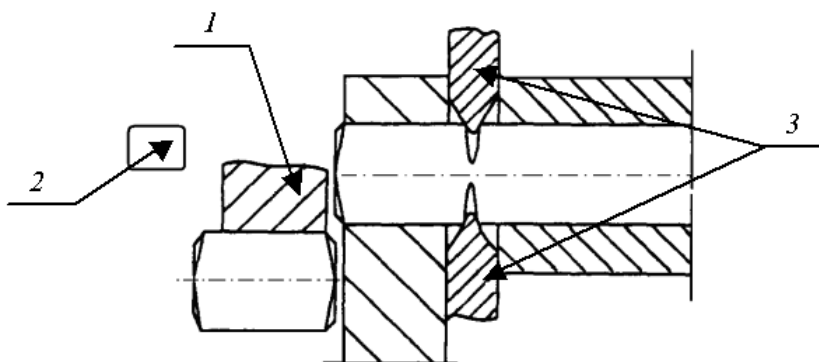
**Rys. 1.60.** Matryca jednowykrojowa do cięcia prętów na prasach korbowych [176]:  
 1 – opór, 2 – pręt przecinany, 3 – nóż nieruchomy, 4 – nóż ruchomy, 5 – płyta dociskająca, 6 – uchwyt, 7 – płyta górna, 8 – płyta dolna, 9 – podparcie



**Rys. 1.61.** Matryca z nożami okrągłymi do cięcia prętów kalibrowanych [149]: 1 – nóż ruchomy, 2 – nóż nieruchomy

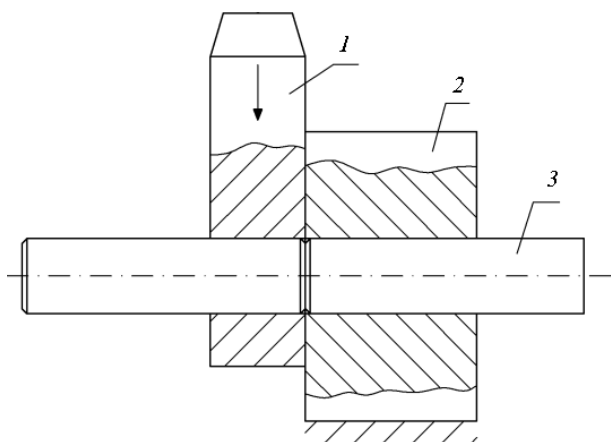


Istotnym rozwiązaniem technologicznym, które wpływa na poprawę jakości przecinanej powierzchni jest nacięcie pierścieniowego karbu (w kształcie litery V) na całym obwodzie pręta, lub wyciśnięcie dwóch klinowych rowków w górnej i w dolnej części pręta [12]. Proces cięcia realizowany jest w specjalnym urządzeniu (rys. 1.62) lub na typowych nożycach z podtrzymaniem pręta i ciętego elementu (rys. 1.63).



**Rys. 1.62.** Schemat procesu cięcia na nożycach pręta z wyciśniętymi rowkami klinowymi [11]: 1 – nóż ruchomy, 2 – zderzak, 3 – stemple do wyciskania rowków

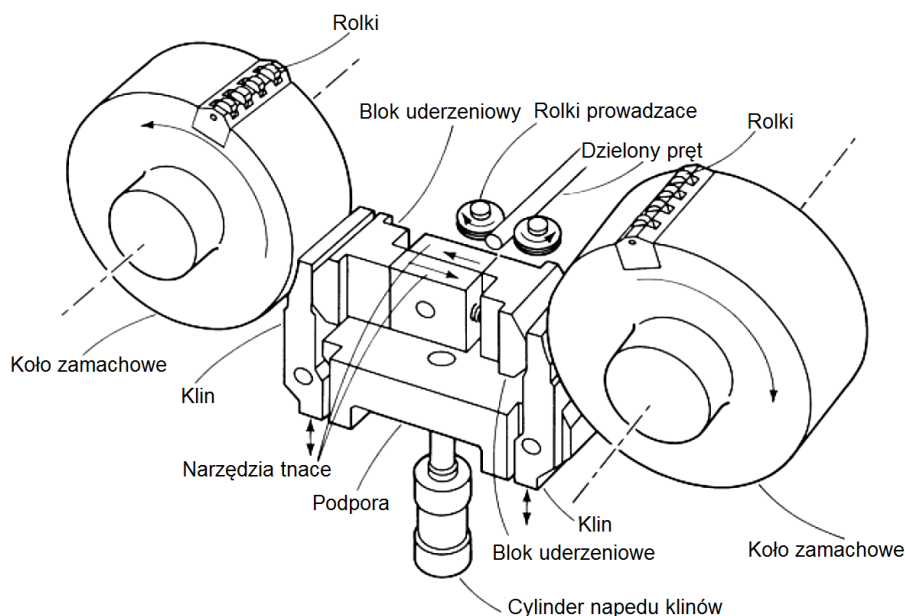
Półwyroby cięte tymi metodami charakteryzują się mniejszymi zniekształceniami krawędzi. Jednym z głównych czynników warunkujących jakość powierzchni czołowych jest prędkość noża tnącego [11]. Stwierdzono, że zwiększenie prędkości cięcia powoduje poprawę jakości przecinanych powierzchni [140].



**Rys. 1.63.** Schemat procesu cięcia pręta z karbem naciętym na całym obwodzie [140]: 1 – nóż ruchomy, 2 – nóż nieruchomy, 3 – pręt przecinany

### 1.3.2. Dzielenie z wykorzystaniem obciążeń uderowych

Rozdzielenie materiału może być efektem oddziaływania narzędzi, poruszających się z dużymi prędkościami (powyżej 10 m/s). Dzięki dużym prędkościom uzyskuje się gładką powierzchnię cięcia, które jest efektem plastycznego pęknięcia materiału. Proces cięcia uderowego jest wykorzystywany do dzielenia prętów ciągnionych i szlifowanych o średnicach do 100 mm. Dokładność ciętych elementów jest bardzo wysoka (pole tolerancji ciętych elementów może wynosić zaledwie +/- 0,15) [1]. Schemat realizacji procesu cięcia uderowego pokazano na rys. 1.64.

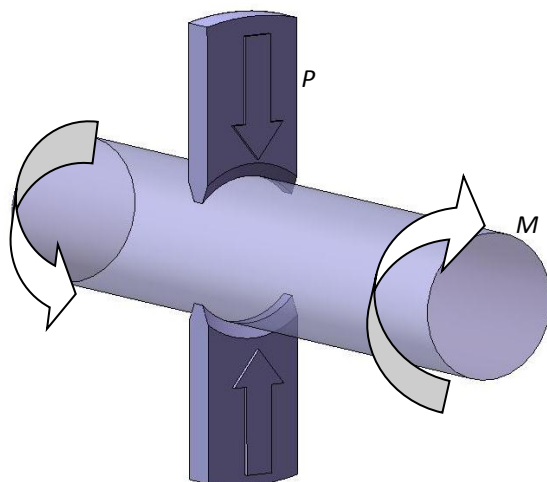


**Rys. 1.64.** Schemat cięcia uderowego prętów ciągnionych [1]

### 1.3.3. Dzielenie w wyniku pęknięcia materiału

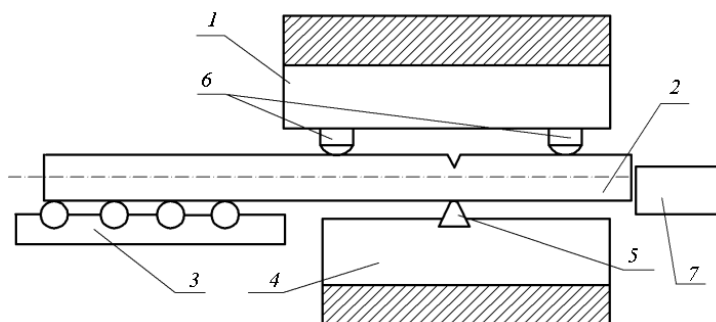
Występuje szereg metod, w których rozdzielenie materiału zachodzi w wyniku pęknięcia. Proces dzielenia bezwiórowego w wyniku pęknięcia materiału można zrealizować bez karbu [148] lub z wykorzystaniem karbu, który prowadzi do koncentracji naprężenia [41].

Jednym ze sposobów dzielenia, wykorzystujących zjawisko pęknięcia jest metoda oparta na działaniu momentu obrotowego i naprężeniach ściskających. Schemat dzielenia materiału tą metodą pokazano na rys. 1.65. Pomimo stosunkowo prostej realizacji, technologia ta nie znalazła zastosowania w skali przemysłowej. Głównym powodem ograniczeń w jej stosowaniu jest zła jakość powierzchni czołowych oraz odkształcenia plastyczne zachodzące w całej objętości materiału.



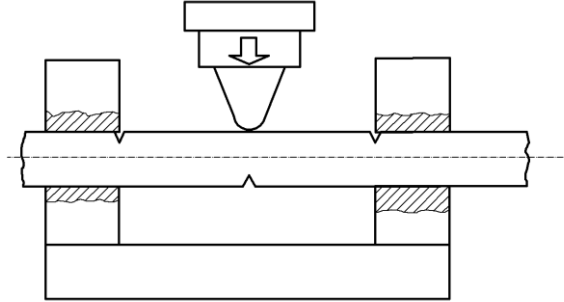
**Rys. 1.65.** Schemat dzielenia bezwiórowego oparty na działaniu momentu obrotowego  $M$  i naprężeń ściskających ( $P$  – siła ściskająca) [154]

Natomiast szeroko stosowane na skalę przemysłową są metody dzielenia bezwiórowego, w których wykorzystuje się spiętrzenie naprężeń, wywołane działaniem karbu [176]. W takich warunkach proces dzielenia może być realizowany jako łamanie lub przeginanie z jednoczesnym ruchem obrotowym pręta. Wielkość, kształt i sposób wykonania karbu zależy od przyjętej technologii dzielenia. Łamanie jest stosowane do dzielenia materiałów o dużych przekrojach oraz stali wysokostopowych. Tą metodą można dzielić metal o średnicy 70÷300 mm. Polega ona na wykonaniu na pręcie rowka (karbu), a następnie na złamaniu pręta na prasie lub na specjalnym urządzeniu tzw. łamaczu – rys. 1.66 [154, 176]. Najczęściej karb otrzymuje się przez wygniatanie. Podczas gięcia dochodzi do koncentracji naprężeń w obszarze uprzednio wykonanego karbu. Spotykane są również rozwiązania, które umożliwiają równoczesne dzielenie (przy jednym ruchu suwaka prasy) pręta na trzy półwyroby (rys. 1.67) [154, 176].



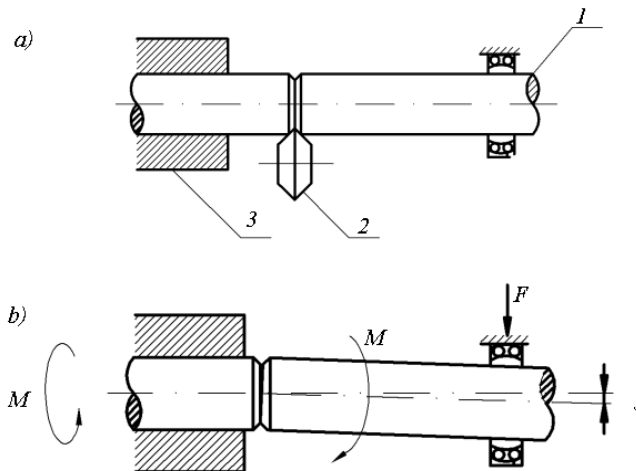
**Rys. 1.66.** Schemat łamania materiału na prasie [176, 154]: 1 – suwak prasy, 2 – materiał, 3 – transporter rolkowy, 4 – stół prasy, 5 – łamacz, 6 – opory, 7 – zderzak

Główną wadą dzielenia bezwiórowego opartego na łamaniu, jest niska jakość powierzchni czołowych dzielonych elementów. Koniecznym staje się wówczas stosowanie dużych nadatków na dalszą obróbkę lub nawet stosowanie dodatkowych operacji.



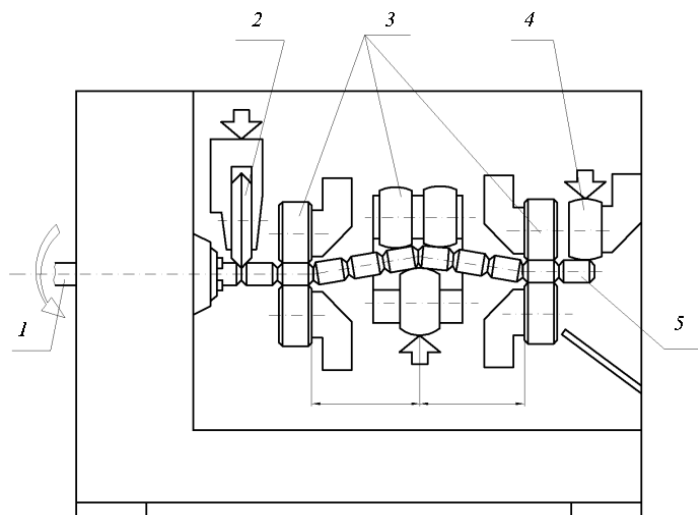
**Rys. 1.67.** Schemat procesu jednoczesnego łamania pręta na kilka odcinków [145]

Drugą grupą metod dzielenia bezwiórowego metalowych prętów okrągłych stanowią technologie, które wykorzystują działanie karbu wykonanego na całym obwodzie pręta. Natomiast proces przeginięcia jest realizowany podczas obracania dzielonego materiału. Spotyka się różne rozwiązania konstrukcyjne narzędzi i przyrządów, umożliwiające realizację procesu. Jednak prawie zawsze dzielenie przebiega w dwóch operacjach [145]: pierwsza polega na wygnieceniu lub nacięciu karbu na obwodzie pręta, a druga na przeginianiu oddzielanego elementu podczas jego ruchu obrotowego. Schemat jednego z takich procesów dzielenia, zaproponowany przez Hideaki Kudo [41], przedstawiono na rys. 1.68.



**Rys. 1.68.** Schemat procesu dzielenia bezwiórowego z wygnieceniem karbu na całym obwodzie pręta [41]: a) wykonywanie karbu, b) łamanie poprzez przeginianie obrotowe; 1 – dzielony pręt, 2 – nóż wygniatający karb, 3 – uchwyt

Inne rozwiązanie, które znalazło zastosowanie przemysłowe, głównie ze względu na dużą wydajność i łatwą automatyzację przedstawiono na rys. 1.69. W procesie tym łamanie odbywa się poprzez wygniecie nożem obrotowym karbu na obwodzie pręta, następnie dzięki wielokrotnemu, obrotowemu przeginananiu następuje rozdzielanie odcinanego elementu (w ostatniej fazie rolka 4 oddziela pojedynczy element). Zalecany dla tej metody stosunek długości do średnicy odcinanego elementu wynosi  $l \geq 0,3d_0$ .

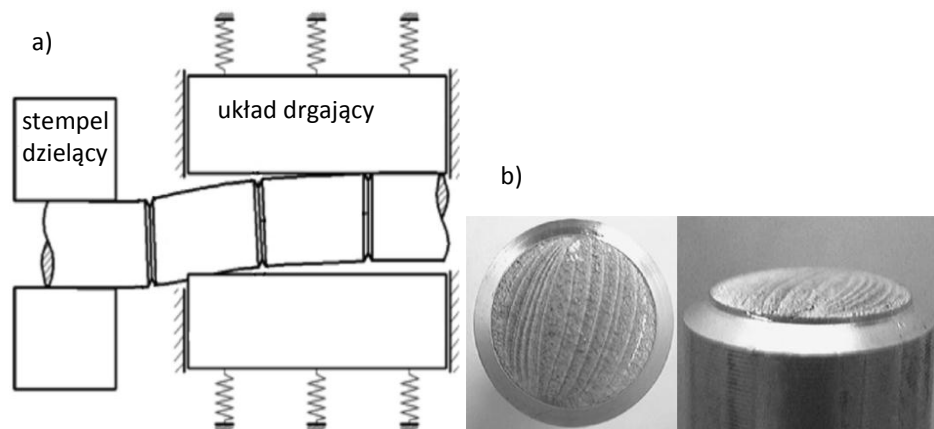


**Rys. 1.69.** Schemat procesu dzielenia bezwiórowego w linii technologicznej [144]:  
1 – materiał, 2 – nóż wygniatający karb, 3 – układ rolek przeginająco-obracających,  
4 – rolka odcinająca, 5 – element oddzielany

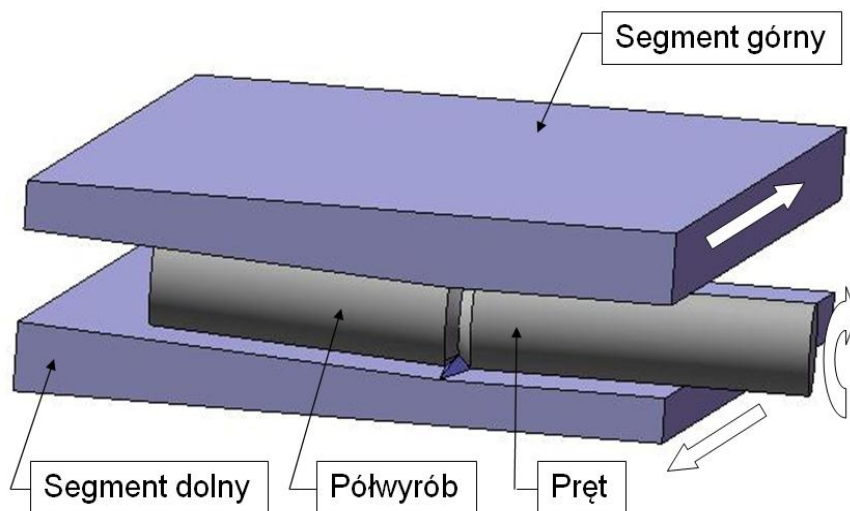
Kolejna grupa metod, które należy wskazać z uwagi na rezultaty uzyskiwane w zakresie jakości dzielonych powierzchni, to technologie wykorzystujące drgania w czasie ruchu roboczego narzędzi. Schemat tego procesu wraz z fotografią powierzchni rozdzielonych elementów pokazano na rys. 1.70 [204].

Stosunkowo nową metodą, rozwijaną przez autora jest dzielenie bezodpadowe prętów, bazujące na technologii walcowania poprzeczno-klinowego [72, 155]. Sposób został opracowany w oparciu o schemat dzielenia, zaproponowany przez Kudo [196]. Technologia jest bardzo obiecująca i polega na wykonaniu na obwodzie pręta rowka w kształcie litery V, a następnie na wielokrotnym przeginananiu obrotowym oddzielanego odcinka półfabrykatu. W wyniku cyklicznie zmiennych naprężeń w obszarze wykonanego karbu dochodzi do pęknięcia metalu. Proces dzielenia może być przeprowadzony narzędziami płaskimi (rys. 1.71), które montuje się na płytach walcarek płaskoklinowych. Na powierzchniach roboczych narzędzi wyróżnia się dwie strefy. W pierwszej strefie narzędzia posiadają klinowy występ, kształtujący

pierścieniowy rowek. Druga strefa narzędzi jest pochylona w stosunku do płaszczyzny płyt i powoduje cykliczne przeginięcie toczącego się pręta.



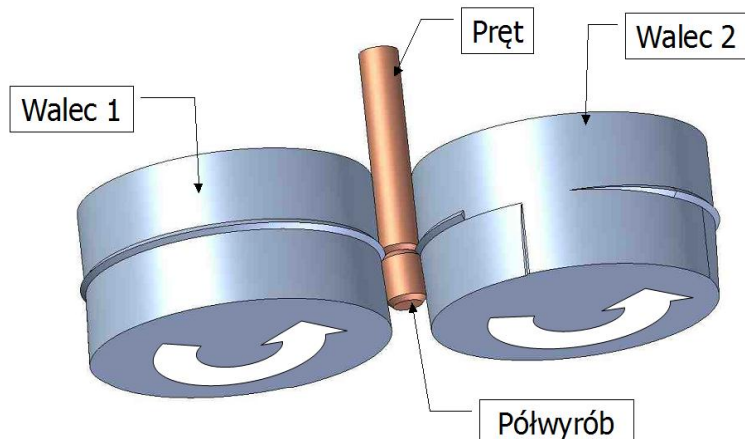
**Rys. 1.70.** Schemat procesu dzielenia z wykorzystaniem drgań w czasie ruchu roboczego stempla: a) schemat narzędzi, b) widok powierzchni czołowej dzielonego pręta [204]



**Rys. 1.71.** Schemat procesu dzielenia bezodpadowego płaskimi narzędziami

Dzielenie proponowaną metodą można zrealizować także za pomocą narzędzi w kształcie walców. W czasie procesu dzielony pręt umieszczony jest między walcami, które obracają się ze stałą prędkością w tym samym kierunku (rys. 1.72). Na walcach (podobnie jak na narzędziach płaskich) można również wyodrębnić dwie strefy. W pierwszej znajduje się klinowy występ, który kształtuje

na obwodzie pręta pierścieniowy rowek, zaś w drugiej strefie umieszczone są stożkowe powierzchnie, które powodują cykliczne przeginanie pręta podczas jego obracania, aż do całkowitego pęknięcia materiału.

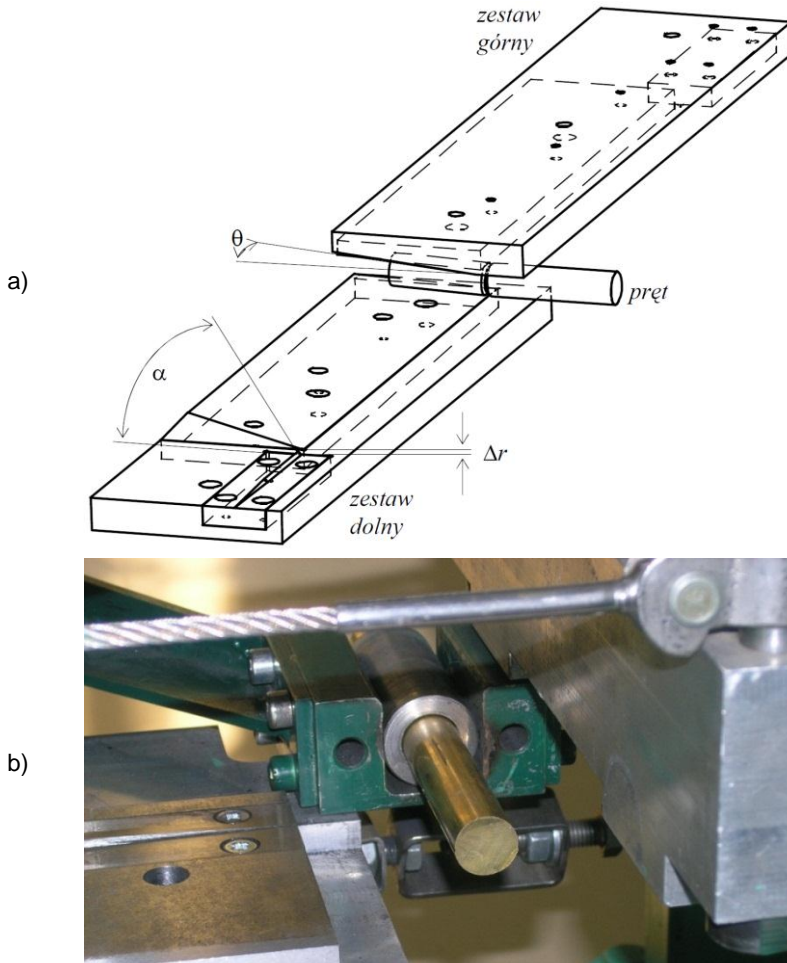


**Rys. 1.72.** Schemat procesu dzielenia bezodpadowego narzędziami w kształcie walców

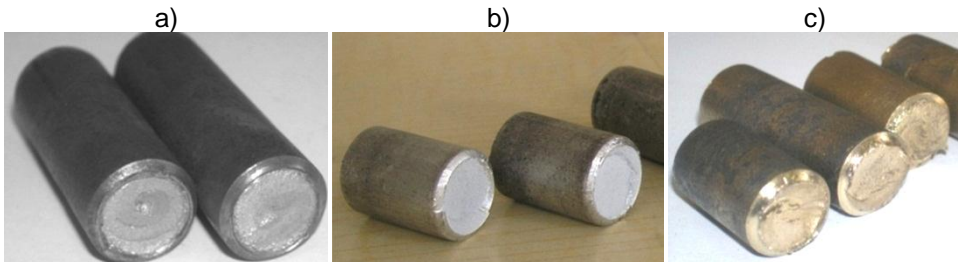
Zaletą technologii dzielenia bezodpadowego jest uniwersalność, która przejawia się możliwością cięcia prętów o różnych średnicach z wykorzystaniem jednego zestawu narzędzi. Atutem jest również realizacja procesu cięcia w czasie jednej operacji, gdzie w trakcie jednego ruchu roboczego narzędzi zostaje wykonany pierścieniowy rowek, po czym dochodzi do cyklicznego przeginania pręta, aż do jego całkowitego oddzielenia. Istotną jest także prosta konstrukcja narzędzi oraz nieskomplikowana kinematyka ruchu, co wpływa na obniżenie kosztów realizacji procesu.

Technologia dzielenia bezodpadowego została stosunkowo dokładnie przebadana przez autora, czego potwierdzeniem są liczne publikacje na ten temat [150–152, 155]. Wykonane symulacje numeryczne oraz próby doświadczalne procesu, które przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem walcarki płaskoklinowej (rys. 1.73), ostatecznie potwierdziły przydatność technologii. Uzyskane półwyroby charakteryzowały się zadowalającą powierzchnią rozdzielania, wolną od wad, które występują podczas łamania prętów innymi metodami (rys. 1.74). W trakcie zrealizowanych badań określono również optymalny zakres parametrów dzielenia, a także rozpoznano zjawiska ograniczające, które mogą uniemożliwić realizację procesu. Jednak okazało się, że zastosowanie walcarek płaskoklinowych do dzielenia prętów jest metodą mało efektywną. Związane jest to z cyklem roboczym maszyny, podczas którego 40% czasu stanowi ruch jałowy (ruch powrotny suwaka). Tego typu ograniczenia nie będą występowały w przypadku realizacji procesu w walcarkach z obrotowym ruchem narzędzi. Dlatego też w pełni zasadne jest prowadzenie dalszych prac

badawczych dzielenia bezodpadowego prętwów w obrotowych walcarkach poprzecznych.



**Rys. 1.73.** Próby dzielenia bezodparowego prętwów: a) schemat narzędzi płaskoklinowych, b) przestrzeń robocza walcarki z wsadem przygotowanym do dzielenia [153]



**Rys. 1.74.** Odcinki prętwów uzyskane podczas prób doświadczalnych dzielenia bezodpadowego: a) ze stali, b) ze stopu EN AW – AlMg4, c) z mosiądzu MO59





## 2. Cel i uzasadnienie podjęcia tematu

Jeszcze do niedawna sądzono, że walcowanie odkuwek jest opłacalne dopiero przy większych seriach produkcyjnych. Jednak wzrastające ceny surowców, energii i robocizny przyczyniły się do wzrostu opłacalności technologii walcowniczych już przy niewielkich partiach wytwarzanych wyrobów. Obecnie procesy walcowania kuźniczego wykorzystywane są do produkcji szerokiej gamy wyrobów, począwszy od przedkuwek, stanowiących półwyroby do dalszej przeróbki plastycznej po odkuwki i wyroby gotowe. Jednocześnie przewiduje się, że udział technologii walcowniczych w procesach wytwarzania części maszyn w dalszym ciągu będzie wzrastał. Przedstawiony przegląd stanu wiedzy w zakresie technologii walcowania kuźniczego oraz maszyn zabezpieczających realizację procesów wskazuje na niedobór uniwersalnych i tanich urządzeń walcowniczych. W związku z tym podjęto próbę uzupełnienia tej luki zarówno w zakresie innowacyjnych rozwiązań, jak również przygotowania oferty dla przemysłu.

Nadrzędnym celem pracy jest opracowanie konstrukcji uniwersalnej walcarki kuźniczej, przeznaczonej do realizacji procesów walcowania kuźniczego wzdłużnego, walcowania poprzeczno-klinowego oraz dzielenia bezodpadowego.

Osiągnięcie celu będzie możliwe poprzez realizację zadań cząstkowych, takich jak:

- określenie możliwości wykorzystania maszyn uniwersalnych w realizacji odmiennych kinematycznie procesów walcowania wzdłużnego i poprzecznego,
- opracowanie konstrukcji uniwersalnej walcarki kuźniczej o parametrach umożliwiających walcowanie odkuwek w warunkach przemysłowych (typowych odkuwek i przedkuwek walcowanych przez kuźnie),
- wykonanie prototypu walcarki,
- opracowanie efektywnych procesów walcowania kuźniczego: wzdłużnego, poprzeczno-klinowego i bezodpadowego dzielenia prętów oraz weryfikacja tych parametrów przy użyciu uniwersalnej walcarki kuźniczej,
- przygotowanie oferty dla przemysłu, uwzględniającej wyniki wykonanych badań.

Przeprowadzona analiza struktury obecnie wytwarzanych wyrobów w oparciu o technologie walcowania kuźniczego wskazuje, że wielozadaniowe maszyny kuźnicze mogą cieszyć się dużym zainteresowaniem wśród krajowych i zagranicznych zakładów z branży kuźniczej. Niestety obecnie na rynku brak jest

takich maszyn, zaś oferowane przez wytwórców maszyny specjalizowane (walcarki poprzeczne i wzdłużne) są stosunkowo drogie i dedykowane do kształtowania wąskiej grupy wyrobów. W przypadku krótkich serii produkcyjnych szerokiej gamy wyrobów, zakup dwóch maszyn specjalizowanych staje się nieopłacalny. W rezultacie kuźnie zmuszone są do wykorzystywania alternatywnych technologii, które charakteryzują się większą materiałowo- i energochłonnością, co jest przyczyną niskiej konkurencyjności takich zakładów. Należy przy tym zaznaczyć, że procesy walcownicze charakteryzują się szeregiem zalet, do których można zaliczyć między innymi: niewielkie straty materiałowe, dobre własności wytrzymałościowe, małe siły kształtowania, łatwą automatyzację i mechanizację oraz dużą uniwersalność i elastyczność technologii. Również dużym potencjałem charakteryzują się procesy dzielenia bezodpadowego, które z powodzeniem mogą być realizowane w walcarkach uniwersalnych.

W związku z powyższym za celowe uznano opracowanie własnej konstrukcji walcarki kuźniczej, która dzięki swojej uniwersalności będzie dostosowana do indywidualnych potrzeb jak największej liczby zakładów kuźniczych.

### **3. Uniwersalna walcarka kuźnicza**

Krajowy przemysł kuźniczy charakteryzuje się dużą różnorodnością asortymentu wytwarzanych wyrobów, przy stosunkowo niewielkich seriach produkowanych odkuwek. W rezultacie taka specyfika produkcji powoduje konieczność stosowania dość szerokiej grupy maszyn kuźniczych, zabezpieczających realizację procesu produkcyjnego. Tendencja ta widoczna jest również w przypadku procesów walcowania kuźniczego, gdzie kuźnie wykorzystują różnego typu walcarki do kształtowania odkuwek i przedkuwek. Obecnie oferowane przez producentów walcarki kuźnicze przeznaczone są głównie do realizacji jednego z dwóch schematów walcowania: wzdłużnego lub poprzecznego. Natomiast brak jest maszyn uniwersalnych, które zabezpieczyłyby realizację procesów zarówno walcowania wzdłużnego, jak i poprzecznego. Ponadto dostępne na rynku walcarki kuźnicze (głównie producentów zagranicznych) są stosunkowo drogie, a ich eksploatacja staje się opłacalna dopiero w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej. W związku z powyższym za celowe uznano rozwijanie własnych konstrukcji walcarek kuźniczych, dostosowanych do potrzeb krajowego rynku kuźniczego.

#### **3.1. Główne założenia konstrukcyjne uniwersalnej walcarki kuźniczej**

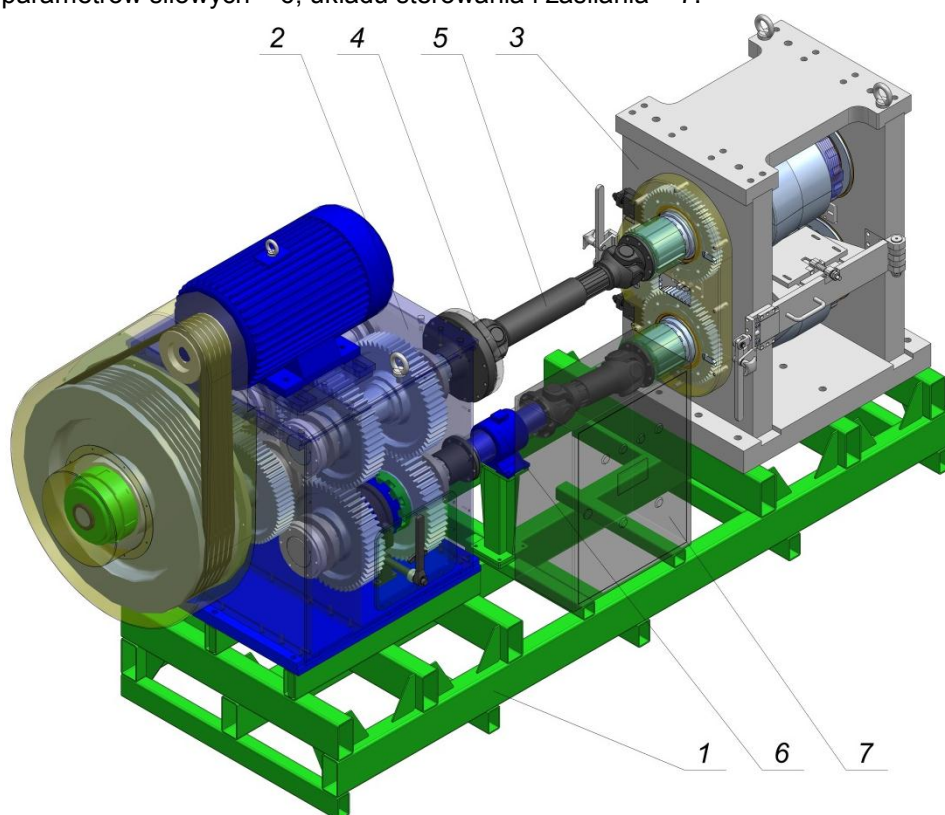
Określenie cech konstrukcyjno-technologicznych maszyny jest podstawowym etapem prac projektowych i wpływa na trafność przyjętych rozwiązań. Głównym założeniem, determinującym konstrukcję maszyny była możliwość zmiany kierunku obrotów walców. W rezultacie takie rozwiązanie pozwala na realizację procesów walcowania poprzecznego (walce obracają się w tym samym kierunku) oraz walcowania wzdłużnego (walce obracają się w przeciwnych kierunkach) w jednym agregacie. W oparciu o przeanalizowany asortyment odkuwek wydłużonych, kształtowanych przez krajowe kuźnie założono wymiary narzędzi. Przyjęto, że średnica robocza walców powinna zapewnić możliwość umieszczenia na nich narzędzi klinowych o długości w rozwinięciu do 1400 mm (walcowanie poprzeczno-klinowe), zaś w przypadku walcowania wzdłużnego, możliwość kształtowania odkuwek o długości do 900 mm. Ze względów eksploatacyjnych walce po wykonaniu pełnego obrotu powinny mieć możliwość zatrzymania. Konstrukcja narzędzi powinna zapewnić łatwe i szybkie przebrojenie maszyny. Dodatkowo z uwagi na laboratoryjny charakter maszyny, walcarka powinna być wyposażona w układ pomiarowy do rejestracji parametrów

siłowych procesu. Ponadto, walcarka powinna charakteryzować się zwartą i sztywną konstrukcją.

### 3.2. Konstrukcja walcarki kuźniczej

Zaprojektowana walcarka charakteryzuje się dużą uniwersalnością, która wynika z możliwości realizacji dwóch odmiennych kinematycznie procesów walcowania kuźniczego: wzdłużnego i poprzecznego, a także dzielenia bezodpadowego półfabrykatów. W rezultacie jej możliwości technologiczne są znacznie większe, niż maszyn obecnie stosowanych w przemyśle. W zestawieniu z asortymentem wyrobów produkowanych przez kuźnie można sądzić, że tego typu maszyny znajdą uznanie wśród przedsiębiorców.

Uniwersalna walcarka kuźnicza ma segmentową strukturę i składa się z siedmiu podstawowych zespołów (rys. 3.1): ramy nośnej – 1, zespołu napędowego – 2, klatki walców roboczych – 3, zespołu sprzęgła ustawiania kąтового narzędzi – 4, układu przeniesienia napędu – 5, układu pomiarowego parametrów siłowych – 6, układu sterowania i zasilania – 7.



**Rys. 3.1.** Model przestrzenny uniwersalnej walcarki kuźniczej: 1 – rama nośna, 2 – zespół napędowy, 3 – klatka robocza, 4 – sprzęgło ustawiania kąтового narzędzi, 5 – wały przegubowe, 6 – przetwornik momentu obrotowego, 7 – skrzynka elektryczna

Rama nośna wykonana jest jako ażurowa konstrukcja spawana z zamkniętych kształtowników hutniczych o przekroju prostokątnym. Do ramy przymocowano z jednej strony zespół napędowy, natomiast z drugiej strony klatkę walców roboczych. Do przekazania momentu obrotowego z zespołu napędowego do klatki walców roboczych wykorzystuje się układ przeniesienia napędu, który składa się z dwóch handlowych wałów przegubowych. W układzie przeniesienia napędu na górny wałek klatki roboczej umieszczono sprzęgło, umożliwiające ustawianie położenia kąтового narzędzi. Natomiast w układzie przeniesienia napędu na dolny wałek umieszczono zespół pomiarowy, składający się z przetwornika momentu obrotowego oraz przetwornika przemieszczenia kąтового. Układ pomiarowy wykorzystywany jest do rejestracji parametrów siłowych oraz kinematycznych procesu walcowania. Sygnały z przetworników rejestrowane są cyfrowo za pośrednictwem karty pomiarowej, współpracującej z komputerem osobistym PC. Dodatkowo walcarka została wyposażona w zintegrowany układ zasilania elektrycznego oraz sterowania. Umożliwia on zasilanie energią elektryczną napędowego silnika elektrycznego, oraz dodatkowego osprzętu sterującego.

Na podstawie opracowanej konstrukcji maszyny została wykonana prototypowa walcarka kuźnicza, którą zainstalowano w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie. Widok wykonanej maszyny pokazano na rys. 3.2. Schemat maszyny wraz z zaznaczonymi głównymi wymiarami przedstawiono na rys. 3.3. Natomiast ważniejsze dane techniczne uniwersalnej walcarki kuźniczej zestawiono w tabeli 3.1.



**Rys. 3.2.** Prototypowa walcarka kuźnicza do walcowania wzdłużnego, poprzecznego i dzielenia bezodpadowego

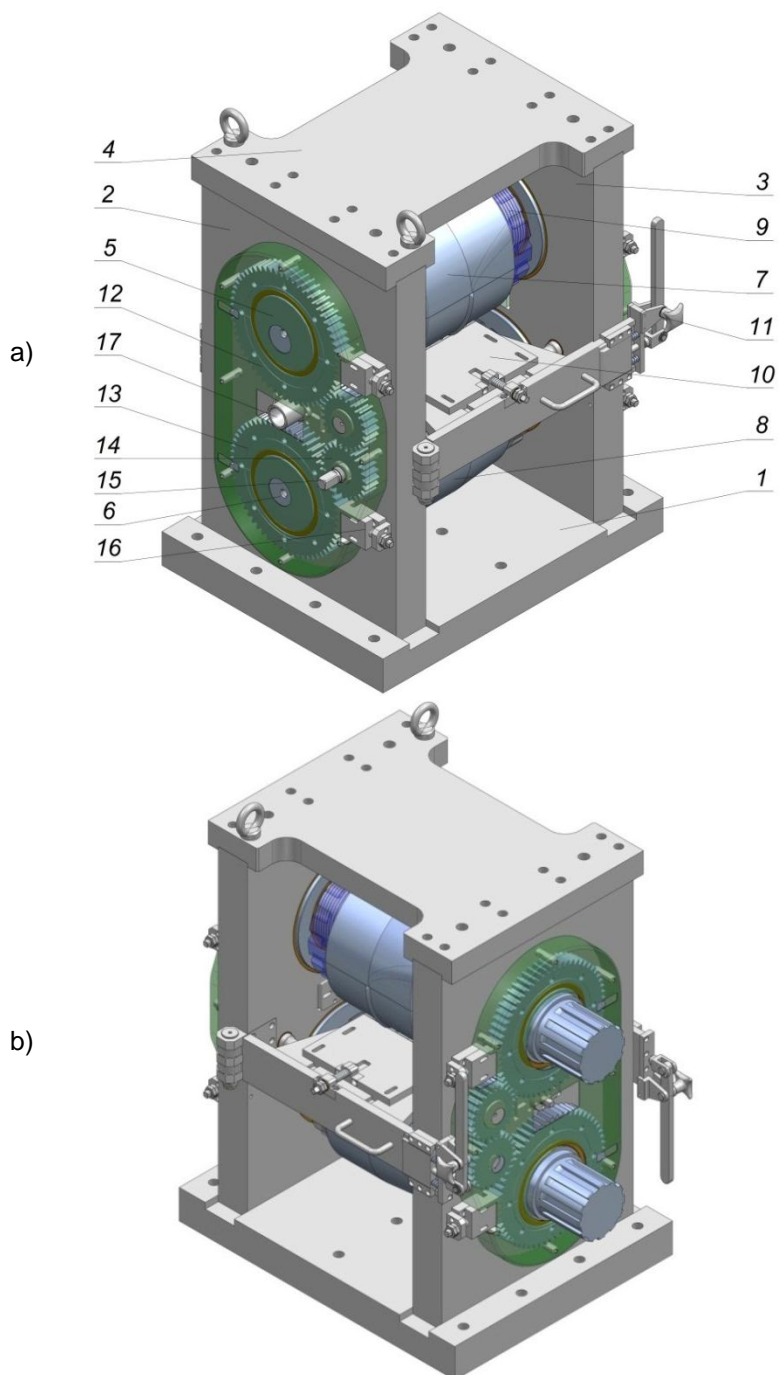


**Tab. 3.1.** Parametry użytkowe uniwersalnej walcarki kuźniczej

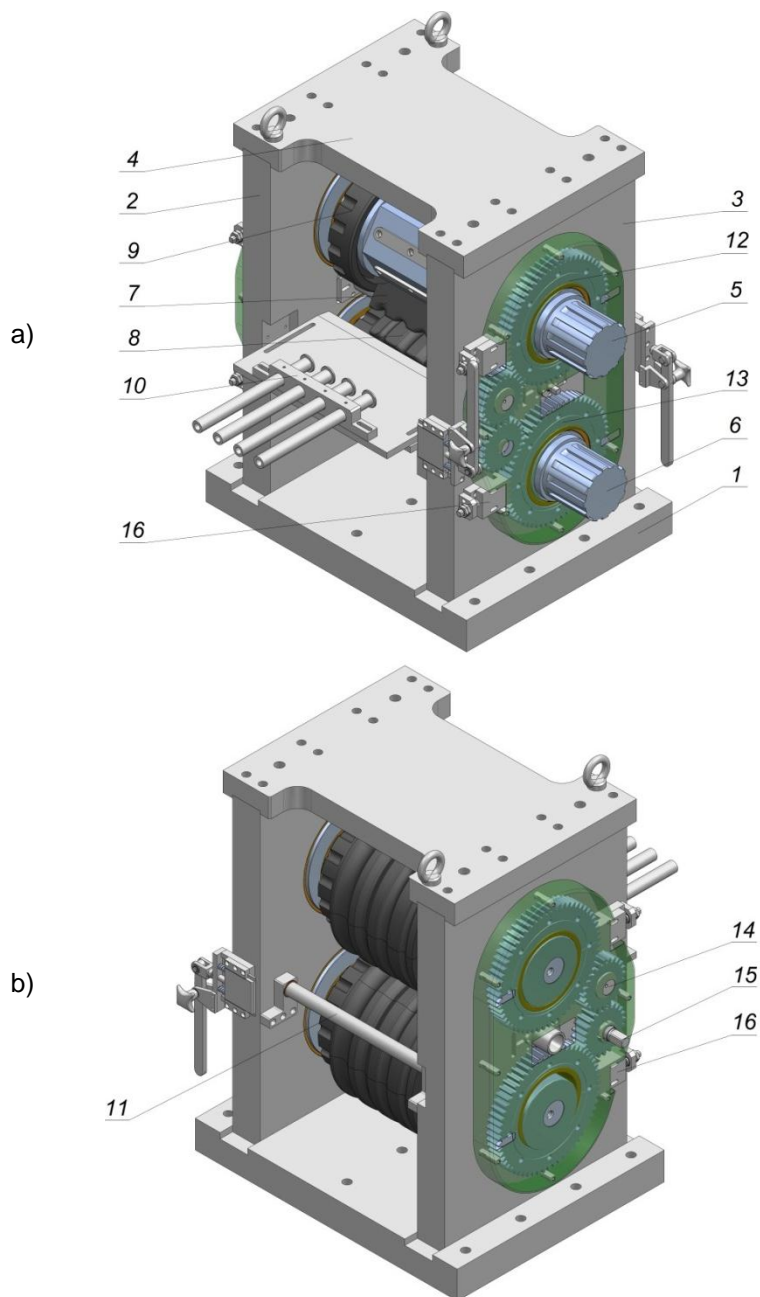
Moc silnika napędowego	kW	37
Prędkość obrotowa silnika elektrycznego	obr/min	960
Prędkość obrotowa wałów roboczych	obr/min	16,5
Moment nominalny na czopie wału napędowego	Nm	12500
Moment maksymalny na czopie wału napędowego	Nm	20000
Średnica nominalna walców	mm	430
Długość beczki walców	mm	300
Minimalna odległość osi	mm	430
Maksymalna odległość osi	mm	470
Masa maszyny	kg	9500
Wysokość maszyny	mm	2120
Szerokość maszyny	mm	1430
Długość maszyny	mm	3490

Podstawowym zespołem walcarki jest klatka walców roboczych (rys. 3.4) [156], w której realizowany jest proces odkształcania materiału. Korpus klatki walcowniczej wykonany jest jako konstrukcja składana z pionowych płyt stalowych – 2 i 3, które pełnią rolę stojaków. Spięte są one dwoma płytami poziomymi: dolną – 1, która stanowi podstawę klatki oraz górną – 4, która usztywnia konstrukcję. W stojakach klatki roboczej osadzono wały robocze – 5 i 6 z umieszczonymi na nich segmentami narzędziowymi – 7 i 8. Dwa wały robocze o osiach równoległych (znajdujących się w płaszczyźnie pionowej) położone są poziomo. W czasie pracy urządzenia, w zależności od konfiguracji walcarki wały mogą obracać się w tym samym kierunku z jednakowymi prędkościami (rys. 3.4) – walcowanie poprzeczne i dzielenie bezodpadowe lub w przeciwnych kierunkach (rys. 3.5) – walcowanie kuźnicze, wzdłużne. Wały robocze łożyskowane są w łożyskach ślizgowych, osadzonych w tulejach mimośrodowych, które to z kolei łożyskowane są ślizgowo w płytach pionowych korpusu klatki walcowniczej. Na czterech tulejach mimośrodowych, w których łożyskowane są wały walcarki znajdują się koła zębate – 12 i 13 o zębach prostych. Dolne i górne tuleje mimośrodowe są ze sobą sprzężone za pośrednictwem dwóch kół zębatach pośredniczących – 14. Do regulacji rozstawu osi walców służy wałek ustawczy – 15, który za pośrednictwem kół zębatach pośredniczących umożliwia jednoczesny obrót czterech tulei mimośrodowych względem korpusu klatki. Po ustawieniu odległości osi, położenie tulei mimośrodowych jest dodatkowo blokowane za pomocą czterech mechanizmów ustalających – 16. Klatka robocza w konfiguracji walcarki poprzecznej wyposażona jest w dwie uchylne prowadnice – 10, których zadaniem jest utrzymanie walcowanego półwyrobu w przestrzeni roboczej.





**Rys. 3.4.** Klatka robocza uniwersalnej walcarki kuźniczej w konfiguracji do walcowania poprzecznego i dzielenia bezodpadowego: a) widok od strony podawania wsadu, b) widok od strony czopów napędowych (opis w tekście)

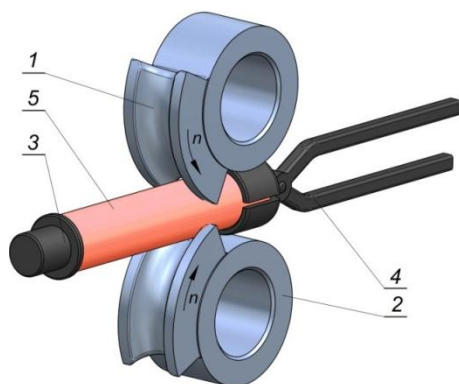


**Rys. 3.5.** Klatka robocza uniwersalnej walcarki kuźniczej w konfiguracji do walcowania kuźniczego wzdłużnego: a) widok od strony czopów napędowych, b) widok od strony mechanizmu regulacji rozstawu osi; 1 – płyta dolna, 2, 3 – płyty pionowe, 4 – płyta górna, 5, 6 – wały robocze, 7, 8 – segmenty narzędziowe, 9 – nakrętki mocowania narzędzi, 10 – komplet zderzaków ustalających, 11 – wspornik kleszczy, 12, 13 – koła mimośrodowe, 14 – koła pośrednie, 15 – wałek ustawczy, 16 – mechanizmy ustalające

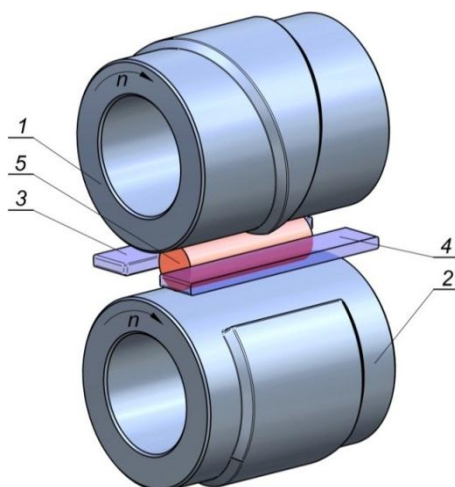
Po zamknięciu prowadnic są one ryglowane za pomocą dźwigniowych mechanizmów – 11. W zależności od średnicy walcowanych odkuwek, prowadnice mają możliwość płynnej regulacji położenia. Istnieje również możliwość wymiany głowic prowadnic w zależności od rodzaju realizowanego procesu walcowania i geometrii kształtowanych odkuwek. Półfabrykat do przestrzeni roboczej klatki walcowniczej podawany jest w podajniku – 17, który osadzono centralnie w stojaku zewnętrznym, pomiędzy wałami roboczymi.

Układ klatki roboczej w konfiguracji walcarki kuźniczej, wzdłużnej pokazano na rys. 3.5. Zasadnicza różnica do poprzednio opisywanej konfiguracji polega na zastąpieniu uchylnych prowadnic zespołem zderzaków ustalających – 10 oraz wspornikiem kleszczy – 11. Zadaniem zderzaków ustalających jest pozycjonowanie osiowe walcowanej odkuwki w przestrzeni roboczej narzędzi podczas kolejnych przepustów. Natomiast zadaniem wspornika jest podtrzymanie kleszczy wraz z półfabrykatem podczas procesu walcowania. Oprócz stosunkowo niewielkich różnic konstrukcyjnych klatek walcowniczych w konfiguracji walcarki poprzecznej i wzdłużnej występuje istotna różnica związana z kinematyką ruchu narzędzi.

Podczas walcowania wzdłużnego walce obracają się w przeciwnych kierunkach, a umieszczone na nich segmenty robocze (jedynie na części obwodu) chwytają materiał i wciągają go do kotliny walcowniczej, gdzie następuje jego zginiatanie i przemieszczanie wzdłuż osi walcowanej odkuwki (rys. 3.6).



**Rys. 3.6.** Schemat procesu wzdłużnego walcowania kuźniczego: 1 – segment narzędziowy górny, 2 – segment narzędziowy dolny, 3 – zderzak, 4 – kleszcze, 5 – wsad

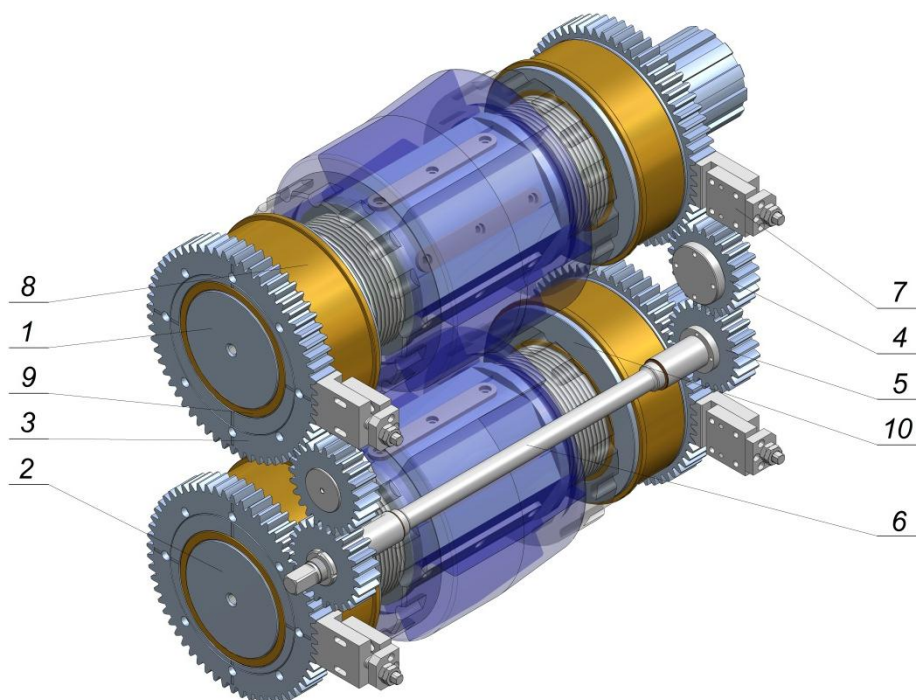


**Rys. 3.7.** Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego: 1 – segment narzędziowy górny, 2 – segment narzędziowy dolny, 3, 4 – prowadnice, 5 – wsad

Natomiast podczas walcowania poprzecznego oraz dzielenia bezodpadowego walce obracają się w tym samym kierunku, a wsad podawany jest do przestrzeni roboczej równoległe do osi walców i w trakcie procesu jest obracany przez walce dookoła swojej osi (rys. 3.7). Dodatkowo półwyrób utrzymywany jest w przestrzeni roboczej narzędzi przez dwie prowadnice. W celu uzyskania kinematyki ruchu walców zgodnej z zakładanym rodzajem walcowania, układ napędowy walcarki wyposażono w mechanizm pozwalający na zmianę kierunku obrotów jednego z walców. Sposób zmiany kierunku obrotów walca zostanie szczegółowo przedstawiony w dalszej części opracowania.

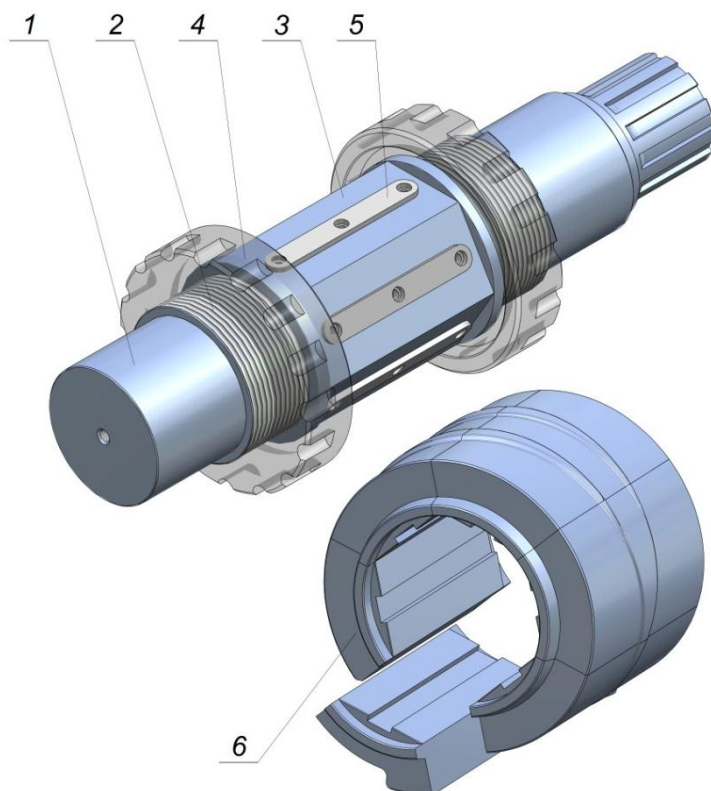
Walcarki kuźnicze, zarówno poprzeczne, jak i wzdłużne mają możliwość niewielkiej zmiany odległości osi. Jest to cecha, która jest niezbędna podczas eksploatacji maszyny. Dzięki zmianie odległości osi możliwe jest kompensowanie zużycia narzędzi poprzez zsuniecie osi walców. Funkcja ta pozwala również na regenerację narzędzi poprzez obniżenie wykroju, a następnie zsuniecie osi walców o obniżoną wartość. W przypadku dzielenia bezodpadowego możliwość zmiany odległości osi pozwala na łamanie prętów o różnych średnicach przy pomocy jednego kompletu narzędzi.

W większości walcarek kuźniczych do zmiany odległości osi wykorzystuje się układy śrubowe, które umożliwiają podnoszenie lub opuszczanie jednego z walców. W opisywanej konstrukcji zdecydowano się na zastosowanie mechanizmu mimośrodowego, który umożliwia jednoczesne rozsuwanie lub zsuwanie obydwu walców (rys. 3.8). Konstrukcję mechanizmu opracowano w ten sposób, aby umożliwić osiowe podawanie wsadu do przestrzeni roboczej niezależnie od sposobu walcowania i szczeliny między walcami. Wały robocze – 1 i 2 łożyskowane są w łożyskach ślizgowych – 9, które osadzono w tulejach mimośrodowych – 10. Cylindryczne powierzchnie zewnętrzne tulei mimośrodowych osadzone są w łożyskach ślizgowych – 8, które zostały umieszczone w gniazdach dwóch stojaków klatki walcowniczej. Do powierzchni czołowych tulei mimośrodowych przymocowano koła zębate – 3, które tworzą wspólny łańcuch kinematyczny z dwoma parami kół zębatych pośrednich – 4 i 5. W celu umożliwienia regulacji odległości osi walców, jedną parę kół pośrednich osadzono na wałku napędowym – 6. Obrót wałka napędowego powoduje jednakową zmianę położenia wszystkich czterech tulei mimośrodowych. Dzięki zastosowaniu dwóch par kół pośrednich, tuleje mimośrodowe umieszczone na wale górnym oraz na wale dolnym obracają się w przeciwnych kierunkach. W rezultacie podczas zmiany odległości osi płaszczyzna przechodząca przez osie walców pozostaje w położeniu pionowym. Nie zmienia się również wysokość położenia osi walcowania. Ma to istotne znaczenie na przebieg procesu walcowania oraz dokładność kształtu walcowanych odkuwek. Po ustawieniu żądanej odległości osi, wszystkie tuleje mimośrodowe blokowane są za pomocą mechanizmów blokujących – 7, co ma zabezpieczyć przed samoczynną zmianą położenia kąтового tulei mimośrodowych w czasie pracy walcarki.



**Rys. 3.8.** Mechanizm zmiany odległości osi: 1, 2 – wały robocze, 3 – koła zębate, 4, 5 – koła zębate pośrednie, 6 – wałek napędowy, 7 – mechanizm blokowania tulei mimośrodkowych, 8 – łożyska ślizgowe tulei mimośrodkowych, 9 – łożyska ślizgowe wałów roboczych, 10 – tuleje mimośrodkowe

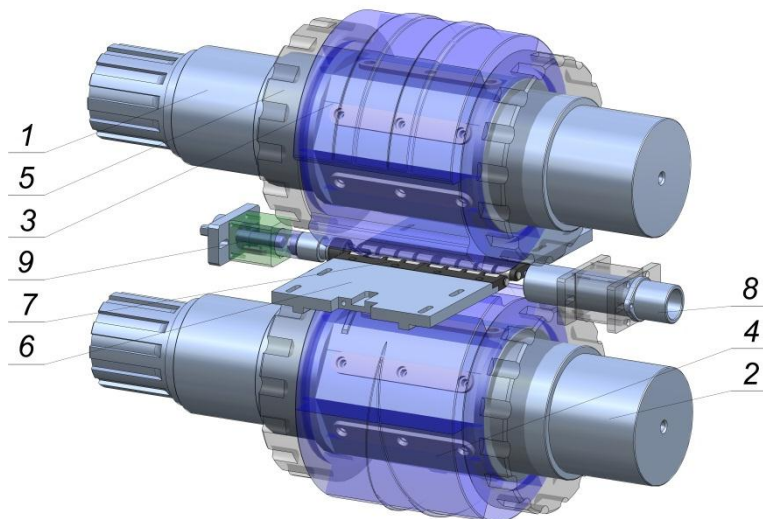
O uniwersalności urządzenia (oprócz cech technologicznych) decydują również koszty eksploatacyjne, a w szczególności koszty związane z wykonaniem narzędzi oraz czas potrzebny na przebrojenie maszyny. Dlatego też w celu ograniczenia tych kosztów zdecydowano się na zastosowanie budowy segmentowej narzędzi. W części centralnej wałów roboczych (w miejscu mocowania narzędzi) wykonano stopień o przekroju sześciokątnym – 3, który ograniczono z dwóch stron stopniami gwintowanymi – 2. Wykroje robocze każdego z walców tworzy sześć segmentów narzędziowych – 6, wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco. Segmenty mocowane są do wałów głównych walcarki za pomocą dwóch czołowych nakrętek – 4, co umożliwia łatwą wymianę oprzyrządowania. Przeniesienie momentu obrotowego z wału na narzędzia zapewniają wpusty pryzmatyczne – 5.



**Rys. 3.9.** Sposób mocowania narzędzi na wałach roboczych walcarki: 1 – wał roboczy, 2 – stopień gwintowany, 3 – stopień centralny o przekroju sześciokątnym, 4 – nakrętka czołowa, 5 – wpust, 6 – zestaw segmentów narzędziowych

Liczba wykorzystywanych segmentów narzędziowych uzależniona jest od sposobu walcowania oraz kształtu walcowanych odkuwek. W przypadku walcowania poprzecznego lub dzielenia bezodpadowego segmenty narzędziowe zazwyczaj umieszczone są na całym obwodzie walca (sześć segmentów). Również kształt wykrojów, umieszczonych na powierzchniach segmentów narzędziowych będzie związany ze sposobem walcowania i rodzajem kształtowanych odkuwek. Schemat rozmieszczenia narzędzi do walcowania poprzecznego pokazano na rys. 3.10. Na wałach roboczych – 1 i 2 zostały umieszczone segmenty narzędziowe o klinowej powierzchni roboczej – 3 oraz 4. Zestawy segmentów utwierdzono przy pomocy nakrętek czołowych – 5. W płaszczyźnie poziomej, przechodzącej przez oś walcowania umieszczono dwie prowadnice – 6, które mają wymienne głowice – 7. Możliwe jest tutaj zastosowanie głowic obrotowych, co pozwala na zmniejszenie oporów walcowania, lub głowic stałych, które są w stanie przenieść większe obciążenia. Półfabrykat do przestrzeni roboczej podawany jest wzdłuż osi walcowania w podajniku – 8. Ustalenie osiowe wsadu realizowane jest przy pomocy

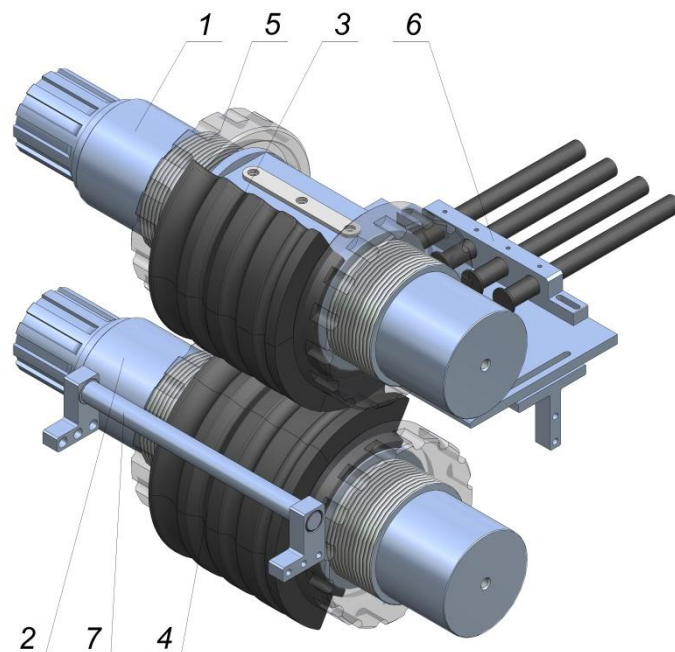
zderzaka – 9, który zaopatrzony jest w sprężystą głowicę, dzięki której walcowana odkuwka może swobodnie wydłużać się. Zarówno podajnik wsadów, jak i zderzak mają możliwość liniowego przemieszczenia w płaszczyźnie poziomej, przechodzącej przez oś walcowania. Pozwala to na zachowanie współosiowości głowicy zderzaka i otworu tulei podajnika z osią walcowania podczas zmiany odległości osi walców.



**Rys. 3.10.** Sposób uzbrojenia przestrzeni roboczej walcarki do walcowania poprzecznego:  
1, 2 – wały robocze, 3, 4 – zestawy segmentów roboczych, 5 – nakrętka czołowa,  
6 – prowadnice boczne, 7 – wymienne głowice prowadnic, 8 – podajnik wsadów,  
9 – zderzak

Do wzdłużnego walcowania kuźniczego wykorzystywane są segmenty narzędziowe, które montuje się jedynie na części obwodu walców (maksymalnie do 270° na obwodzie walców [53]). Na powierzchniach roboczych segmentów wykonane są wykroje w kształcie bruzd, w których następuje zgniatanie materiału podczas obrotu walców. Schemat uzbrojenia walcarki do walcowania kuźniczego wzdłużnego pokazano na rysunku 3.11. Sposób mocowania segmentów jest identyczny, jak podczas montażu narzędzi do walcowania poprzecznego. Natomiast prowadnice boczne zostają zastąpione przez zespół zderzaków – 6 oraz wspornik – 7. W proponowanym rozwiązaniu zastosowano cztery zderzaki, których położenie można niezależnie ustawiać. W rezultacie możliwe jest walcowanie odkuwek i przedkuwek w czterech wykrojach (przepustach). Podczas walcowania kuźniczego, wzdłużnego wsad podawany jest do przestrzeni roboczej kleszczami, prostopadle do osi walców. W tym celu jedną z prowadnic bocznych zastąpiono wspornikiem, na którym kowal wspiera kleszcze wraz z wsadem w początkowych etapach walcowania. Jednak taki proces jest mało wydajny, a dokładność odwalcowanych odkuwek w dużym

stopniu zależy od doświadczenia kowala. W bardziej zaawansowanych konstrukcjach walcarek specjalizowanych, przeznaczonych tylko do walcowania kuźniczego wzdłużnego, półfabrykat do przestrzeni roboczej podawany jest w sposób mechaniczny przez manipulator, który może być sterowany mechanizmem dźwigniowym od wałów głównych walcarki lub numerycznie, przy pomocy procesora, umieszczonego w sterowniku. W rezultacie możliwe jest znaczne zwiększenie wydajności walcowania oraz poprawa bezpieczeństwa pracy. Również dokładność i powtarzalność walcowanych odkuwek z wykorzystaniem automatycznego podawania materiału będzie znacznie lepsza. Dlatego też w zaprojektowanej walcarce przewidziano możliwość współpracy z urządzeniami mechanizującymi i automatyzującymi proces.



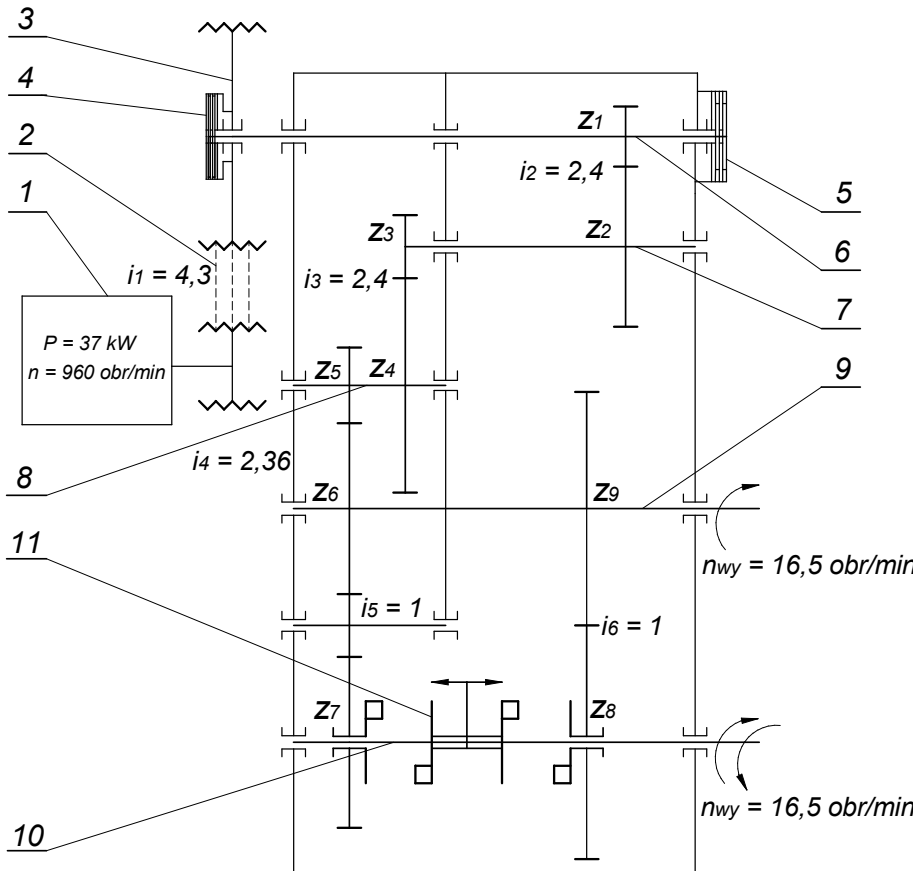
**Rys. 3.11.** Sposób uzbrojenia przestrzeni roboczej walcarki do walcowania kuźniczego, wzdłużnego: 1, 2 – wały robocze, 3, 4 – zestawy segmentów roboczych, 5 – nakrętka czołowa, 6 – zespół zderzaków, 7 – wspornik

Urządzenia takie sterowane byłyby numerycznie na podstawie sygnałów dostarczanych z przetworników położenia kąтового wałów walcarki oraz przetworników położenia materiału, umieszczonych w zderzakach.

W celu zrealizowania założonej kinematyki ruchu narzędzi zaprojektowano specjalny układ napadowy walcarki [157]. Składa się on z wielostopniowej przekładni zębatej, napędzanej silnikiem elektrycznym za pośrednictwem przekładni pasowej i koła zamachowego. Schemat kinematyczny układu napadowego pokazano na rysunku 3.12. Podstawowym zespołem układu



napędowego jest trójstopniowa przekładnia zębata o całkowitym przełożeniu  $i = 13,5$ . Przekładnia posiada dwa wały zdawcze (wyjściowe), z których przekazywany jest napęd na wały robocze walcarki. Przekładnia zębata napędzana jest przy pomocy trójfazowego silnika elektrycznego – 1 o mocy  $P = 37$  kW, który za pośrednictwem przekładni pasowej – 2 o przełożeniu  $i_1 = 4,5$  napędza koło zamachowe – 3 osadzone obrotowo na czopie wału wejściowego – 6.



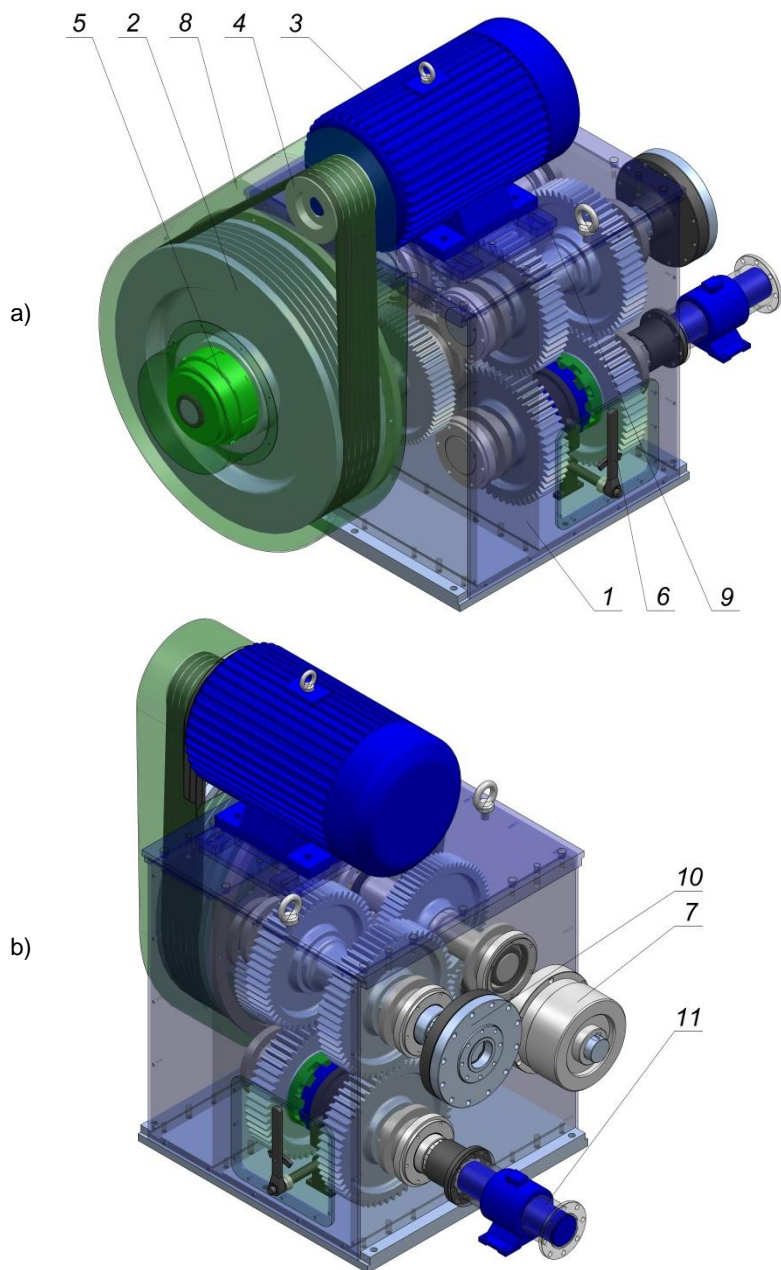
**Rys. 3.12.** Schemat kinematyczny układu napędowego uniwersalnej walcarki kuzniczej: 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia pasowa, 3 – koło zamachowe, 4 – sprzęgło cierne, 5 – hamulec, 6 – wał wejściowy, 7, 8 – wały pośrednie, 9 – wał zdawczy górny, 10 – wał zdawczy dolny, 11 – sprzęgło kłowe

Przeniesienie napędu z koła zamachowego na wał wejściowy realizowane jest za pośrednictwem wielopłytkowego sprzęgła cierne – 4 sterowanego elektromagnetycznie, po uprzednim zwolnieniu hamulca – 5, który osadzony jest na przeciwnym czopie wału wejściowego przekładni. Następnie napęd jest przekazywany na dwa wały zdawcze – 9 i 10 za pośrednictwem kół zębatach

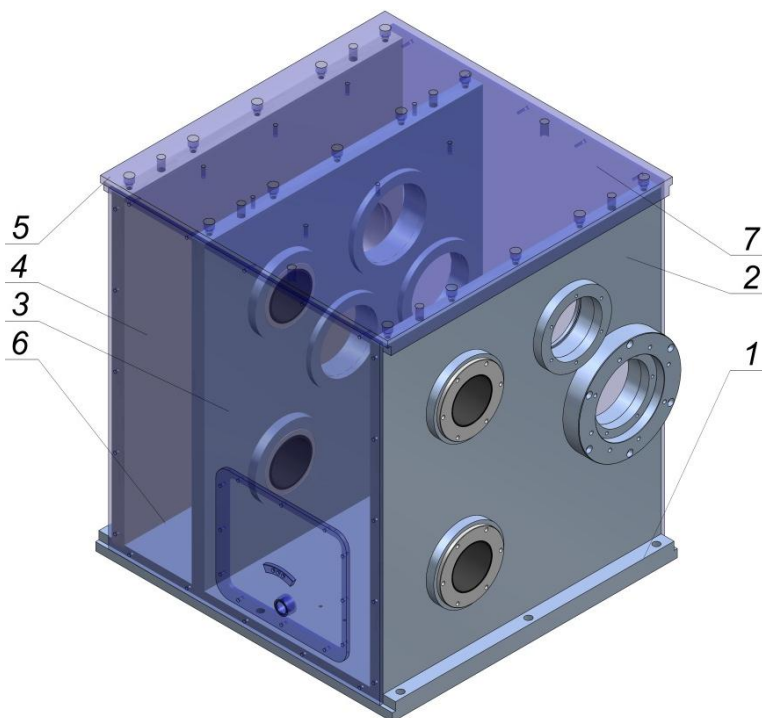
osadzonych na wałkach pośrednich – 7 i 8 trzystopniowej przekładni zębatej. Przy czym górny wał zdawczy – 9 napędzany jest za pośrednictwem kół zębatych  $z_5$  oraz  $z_6$  i nie ma możliwości zmiany kierunku obrotów. Natomiast na dolnym wale zdawczym – 10 osadzono obrotowo dwa koła zębate  $z_7$  i  $z_8$ , które cały czas pozostają w zazębieniu z kołem  $z_6$  oraz kołem  $z_9$ . Przy czym zazębienie koła  $z_7$  z kołem  $z_6$  odbywa się za pośrednictwem koła pośredniego  $z_5$ , które jest jednocześnie kołem napędowym trzeciego stopnia przekładni. W rezultacie koło zębate  $z_7$  obraca się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów koła  $z_6$ , które osadzone jest na górnym wale zdawczym – 9 za pośrednictwem połączenia wielowypustowego. Natomiast koło  $z_8$  zazębione jest bezpośrednio z kołem  $z_9$ , osadzonym na górnym wale zdawczym – 9. W rezultacie współpracujące ze sobą koła  $z_8$  i  $z_9$  obracają się w przeciwnych kierunkach. Sprzęgnięcie koła  $z_7$  z dolnym wałem zdawczym powoduje, że oba wały wyjściowe obracają się w tym samym kierunku. Natomiast sprzęgnięcie koła  $z_8$  z dolnym wałem zdawczym powoduje obrót obu wałów w przeciwnych kierunkach. Przeniesienie napędu z jednego z kół  $z_7$  lub  $z_8$  na dolny wał zdawczy realizowane jest za pośrednictwem sprzęgła kłowego, które znajduje się na wale zdawczym pomiędzy kołami  $z_7$  i  $z_8$ .

Opracowany według przedstawionego łańcucha kinematycznego model przestrzenny zespołu napędowego pokazano na rysunku 3.13. Kompletny zespół składa się z wielostopniowej przekładni zębatej – 1, koła zamachowego – 2, synchronicznego silnika napędowego – 3, przekładni pasowej – 4, sprzęgła ciernego – 5, zespołu zmiany kierunku obrotów – 6, hamulca – 7, zespołu osłon układu napędowego – 8 oraz zespołu mocowania silnika – 9. Dodatkowo na czopie górnego wału wyjściowego umieszczono sprzęgło – 10, służące do ustawiania położenia kąтового narzędzi, zaś na czopie dolnego wału wyjściowego zainstalowano przetwornik momentu obrotowego – 11 wraz z przetwornikiem przemieszczenia kąтового wału.

Trzystopniowa przekładnia zębata zbudowana jest z korpusu, wewnątrz którego łożyskowane są wały poszczególnych stopni. Na wałach osadzono koła zębate z uzębieniem prostym. Korpus przekładni wykonany jest jako konstrukcja skręcana z płyt stalowych, które tworzą zamkniętą skrzynię (rys. 3.14). Składa się on z poziomej płyty podstawowej – 1, do której przymocowano trzy płyty pionowe – 2, 3, 4, spięte na górze poziomą płytą górną – 4. Natomiast powierzchnie czołowe płyt pionowych spięto płytami osłonowymi – 6 i 7. W płytach pionowych znajdują się otwory wraz z tulejami, które pełnią funkcję gniazd do osadzenia łożysk. Do górnej płyty korpusu przytwierdzono zespół mocowania silnika, który umożliwia przesuwanie silnika napędowego i napinanie pasków klinowych przekładni pasowej.

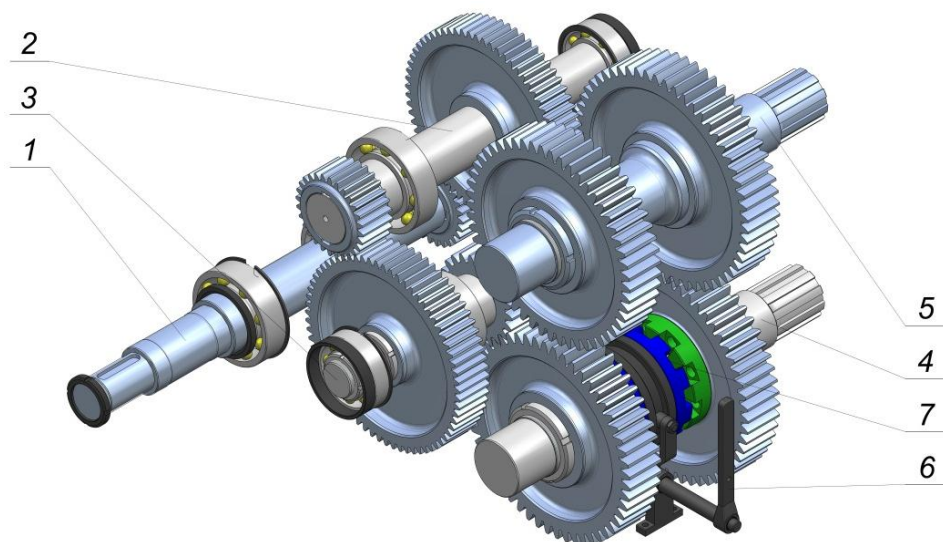


**Rys. 3.13.** Model przestrzenny zespołu napędowego uniwersalnej walcarki kuźniczej:  
a) widok od strony przekładni pasowej, b) widok od strony wałków zdawczych;  
1 – korpus przekładni, 2 – koło zamachowe, 3 – silnik napędowy, 4 – przekładnia pasowa, 5 – sprzęgło ciernie, 6 – zespół zmiany kierunku obrotów, 7 – hamulec, 8 – osłona przekładni pasowej, 9 – zespół mocowania silnika, 10 – sprzęgło ustawiania kątownego narzędzi, 11 – zespół pomiarowy



**Rys. 3.14.** Model przestrzenny korpusu przekładni zębatej: 1 – płyta podstawowa, 2 – płyta pionowa, przednia, 3 – płyta pionowa, środkowa, 4 – płyta pionowa, tylna, 5 – płyta górna, 6 – płyta osłony, czołowa, 7 – płyta osłony tylna

Z uwagi na konstrukcję korpusu – skręcany z płyt stalowych i związane z tym trudności w utrzymaniu współosiowości otworów podczas montażu, wały przekładni zostały podparte w łożyskach tocznych, wahlowych. Jedynie najbardziej obciążone wały zdawcze, których prędkości obrotowe są niewielkie, zostały osadzone w łożyskach ślizgowych. Takie rozwiązanie pozwala ograniczyć wpływ niedokładności wykonania i montażu korpusu na eksploatację przekładni. Zaletą zastosowanej konstrukcji korpusu jest brak ograniczeń, co do położenia osi wałów, które przy takim rozwiązaniu mogą znajdować się w różnych płaszczyznach. W rezultacie cała przekładnia jest zwarta i sztywna. Położenie wałów oraz sposób współpracy kół zębatach w przekładni pokazano na kolejnym rysunku 3.15. Zgodnie ze schematem kinematycznym (rys. 3.13) dolny wał zdawczy ma możliwość zmiany kierunku obrotów. W tym celu wykorzystano sprzęgło kłowe przełączane mechanicznie (rys. 3.16), które pozwala na przeniesienie momentu obrotowego przez jedno z dwóch kół (w zależności od położenia tulei kłowej) na wał zdawczy.

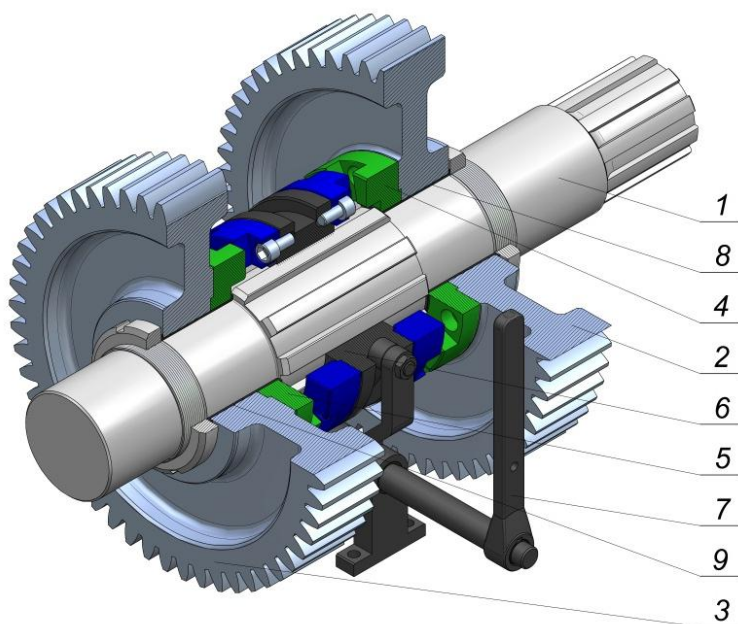


**Rys. 3.15.** Model przestrzenny rozmieszczenia wałów i kół zębatach w przekładni: 1 – wał napędowy, 2 – wał pośredni I stopnia, 3 – wał pośredni II stopnia, 4 – wał zdawczy dolny, 5 – wał zdawczy, górny, 6 – zespół zmiany kierunku obrotów, 7 – sprzęgło kłowe

Przełączanie kierunku obrotów odbywa się ręcznie przy pomocy mechanizmu dźwigniowego – 7, który przesuwa dwustronną tuleję kłową – 6 po wielowypuszcie naciętym w środkowej części wału – 1, powodując zazębienie tulei z jednym z dwóch pierścieni kłowych – 4 lub 5, które przymocowane są do piast kół zębatach – 2 i 3. W położeniu neutralnym dźwigni (położenie na rys. 3.16) tuleja kłowa nie zazębia się z żadnym z pierścieni i koła zębata obracają się swobodnie na stopniach wału zdawczego, nie przekazując momentu obrotowego na wał.

Jedną z różnic pomiędzy walcowaniem hutniczym, a walcowaniem kuźniczym jest kinematyka ruchu obrotowego narzędzi. Podczas walcowania hutniczego liczba obrotów walców jest nieokreślona (walce obracają się w sposób ciągły, aż do odkształcenia całego pasma materiału). Natomiast walcowanie kuźnicze charakteryzuje cykliczny ruch obrotowy walców. Niezależnie od sposobu walcowania kuźniczego (wzdłużne lub poprzeczne), narzędzia po wykonaniu pełnego obrotu są zatrzymywane, a w tym czasie następuje usunięcie ukształtowanej odkuwki z przestrzeni roboczej oraz załadunek kolejnego półfabrykatu lub przemieszczenie przedkuwki do drugiego wykroju. Taki charakter pracy powoduje, że układy napędowe walcarek kuźniczych muszą mieć możliwość cyklicznego przekazywania napędu na walce, bez narażania silników na przeciążenie. W opracowanej konstrukcji zespół napędowy wyposażono w koło zamachowe, które osadzono obrotowo na wysięgowym czopie wału napędowego przekładni (rys. 3.17). Podczas pracy maszyny koło zamachowe przez cały czas napędzane jest przez silnik za pośrednictwem

przekładni pasowej, jednak napęd przekazywany jest na wał wejściowy przekładni dopiero w chwili włączenia sprzęgła ciernego, które łączy koło zamachowe z czopem wału. Po wykonaniu przez walce pełnego obrotu (wał napędowy obróci się w tym czasie 13,5 razy) sprzęgło jest wyłączane. W tym czasie hamulec zatrzymuje ruch obrotowy wału napędowego przekładni, zaś koło zamachowe obraca się swobodnie na nieruchomym czopie wału. Ze względu na stosunkowo duże wartości momentu obrotowego przenoszonego na wał napędowy przekładni, zastosowano sprzęgło cierne wielopłytkowe, sterowane elektromagnetycznie. Również hamulec ma konstrukcję wielopłytkową, jednak jego włączanie (ze względów bezpieczeństwa) odbywa się w sposób mechaniczny, w wyniku działania sprężyn dociskających elementy cierne. Zwalnianie hamulca odbywa się elektromagnetycznie. Zastosowanie sterowania elektromagnetycznego sprzęgła i hamulca pozwoliło na zsynchronizowanie pracy obu zespołów.

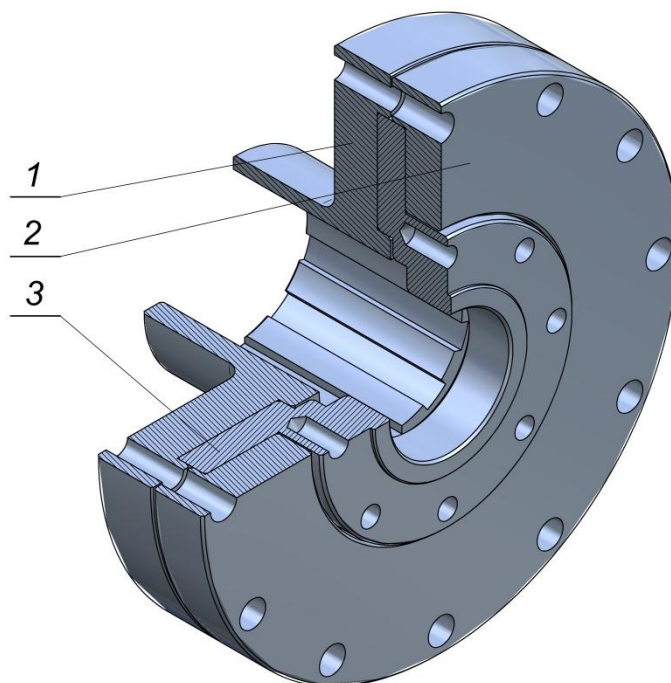


**Rys. 3.16.** Model przestrzenny zespołu dolnego wału zdawczego z mechanizmem zmiany kierunku obrotów: 1 – wał zdawczy, dolny, 2 – koło zębate  $z_8$ , 3 – koło zębate  $z_7$ , 4, 5 – pierścien bierny, kłowy, 6 – dwustronna tuleja kłowa, przesuwana, 7 – zespół sterowania sprzęgłem, 8, 9 – tuleja ślizgowa

Procesy walcowania kuźniczego charakteryzują się dużą dynamiką przebiegu momentu obrotowego. Bardzo często w trakcie walcowania pojawiają się chwilowe przeciążenia, związane ze zmienną wartością gniotu, zagłębianiem się narzędzi w materiał, nadmiernym wystudzeniem materiału itp. Dzięki zastosowaniu koła zamachowego w układzie napędowym walcarki kuźniczej,



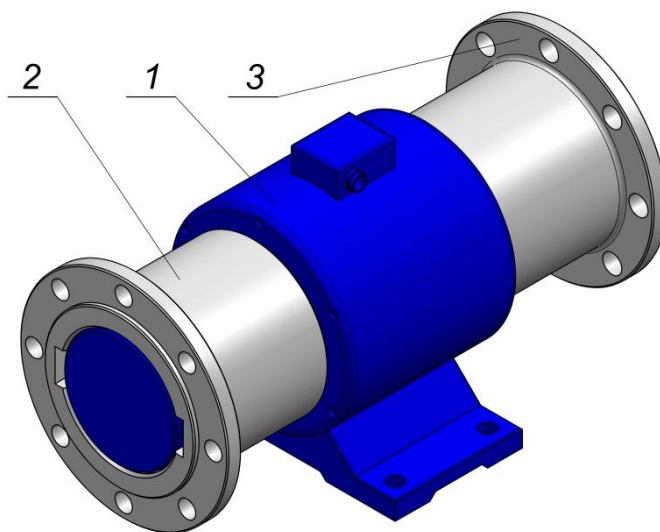
Sprzęgło umożliwia bezstopniową regulację położenia kąowego górnego walca. Składa się z tarczy czarnej czynnej – 1, osadzonej na czopie wału zdawczego, tarczy dociskowej – 2 oraz tarczy czarnej wewnętrznej, połączonej z kołnierzem wału przegubowego. Pomiędzy tarczą czynną, a tarczą dociskową zaciśnięta jest tarcza czarna wewnętrzna. Podczas regulacji kąowej walca, śruby zaciskające elementy sprzęgła są luzowane, co umożliwia swobodny obrót walca. Następnie po właściwym ustawieniu narzędzi elementy sprzęgła są ponownie zaciskane. Moment obrotowy przenoszony jest między poszczególnymi elementami sprzęgła przez siły tarcia powstałe na powierzchniach czarnych.



**Rys. 3.18.** Sprzęgło ustawiania położenia kąowego narzędzi: 1 – tarcza czarna czynna, 2 – tarcza dociskowa, 3 – tarcza czarna wewnętrzna

Zespół napędowy został wyposażony również w układ pomiarowy do rejestracji parametrów siłowych (momentu obrotowego) oraz parametrów kinematycznych (prędkości kąowej i położenia kąowego walców) (rys. 3.19). Głównym elementem układu pomiarowego jest przetwornik momentu obrotowego – 1, firmy BCM SENSOR, model 1811 – 15 kNm. Na czopach przetwornika osadzono dwie piasty – 2 oraz 3, łączące przetwornik z czopem wału zdawczego oraz kołnierzem wału przegubowego.



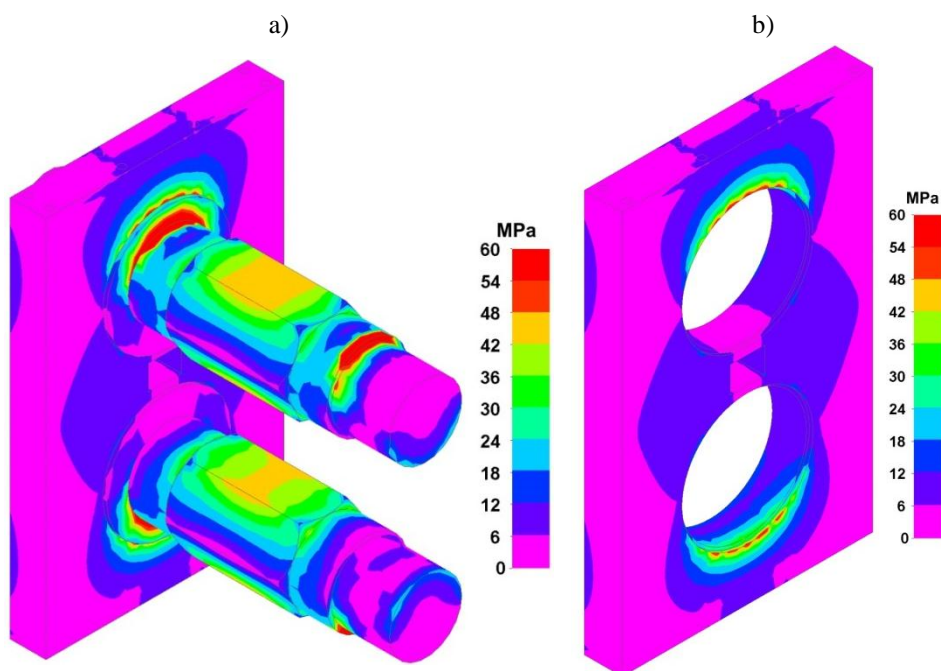


Rys. 3.19. Układ pomiarowy: 1 – czujnik momentu obrotowego 2, 3 – piasty

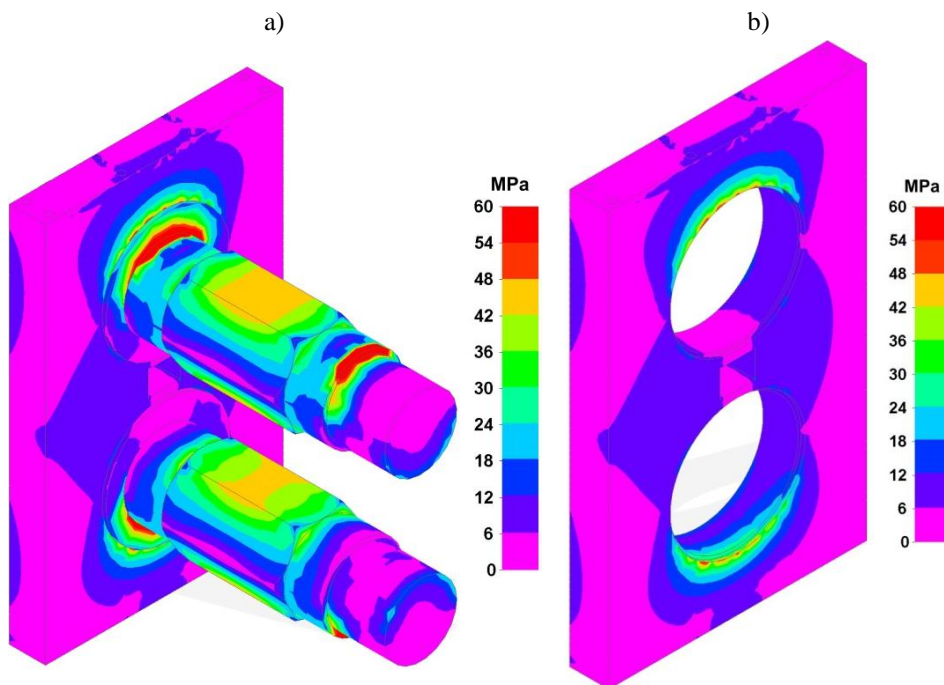
### 3.3. Analiza wytrzymałościowa uniwersalnej walcarki kuźniczej

W trakcie projektowania walcarki wykonano kompleksową analizę wytrzymałościową głównych zespołów maszyny. W tym celu w początkowym etapie prac konstrukcyjnych do określenia minimalnych przekrojów najważniejszych elementów urządzenia wykorzystano metody inżynierskie, oparte na podstawowych prawach wytrzymałości materiałów [62]. Następnie w oparciu o metody numeryczne sprawdzono opracowaną konstrukcję pod względem warunków wytrzymałościowych oraz jej sztywności. Obliczenia numeryczne wykonano w środowisku NX Nastran dla zakresu liniowej charakterystyki wytrzymałości materiału, stosując w tym celu metodę elementów skończonych. Ze wstępnej analizy wynika, że najbardziej obciążonym zespołem urządzenia jest klatka walcownicza, której sztywność i wytrzymałość mają kluczowe znaczenie na niezawodną pracę walcarki oraz jakość kształtowanych odkuwek. Dlatego też skupiono się na dokonaniu analizy wytrzymałościowej tego właśnie zespołu. W trakcie prowadzonych obliczeń przyjęto, że wszystkie części klatki roboczej posiadają następujące parametry materiałowe: współczynnik Poisson'a  $\nu = 0,3$  oraz moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga)  $E = 2,1 \cdot 10^5$  MPa. Warunki brzegowe pomiędzy płytami stojaków oraz poziomymi płytami spinającymi, opisano przy użyciu domyślnej funkcji połączeń śrubowych, co odpowiada połączeniom rzeczywistym tych elementów. Pozostałe połączenia opisano jako kontakt liniowy z zerowym przenikaniem i odstępem. Dyskretyzacja

modelu klatki roboczej walcarki, którą przeprowadzono na potrzeby obliczeń MES, wykonana została przy użyciu elementów czterowęzłowych o wymiarach 10 mm. Wielkość wykorzystanych elementów, opisujących konstrukcję, uzależniono gabarytami dyskretyzowanych części. Obliczenia numeryczne zostały wykonane dla maksymalnych wartości obciążenia, przykładając siły skupione o wartości 800 kN do dwóch wałów roboczych klatki. Przy czym siły zostały przyłożone w połowie długości wałów (między łożyskami), a ich zwrot odpowiadał oporowi, który stawia materiał podczas procesu walcowania. Obliczenia wykonano dla dwóch wariantów ustawienia walców: maksymalnie zsuniętych osi walców (oś tulei mimośrodowych pokrywała się z płaszczyzną przechodzącą przez osie walców) oraz przy rozsunięciu walców do połowy zakresu regulacji (oś tulei mimośrodowych była prostopadła do płaszczyzny łączącej osie walców). Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych MES wyznaczono rozkłady naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera – Misesa oraz rozkład przemieszczeń elementów klatki roboczej pod wpływem przyłożonego obciążenia zewnętrznego. Wyniki zestawiono w postaci map, obrazujących rozkłady naprężeń (rys. 3.20–3.21) oraz przemieszczeń (rys. 3.22–3.23).

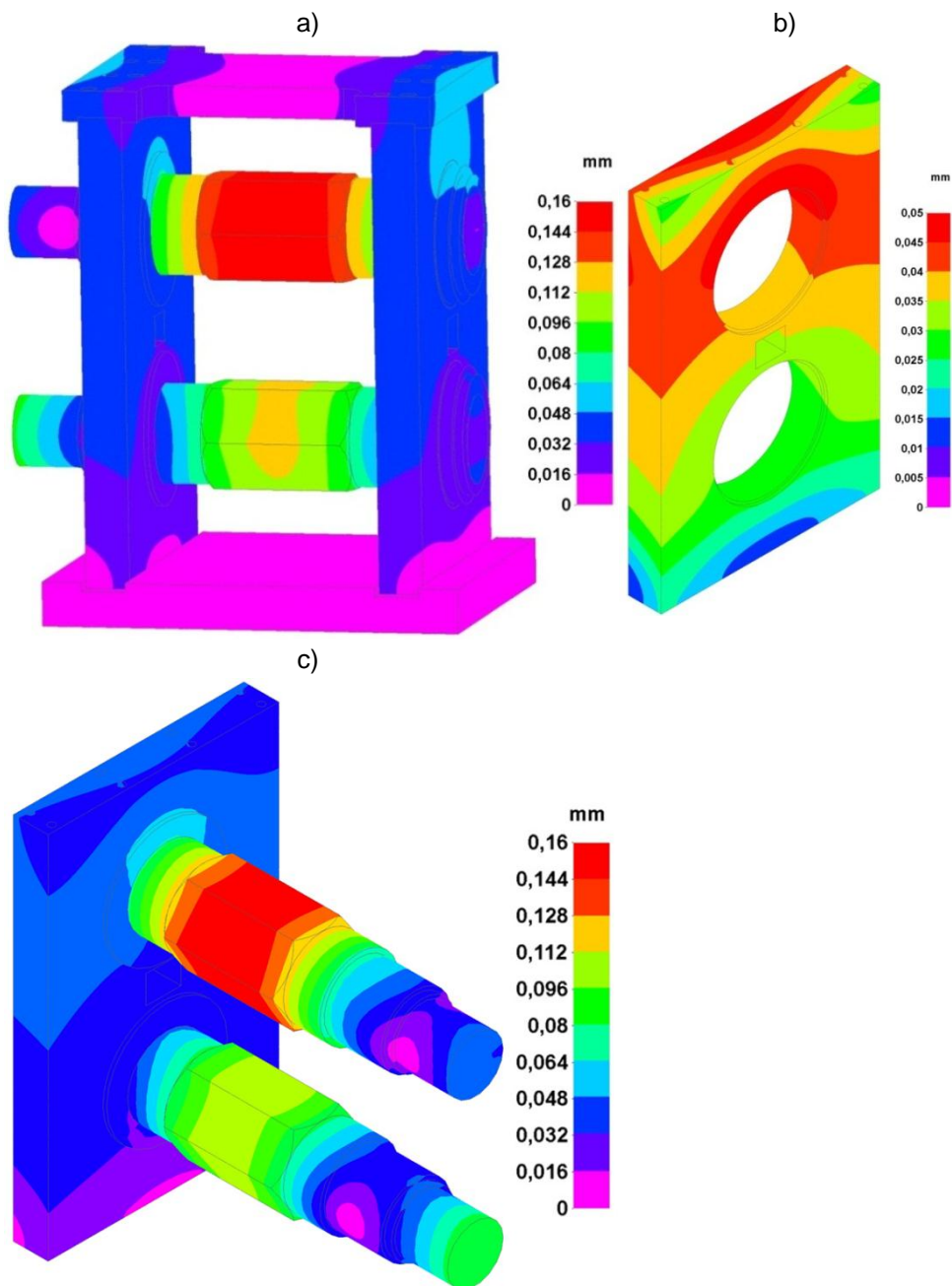


**Rys. 3.20.** Wyznaczone MES rozkłady naprężeń zredukowanych w głównych elementach klatki walcowniczej dla pionowego położenia tulei mimośrodowych: a) w wałach roboczych i tulejach mimośrodowych, b) w stojaku klatki

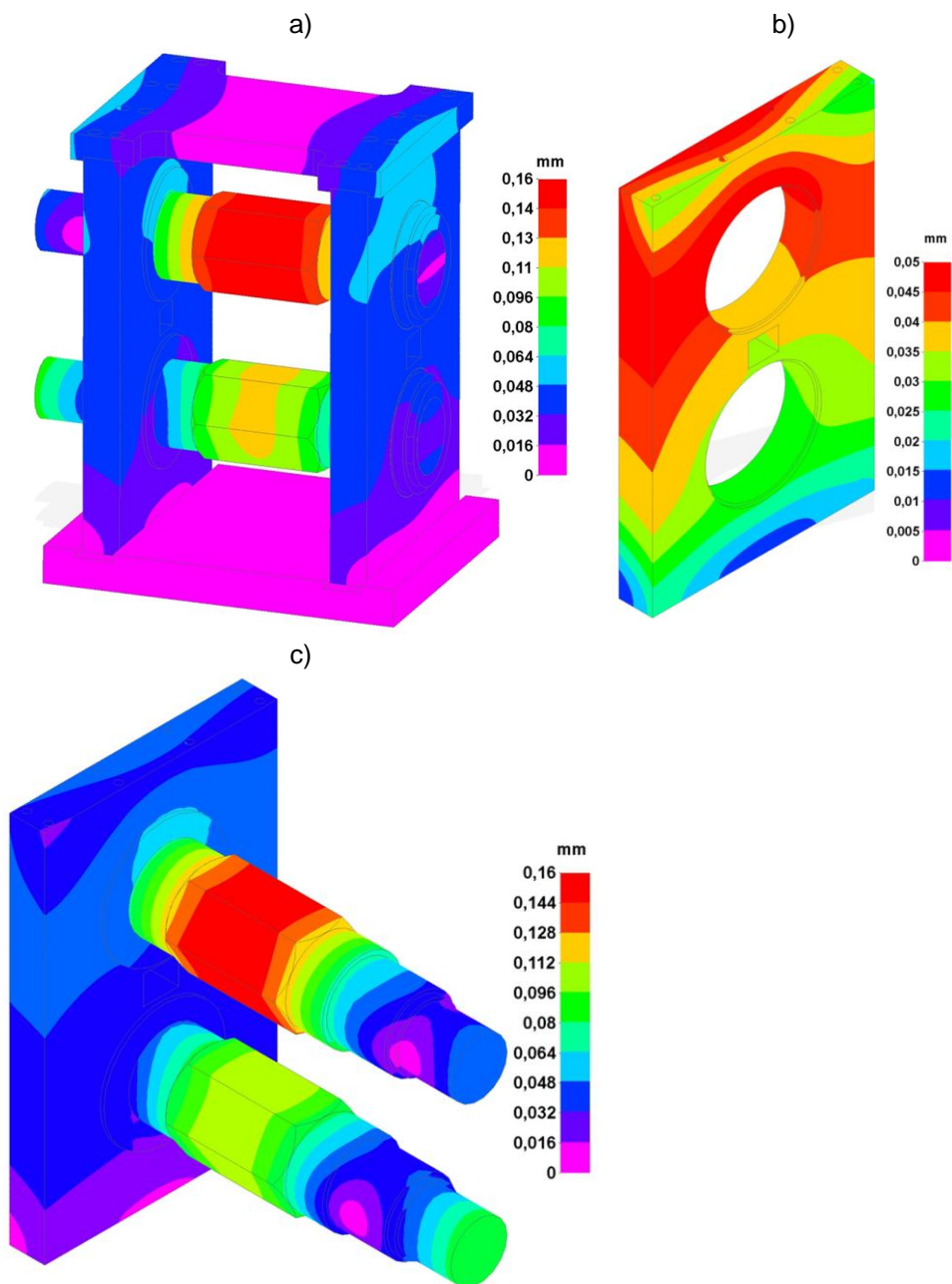


**Rys. 3.21.** Wyznaczone MES rozkłady naprężeń zredukowanych w głównych elementach klatki walcowniczej dla poziomego położenia tulei mimośrodowych: a) w wałach roboczych i tulejach mimośrodowych, b) w stojaku klatki

Na podstawie uzyskanych rozkładów wartości naprężeń zredukowanych dokonano oceny stopnia wyężnienia materiału dla kluczowych elementów konstrukcji, a przede wszystkim określono ryzyko przekroczenia granicy plastyczności najbardziej obciążonych elementów klatki roboczej. Natomiast w oparciu o uzyskane rozkłady przemieszczeń elementów klatki roboczej oceniono jej sztywności, która będzie miała swoje odzwierciedlenie w dokładności kształtowanych wyrobów. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że najbardziej obciążonymi elementami konstrukcji są wały walcarki oraz tuleje mimośrodowe, w których naprężenia zredukowane sięgają 60 MPa. Przy czym są to wartości znacznie mniejsze od dopuszczalnych (dla materiału 41Cr4, z którego wykonane są te elementy granica plastyczności wynosi około  $R_e = 780$  MPa). Naprężenia na przewidywanym poziomie nie spowodują trwałych odkształceń w tych elementach. Obszar występowania największych naprężeń jest również miejscem osadzenia tulei ślizgowych, które wykonane są z brązu w gatunku CuAl10Fe3Mn2. Dla tego materiału granica plastyczności jest kilkakrotnie mniejsza niż dla stali i oscyluje w granicach 250 MPa. Oznacza to, że i w tym przypadku nie występuje niebezpieczeństwo odkształcenia plastycznego łożysk walcarki.



**Rys. 3.22.** Wyznaczone MES rozkłady przemieszczeń głównych elementów klatki walcowniczej dla pionowego położenia tulei mimośrodowych: a) całej klatki, b) stojaka klatki, c) wałów roboczych wraz z tulejami mimośrodowymi



**Rys. 3.23.** Wyznaczone MES rozkłady przemieszczeń głównych elementów klatki walcowniczej dla poziomego położenia tuleji mimośrodowych: a) całej klatki, b) stojaka klatki, c) wałów roboczych wraz z tulejami mimośrodowymi

Pozostałe elementy składowe konstrukcji obciążone są w znacznie mniejszym stopniu. Nie zaobserwowano również większego wpływu położenia tulei mimośrodowych na wartość naprężeń w elementach klatki walcowniczej.

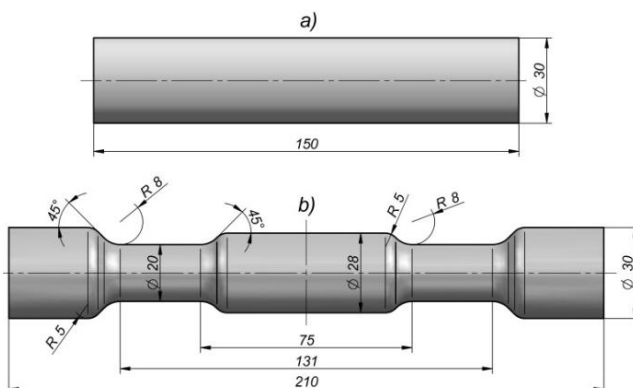
Również podczas analizy przemieszczeń konstrukcji klatki walcowniczej odnotowano niewielkie wartości odkształceń sprężystych. Widoczne jest, że największe odkształcenia występują na wałach głównych urządzenia, które przemieszczają się o około 0,16 mm. Jednak są to sumaryczne wartości przemieszczeń, związane z odkształceniami sprężystymi stojaków, tulei mimośrodowych, płyt poziomych i wałów głównych. Znacznie mniejszym odkształceniom ulegają stojaki klatki, w których odnotowano przemieszczenia rzędu 0,05 mm. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku kuźniczego walcowania odkuwek, sztywność klatki jest kluczowym czynnikiem, który decyduje o dokładności i jakości kształtowanych wyrobów oraz trwałości urządzenia. Przy czym tak małe wartości przemieszczeń nie będą miały znaczącego wpływu na jakość kształtowanych odkuwek. Widoczne jest także, że zmiana położenia wałów i tulei mimośrodowych nie ma większego wpływu na wartość przemieszczeń elementów klatki walcowniczej.

W oparciu o uzyskane wyniki analizy wytrzymałościowej można jednoznacznie stwierdzić, że konstrukcja klatki walcowniczej została opracowana prawidłowo.



## 4. Badania procesu walcowania kuźniczego odkuwek w uniwersalnej walcarce kuźniczej

W celu określenia możliwości technologicznych prototypowej walcarki kuźniczej wykonano próby walcowania odkuwek w warunkach laboratoryjnych. Na potrzeby realizowanych badań opracowano konstrukcję odkuwki wałka stopniowanego (rys. 4.1b), która będzie walcowana według dwóch schematów: wzdłużnego oraz poprzeczno-klinowego. Przyjęto, że proces będzie realizowany z wsadu w kształcie pręta o przekroju okrągłym, którego średnica jest równa średnicy skrajnych czopów odkuwki (rys. 4.1a). Zaproponowana do ukształtowania odkuwka wałka charakteryzuje się symetrią oraz różnymi wartościami współczynnika gniotu walcowanych stopni. Ponadto przyjęto, że skrajne stopnie odkuwki nie będą podlegały kształtowaniu, co ułatwi realizację procesu walcowania.



**Rys. 4.1.** Kształt i wymiary odkuwki stopniowanego wałka, założonej do odwalcowania w walcarce kuźniczej: a) wsad, b) odkuwka

### 4.1. Konstrukcja narzędzi do walcowania kuźniczego odkuwki wałka

Opracowywanie technologii walcowania kuźniczego odkuwek i przedkuwek jest stosunkowo trudnym procesem i wymaga uwzględnienia wielu czynników, do których należy zaliczyć m.in.: kształt wyrobu, położenie przekrojów charakterystycznych na długości odkuwki, dopuszczalne wielkości gniotu, liczbę przepustów oraz przyjęty system walcowania.



W literaturze specjalistycznej można spotkać wiele schematów kalibrowania walców, które w dużej mierze opierają się na danych doświadczalnych [53]. Bardzo często zastosowanie różnych sposobów kalibrowania narzędzi (podawanych przez różnych autorów) dla identycznych odkuwek daje odmienne wyniki. Często różnice pojawiają się również między wynikami uzyskanymi z obliczeń, a wynikami doświadczalnymi. Skutkiem tego każdy nowo opracowany proces technologiczny walcowania kuźniczego wymaga weryfikacji doświadczalnej celem skorygowania ewentualnych wad. Do weryfikacji przyjętych rozwiązań przydatne są również techniki numeryczne, które pozwalają na „wirtualne przeprowadzenie” procesu z udziałem zaprojektowanych wykrojów i określenie ich przydatności lub sposobu modyfikacji.

Jak już wcześniej wspomniano istnieje kilka podstawowych systemów walcowania kuźniczego. Biorąc pod uwagę kształt odkuwki oraz rodzaj półfabrykatu założono, że proces walcowania będzie realizowany w systemie owal – koło. Stopień zmiany przekroju przedkuwki podczas walcowania określa wskaźnik redukcji przekroju poprzecznego  $R_p$ , wyznaczany na podstawie zależności:

$$R_p = 1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \times 100\%, \quad (1)$$

gdzie:

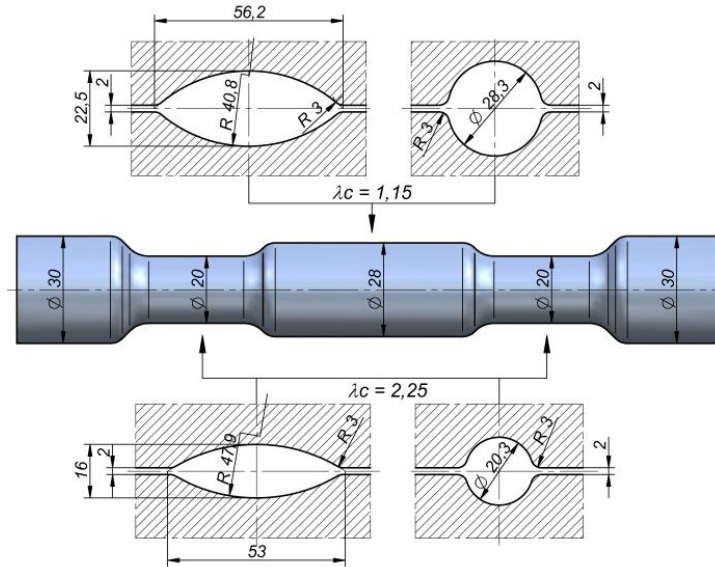
- $R_p$  - redukcja względna przekroju poprzecznego,
- $d_0$  - średnica przed walcowaniem,
- $d$  - średnica po walcowaniu,

lub stopień wydłużenia  $\lambda$ , określane według zależności:

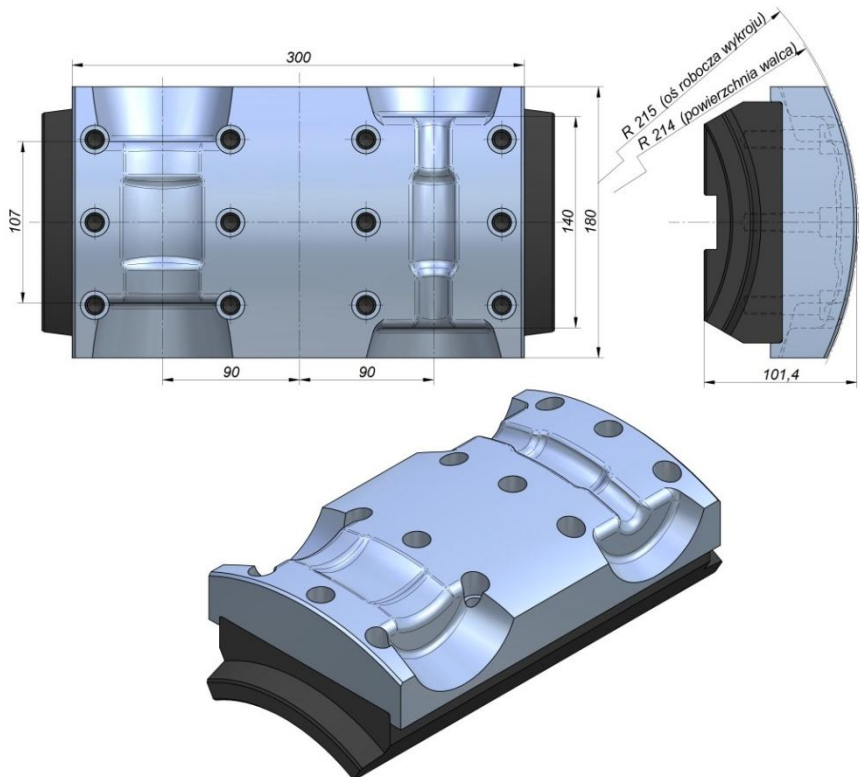
$$\lambda = \frac{d_0^2}{d^2}. \quad (2)$$

Parametry wykrojów określono na podstawie metody kalibrowania wg Smirnowa [53]. Kształt i wymiary wykrojów kuźniczych, pokazano na rysunku 4.2.

Segmenty narzędziowe do walcowania kuźniczego zaprojektowano jako wymienne wkładki (rys. 4.3), dla których średnica robocza wynosiła  $\varnothing 430$  mm. Na powierzchniach walcowych narzędzi umieszczono po dwa wykroje robocze, których wymiary podano na rys. 4.2.



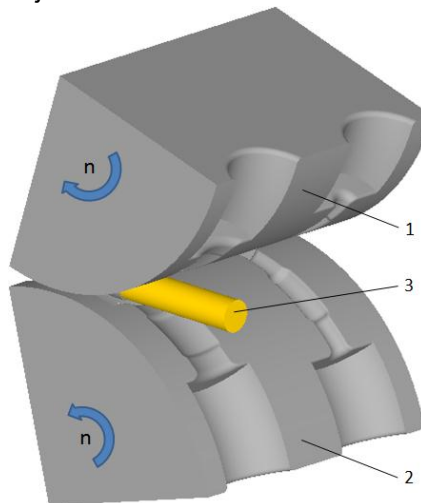
Rys. 4.2. Kształt wykrojów kuźniczych do walcowania odkuwki w układzie owal – koło



Rys. 4.3. Konstrukcja jednego z segmentów do kuźniczego walcowania odkuwek

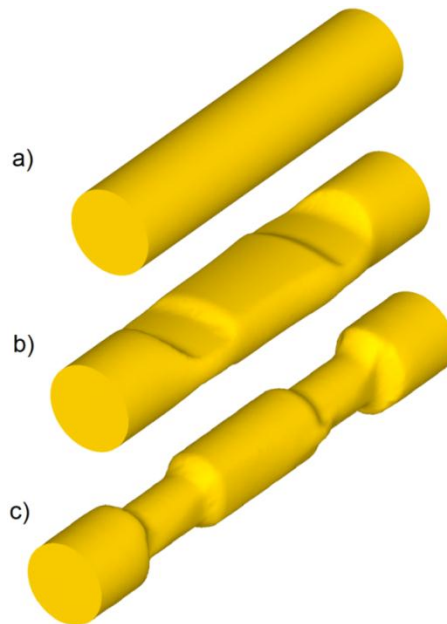
## 4.2. Weryfikacja numeryczna opracowanych wykrojów kuźniczych

Poprawność przyjętych założeń konstrukcyjnych określono podczas modelowania numerycznego. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania Deform 3D w wersji 11. Zbudowany na potrzeby obliczeń model numeryczny procesu walcowania kuźniczego odkuwki wałka stopniowanego przedstawiono na rys. 4.4. Model składa się z dwóch segmentów: górnego – 1 i dolnego – 2 oraz wsadu – 3. Na powierzchniach segmentów wykonane są wykroje o zarysie owalnym i kołowym. W czasie procesu segmenty obracają się w przeciwnych kierunkach z jednakowymi prędkościami  $n = 16,5$  obr/min. Przyjęta średnica robocza wykrojów dla każdego przepustu wynosiła 430 mm (liczona do osi walcowania). Segmenty modelowano jako obiekty sztywne, natomiast wsad jako obiekt sztywno-plastyczny podzielony na 80 tys. elementów tetragonalnych pierwszego rzędu. Model materiałowy wsadu – stal w gatunku C45 wykorzystano z bazy danych oprogramowania DEFORM-3D. Temperatura początkowa wsadu wynosiła 1170 °C, natomiast temperatura narzędzi podczas całego procesu była stała i wynosiła 50 °C. Kontakt na powierzchni styku kształtowany materiał – narzędzia modelowano tarcie stałym, dla którego czynnik tarcia wynosił  $m = 0,3$ . Współczynnik wymiany ciepła między narzędziami, a wsadem przyjęto na poziomie 20 kW/m<sup>2</sup>K, natomiast między wsadem, a otoczeniem 0,35 kW/m<sup>2</sup>K. Wsad wykorzystany w pierwszym przepuście stanowił pręt o średnicy  $\varnothing 30$  mm i długości  $l = 150$  mm. W kolejnych przepustach wsad importowano wraz z historią odkształceń i temperatury z końcowego etapu walcowania w poprzedzającym wykroju.



**Rys. 4.4.** Opracowany na potrzeby obliczeń model geometryczny procesu walcowania odkuwki wałka: 1 – segment górny, 2 – segment dolny, 3 – wsad

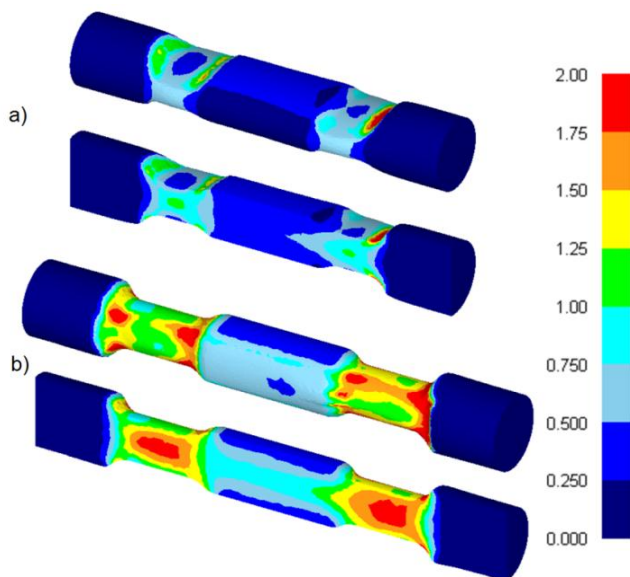
W efekcie prowadzonych symulacji potwierdzono możliwość kształtowania odkuwki wałka stopniowanego w opracowanych wykrojach. W trakcie obliczeń wyznaczono kształt półwyrobów w kolejnych przepustach, określono rozkłady intensywności odkształcenia, temperatury oraz przebiegi sił i momentów obrotowych na narzędziach. Prognozowano także możliwość pęknięcia materiału na podstawie rozkładu kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama. Wyznaczony numerycznie kształt odkuwki w kolejnych przepustach pokazano na rys. 4.5. Uzyskany kształt odkuwki charakteryzuje się dużą zgodnością z przyjętymi założeniami. W trakcie symulacji nie zaobserwowano zjawisk mogących zakłócić przebieg procesu walcowania (zawalcowania, przepelnienie wykroju, skrzywienie odkuwki, niewypełnienie wykroju). Jedynym mankamentem, jaki zauważono, były niewielkie zniekształcenia w strefie przejściowej między kolejnymi stopniami oraz dość duże odchyłki kształtu przekroju poprzecznego odwalcowanych stopni. Przy czym są to zjawiska typowe dla odkuwek kształtowanych w wykrojach kuźniczych. Tym samym można stwierdzić, że zaprojektowane wykroje z dużym prawdopodobieństwem pozwolą na kształtowanie przedkuwek o założonych parametrach.



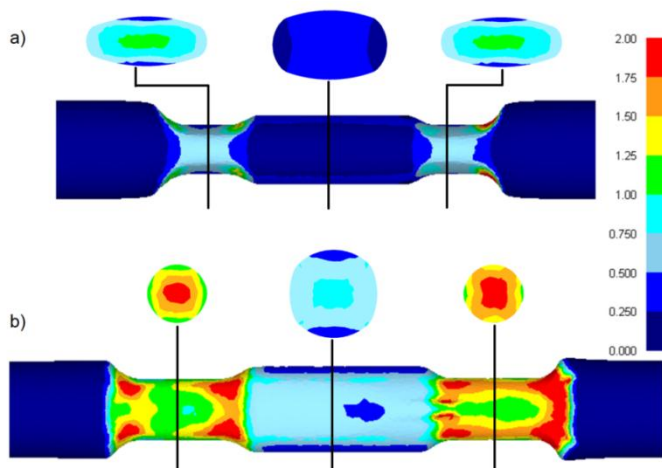
**Rys. 4.4.** Wyznaczony MES kształt odkuwki wałka stopniowanego walcowanego w wykrojach kuźniczych: a) wsad, b) przedkuwka po I przepuście (wykrój owalny), c) odkuwka po II przepuście (wykrój kołowy)

Na rys. 4.5 oraz 4.6 przedstawiono wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia dla odkuwek walcowanych w kolejnych przepustach. Cechą

wspólną odkuwek odwalcowanych w poszczególnych wykrojach jest duża niejednorodność odkształceń, zarówno pomiędzy poszczególnymi stopniami (co jest oczywiste ze względu na różne wartości gniotu), jak i w obszarze pojedynczych stopni, walcowanych z jednakowymi gniotami. Zaobserwowana niejednorodność przejawia się koncentracją odkształceń w strefach centralnych odkuwki.



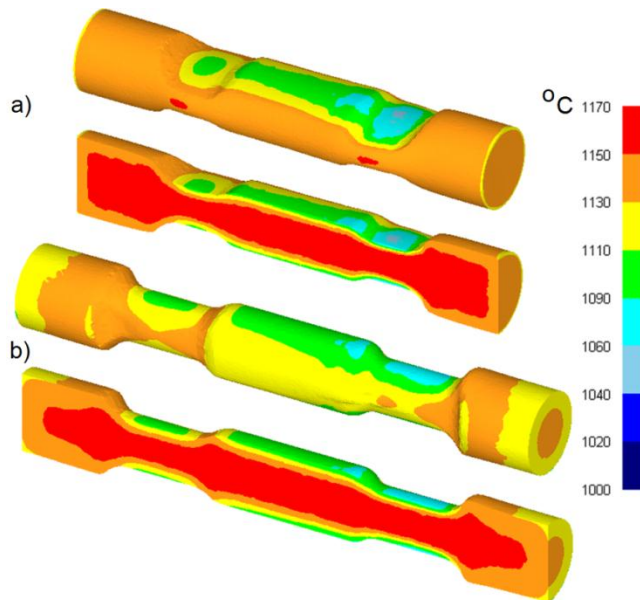
**Rys. 4.5.** Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia (na powierzchni i przekroju osiowym) dla odkuwek walcowanych: a) w wykroju owalnym, b) w wykroju kołowym



**Rys. 4.6.** Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w przekrojach poprzecznych walcowanych stopni: a) w wykroju owalnym, b) w wykroju kołowym

Następnie w miarę zbliżania się do warstw powierzchniowych półwyrobu odkształcenia zmniejszają swoje wartości. Na tej podstawie można wnioskować, że dochodzi do uplastycznienia materiału na wskroś i płynie on głównie w kierunku osiowym. Można również zauważyć lokalny wzrost odkształceń w warstwach powierzchniowych, które koncentrują się w obszarach przejściowych, między kolejnymi stopniami walcowanej odkuwki. Przepuszczalnie jest to spowodowane poślizgiem narzędzi w początkowej i końcowej fazie każdego przepustu.

Walcowanie kuźnicze często jest wykorzystywane do kształtowania przedkuwek, które w kolejnej operacji są kute na prasach. Taki proces jest wtedy efektywny, gdy możliwe jest ukształtowanie przedkuwki i odkuwki z jednego nagrzewu. W tym celu przyjmuje się wyższe temperatury nagrzewania wsadu, a proces walcowania realizuje się w pobliżu agregatu do kucia. W celu oszacowania stopnia wychłodzenia materiału w czasie walcowania proces został zamodelowany z uwzględnieniem zjawisk termicznych. Uzyskane podczas obliczeń mapy, obrazujące rozkłady temperatury w walcowanych półwyrobach pokazano na rys. 4.7.

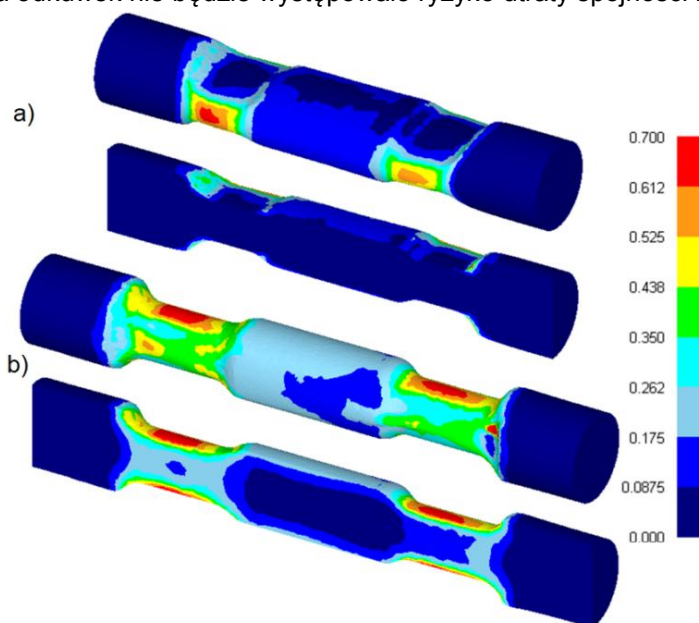


**Rys. 4.7.** Wyznaczone MES rozkłady temperatury na powierzchni i w przekrojach osiowych walcowanych stopni: a) w wykroju owalnym, b) w wykroju kołowym

Widoczne jest, że temperatura utrzymuje się na stosunkowo wysokim poziomie (pomimo walcowania w dwóch przepustach). Natomiast niewielkie spadki temperatury mają charakter powierzchniowy i są spowodowane kontaktem materiału z chłodniejszymi narzędziami oraz oddawaniem ciepła do otoczenia. Wysokie wartości temperatury można tłumaczyć jedynie lokalnym

kontaktem materiału z narzędziami oraz rekompensowaniem strat ciepła pracą odkształcenia plastycznego, która w blisko 90% zamieniana jest na ciepło. Wysokie wartości temperatury odwalcowanego półfabrykatu potwierdzają możliwość dalszego kształtowania w wykroju matrycującym.

W celu oszacowania niebezpieczeństwa pęknięcia materiału w trakcie walcowania, przeanalizowano rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama (rys. 4.8). Widoczne jest, że obszar koncentracji ekstremalnych wartości kryterium ograniczony jest jedynie do warstw powierzchniowych. Przy czym największe wartości całki Cockrofta-Lathama zaobserwowano dla drugiego przepustu. Zlokalizowane są one w obszarze stopni o najmniejszej średnicy, a więc w miejscu największych odkształceń plastycznych. Zgodnie z danymi literaturowymi [220], wartości graniczne całki Cockrofta-Lathama dla stali C45 oscylują w okolicach 1,0. Na tej podstawie można sądzić, że podczas walcowania odkuwek nie będzie występowało ryzyko utraty spójności materiału.

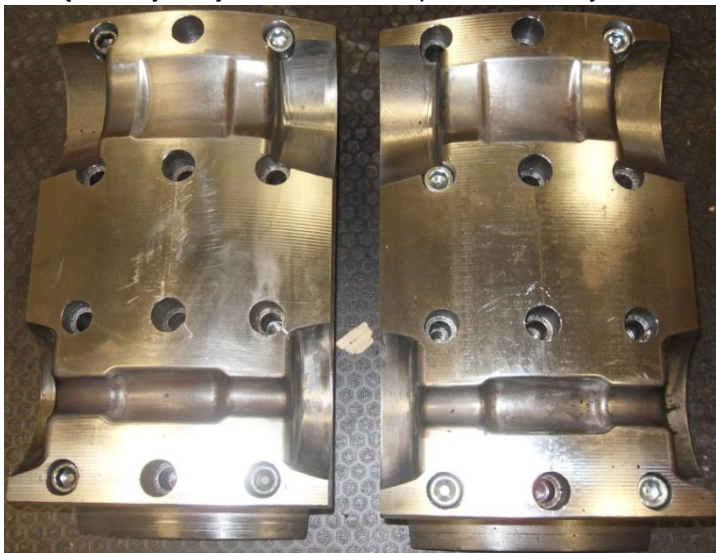


**Rys. 4.8.** Wyznaczone MES rozkłady kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama na powierzchni i w przekrojach osiowych walcowanych stopni: a) w wykroju owalnym, b) w wykroju kołowym

### 4.3. Badania doświadczalne walcowania odkuwki wałka stopniowanego

W celu potwierdzenia przydatności uniwersalnej walcarki kuźniczej do realizacji procesów walcowania odkuwek w układzie wzdłużnym wykonano próby laboratoryjnego kształtowania z wykorzystaniem materiałów rzeczywistych. Na potrzeby eksperymentu wykonano dwa zestawy segmentów narzędziowych,

na których zostały umieszczone opracowane poprzednio wykroje (owalne i kołowe). Narzędzia wykorzystane do badań pokazano na rys. 4.9.



**Rys. 4.9.** Narzędzia do walcowania kuźniczego odkuwki wałka w uniwersalnej walcarni kuźniczej

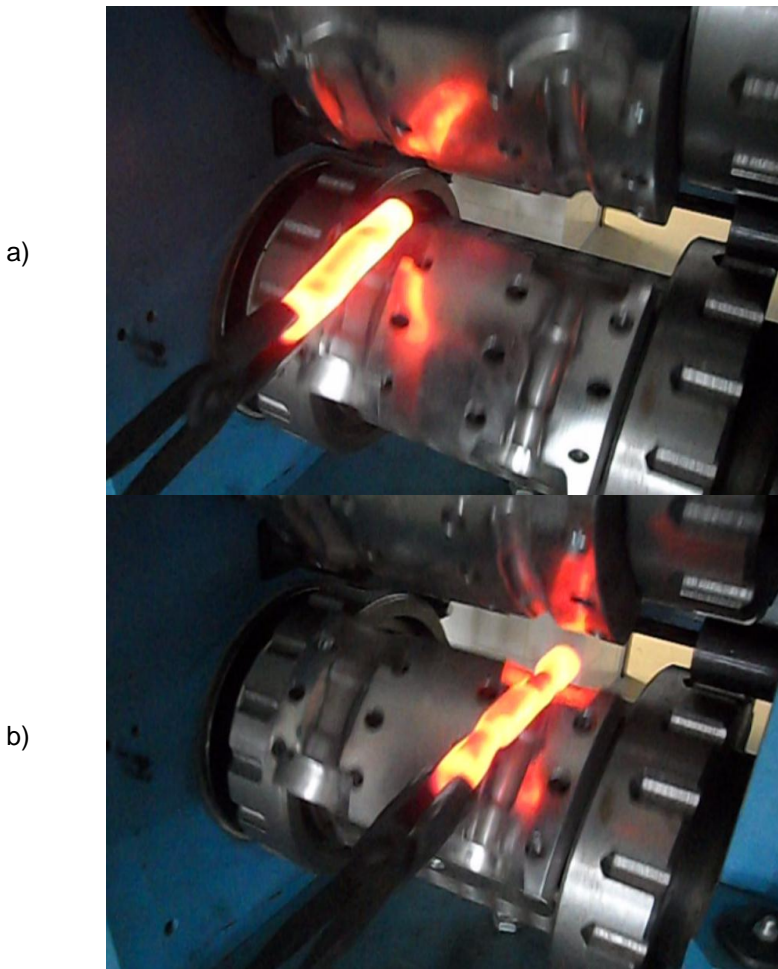
Następnie narzędzia zostały zamontowane w przestrzeni roboczej klatki walcowniczej (na wałach głównych) (rys. 4.10).



**Rys. 4.10.** Segmenty narzędziowe do walcowania kuźniczego odkuwek stopniowanych wałków, zamontowane w przestrzeni roboczej klatki walcowniczej



Podczas walcowania wykorzystano wsady w kształcie prętów o średnicy  $\varnothing 30$  mm i długości  $l = 150$  mm ze stali w gatunku C45, które nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania, wynoszącej około  $1170$  °C. Po wprowadzeniu nagrzanego półwyrobu do przestrzeni roboczej (utworzonej przez dwa segmenty narzędziowe) i ustaleniu jego położenia przy pomocy zderzaków, wprawiano walce w przeciwbieżny ruch obrotowy. Obracające się w przeciwnych kierunkach segmenty chwytały materiał i odkształcały kolejne stopnie odkuwki w wykroju owalnym. Po wykonaniu pełnego obrotu przez narzędzia, walce zatrzymywały się, a przedkuwka była przenoszona z obrotem o  $90^\circ$  do kolejnego wykroju – kołowego. Po czym ponownie uruchamiano przeciwbieżny ruch obrotowy walców i kształtowano stopnie odkuwki o przekroju kołowym (rys. 4.11).



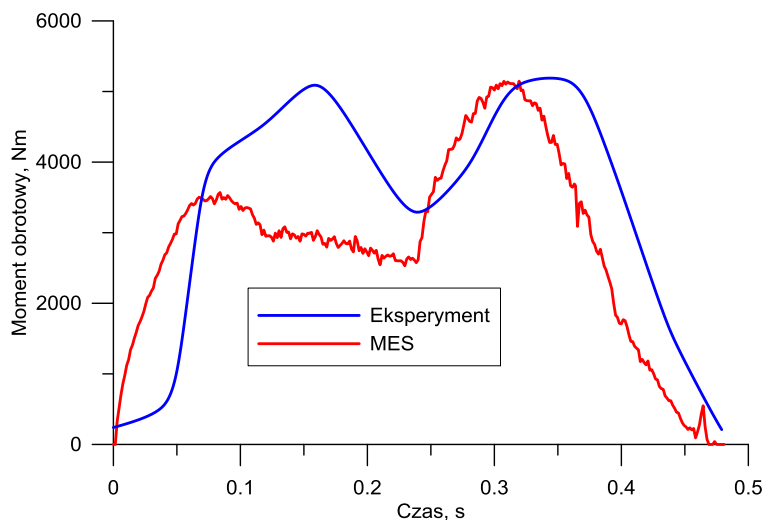
**Rys. 4.11.** Próby walcowania kuźniczego odkuwki wałka stopniowanego: a) przedkuwka po I przepuszczeniu, b) odkuwka po drugim przepuszczeniu

Odwalcowane w trakcie eksperymentu przedkuwki wałka stopniowanego pokazano na rys. 4.12. Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych (w zakresie kształtu i wymiarów walcowanych odkuwek) pozostawały w dość dobrej zgodności z wynikami prowadzonych symulacji numerycznych. Szczegółowe oględziny ukształtowanych odkuwek wykazały niewielką deformację przekroju poprzecznego, przejawiającą się owalizacją zarysu. Ponadto zaobserwowano niewielką wypływkę w płaszczyźnie podziału narzędzi oraz niewielkie wygięcie osiowe odkuwek. Zaobserwowane mankamenty mogą wynikać z trudności w precyzyjnym ustawieniu wsadu w wykroju (podawanego przez niedoświadczzonego pracownika). Jednak pomimo zauważonych niedokładności, odwalcowane półfabrykaty z powodzeniem mogą być wykorzystane jako przedkuwki do dalszych operacji kucia.

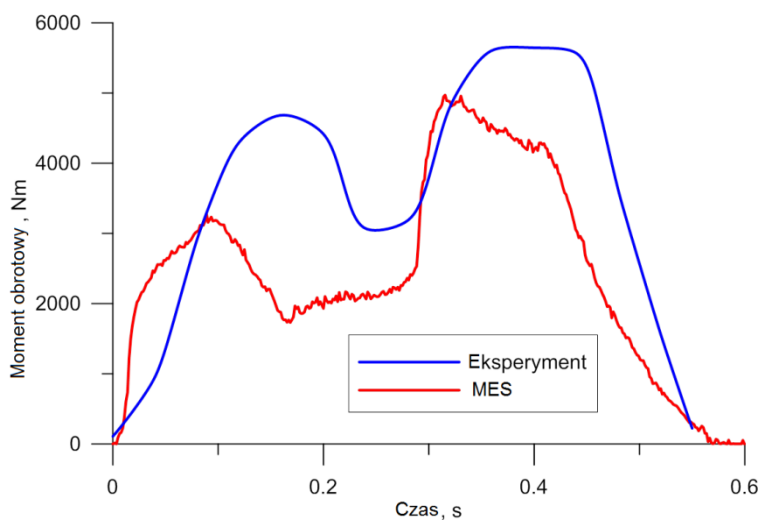


**Rys. 4.12.** Odkuwki wałka stopniowanego odwalcowane podczas eksperymentu

W trakcie prowadzonych badań (teoretycznych i doświadczalnych) wyznaczono również charakterystyki siłowe procesu walcowania, które pokazano na kolejnych rysunkach 4.13 i 4.14. Cechą charakterystyczną uzyskanych przebiegów jest stosunkowo dobra zgodność wyników eksperymentalnych i numerycznych, zarówno dla walcowania w wykrojach owalnych, jak i wykrojach kołowych. Natomiast zaobserwowane różnice w ekstremalnych wartościach momentów, które uzyskano podczas modelowania numerycznego i eksperymentu mogą być związane z rozbieżnościami w przyjętym modelu materiałowym. Ponadto charakter uzyskanych rozbieżności (większe wartości momentów uzyskane podczas eksperymentu), sugerują, że różnice związane są z temperaturą walcowanego materiału, która podczas eksperymentu spadała znacznie szybciej w stosunku do przyjętych założeń numerycznych. Wartości maksymalne momentów obrotowych, jakie zaobserwowano podczas kształtowania, wskazują, że proces jest możliwy do zrealizowania na zaprojektowanej maszynie.



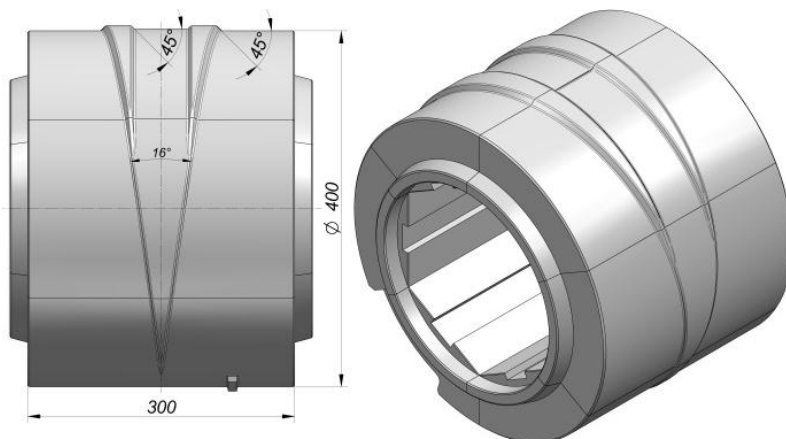
**Rys. 4.13.** Rozkład momentu obrotowego na jednym z segmentów podczas walcowania kúźnicznego odkuwki wałka stopniowanego w wykrojach owalnych (I przepust)



**Rys. 4.14.** Rozkład momentu obrotowego na jednym z segmentów podczas walcowania kúźnicznego odkuwki wałka stopniowanego w wykrojach kółowych (II przepust)

## 5. Badania procesu walcowania odkuwek w układzie poprzeczno-klinowym

Przydatność uniwersalnej walcarki do kształtowania odkuwek metoda WPK została określona w trakcie prób doświadczalnych, zrealizowanych z wykorzystaniem materiałów rzeczywistych. Podczas eksperymentu zaplanowano odwalcowanie takich samych odkuwek wałka stopniowanego (rys. 4.1), co w procesie walcowania wzdłużnego. Na potrzeby realizowanych badań została opracowana konstrukcja narzędzi klinowych. Kształt i główne wymiary walców przedstawiono na rysunku 5.1. Narzędzia mają budowę segmentową. Wykroje robocze każdego z walców tworzy sześć segmentów narzędziowych, wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco. Segmenty mocowane są do wałów głównych walcarki za pomocą dwóch czołowych nakrętek, co umożliwia łatwą wymianę oprzyrządowania. Na powierzchniach segmentów narzędziowych, które po złożeniu tworzą walce, wykonane są klinowe występy kształtujące odkuwkę, charakteryzowane przez takie parametry jak: kąt rozwarcia klina  $2\beta = 16^\circ$  oraz kąt kształtowania  $\alpha = 45^\circ$ . Z uwagi na niewielkie wartości współczynnika gniotu ( $\delta = D/d$ ) walcowanych stopni ( $\delta_1 = 1,5$  oraz  $\delta_2 = 1,07$ ), przyjęte wartości kątów są większe od zalecanych w specjalistycznej literaturze [83]. Na ostatnich segmentach wykonano obniżenia, których zadaniem jest usuwanie odwalcowanych odkuwek z przestrzeni roboczej walcarki.



**Rys. 5.1.** Kształt jednego zestawu segmentów narzędziowych do walcowania poprzeczno-klinowego odkuwki wałka stopniowanego

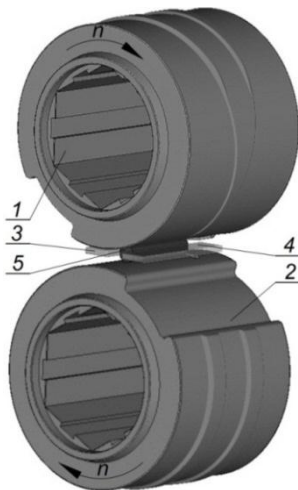
## 5.1. Modelowanie numeryczne procesu WPK

Wstępnej weryfikacji konstrukcji zaprojektowanych narzędzi dokonano w oparciu o wyniki obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych. Symulacje walcowania poprzeczno-klinowego odkuwki wałka stopniowanego zostały przeprowadzone w oprogramowaniu Simufact. Forming w wersji 11. Zbudowany na potrzeby obliczeń model geometryczny analizowanego procesu przedstawiono na rys. 5.2. W skład modelu wchodzi dwa jednakowe walce z nawiniętymi na obwodzie klinami – 1, 2, zamodelowane jako obiekty sztywne, dwie prowadnice – 3, 4 oraz wsad – 5 (pręt o wymiarach  $\varnothing 30$  mm i długości  $l = 150$  mm. Walce robocze w trakcie symulacji obracały się w tym samym kierunku z prędkością obrotową  $n = 16,5$  obr/min. Wsad wykonany z niestopowej stali węglowej w gatunku C45 zamodelowano jako obiekt sztywno-plastyczny przy pomocy ośmiowęzłowych elementów sześciennych. Model materiałowy stali C45 zaczerpnięto z bazy danych zastosowanego oprogramowania i określony był zależnością [137]:

$$\sigma_p = 2859,85 \cdot e^{(-0,00312548 \cdot T)} \cdot e^{(0,000044662 \cdot T - 0,101268)} \cdot e^{\left(\frac{-0,000027256 \cdot T + 0,000818308}{\varepsilon}\right)} \cdot \dot{\varepsilon}^{(0,000151151 \cdot T - 0,00274856)}, \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – temperatura (w zakresie od 700 °C do 1250 °C),  $\varepsilon$  – odkształcenie,  $\dot{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia.

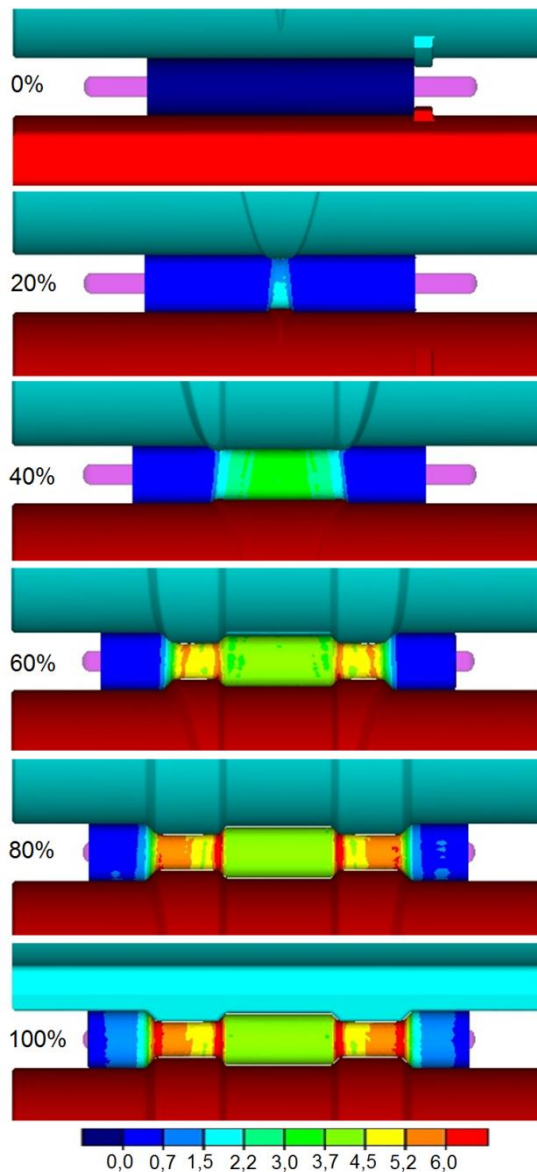
Początkowa temperatura wsadu wynosiła 1150 °C, zaś temperatura narzędzi pozostawała stała i wynosiła 50 °C. Na powierzchniach styku materiał – narzędzia przyjęto model tarcia stałego, reprezentowany przez czynnik tarcia o wartości  $m = 0,9$ . Współczynnik wymiany ciepła między materiałem, a narzędziami wynosił 20 kW/m<sup>2</sup>K, zaś między materiałem a otoczeniem 0,35 kW/m<sup>2</sup>K.



**Rys. 5.2.** Model geometryczny WPK odkuwki wałka stopniowanego:  
1, 2 – narzędzia, 3, 4 – prowadnice,  
5 – wsad

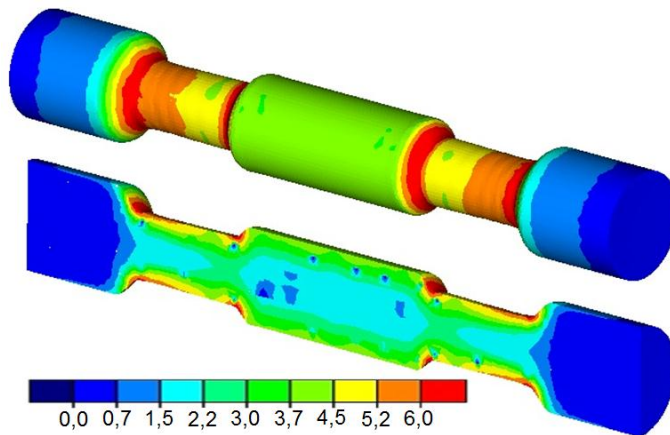
Podobnie, jak podczas analizy procesu walcowania wzdłużnego, w trakcie prowadzonych obliczeń wyznaczono kształt odkuwek, określono kinematykę płynięcia metalu w kolejnych etapach walcowania, wyznaczono rozkłady intensywności odkształcenia, temperatury, kryterium zniszczenia, naprężeń, oszacowano także parametry siłowe procesu.

Wyznaczoną MES progresję kształtu odkuwki wałka wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia pokazano na rys. 5.3.



**Rys. 5.3.** Wyznaczona MES progresja kształtu odkuwki wałka wraz z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

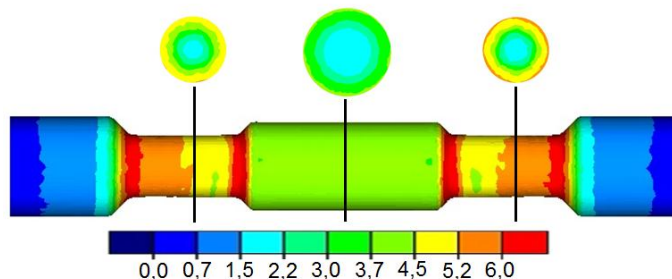
W początkowej fazie procesu klinowe powierzchnie, umieszczone na obracających się narzędziach stopniowo zagłębiają się w materiał. W rezultacie wsad wprawiany jest w ruch obrotowy, a na jego obwodzie kształtuje się pierścieniowy rowek, który w kolejnym etapie jest stopniowo rozszerzany do długości środkowego stopnia. Następnie rozpoczyna się jednocześnie kształtowanie dwóch wewnętrznych przewężeń. W tym etapie zewnętrzne powierzchnie klinowe oddziałując na materiał, redukują przekroje poprzeczne wewnętrznych stopni odkuwki do minimalnej średnicy, a następnie rozszerzają redukcję przekroju na całą długość tych stopni. Ten etap procesu związany jest z intensywnym wydłużeniem walcowanej odkuwki. W celu ograniczenia niebezpieczeństwa pęknięcia materiału w środkowej części odkuwki (uksztalowanej w początkowych etapach) oraz wyginania półwyrobu podczas walcowania wewnętrznych przewężeń, obniżono powierzchnię walcową centralnych klinów. W rezultacie wyeliminowano kontakt narzędzi z już ukształtowanym stopniem. W ostatniej fazie procesu, gdy wymagana redukcja przekroju została już rozwinięta na całą długość kształtowanych stopni odkuwki, rozpoczyna się etap kalibrowania, podczas którego klinowe powierzchnie narzędzi o stałej szerokości usuwają niedokładności kształtu powstałe w poprzednich fazach walcowania. Widoczne jest, że podczas walcowania występuje nierównomierny przerób plastyczny materiału w obszarze stopni o identycznej redukcji przekroju poprzecznego (rys. 5.4 oraz rys. 5.5).



**Rys. 5.4.** Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwki kształtowanej w procesie WPK

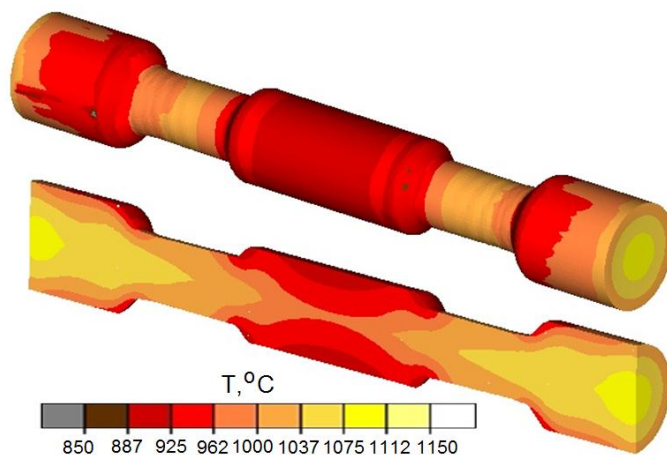
Rozkład odkształceń w przekrojach poprzecznych odwalcowanych stopni ma charakter pierścieniowy. Największe wartości występują w warstwach powierzchniowych, które następnie w miarę zbliżania się do stref centralnych odkuwki, szybko maleją. Potwierdza to powierzchniowy charakter płynięcia materiału w procesach WPK, który jest charakterystyczny dla większości

rotacyjnych technologii obróbki plastycznej. Powierzchniowy wzrost intensywności odkształceń jest również wynikiem generowania dodatkowych odkształceń w kierunku obwodowym (przez siły tarcia) w wyniku poślizgów pomiędzy kształtowanym materiałem, a narzędziami.



**Rys. 5.5.** Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w przekrojach poprzecznych odwalcowanych stopni odkuwki

Kolejny rys. 5.6 przedstawia rozkłady temperatury na powierzchni oraz w przekroju osiowym odwalcowanej odkuwki. Cechą charakterystyczną wyznaczonego rozkładu (rys. 5.6) jest niejednorodny i dość duży spadek temperatury w ukształtowanym półwyrobie (do około 880 °C). Jest to informacja szczególnie istotna ze względu na stosunkowo długi czas trwania procesu (około 4 s) oraz niewielką pojemność cieplną półwyrobu.



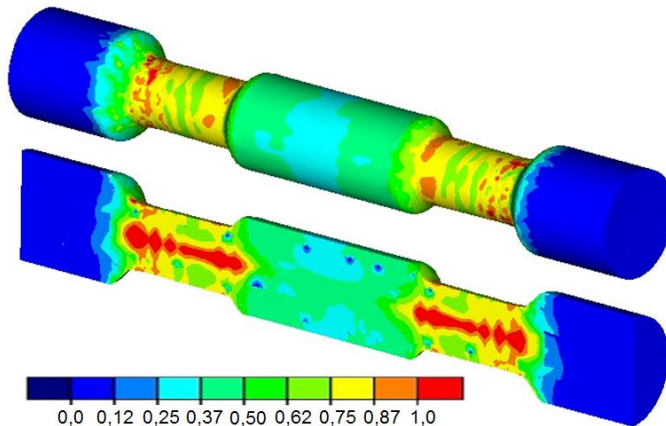
**Rys. 5.6.** Wyznaczone MES rozkłady temperatury na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwki kształtowanej w procesie WPK

Zaobserwowane spadki temperatury związane są przede wszystkim z oddawaniem ciepła do narzędzi i intensyfikują się w obszarze centralnego stopnia wyrobu, który kształtowany jest z najmniejszą wartością współczynnika gniotu. Natomiast w skrajnych stopniach półwyrobu, które nie podlegają



kształtowaniu zaobserwowano jedynie powierzchniowy spadek temperatury. Również w stopniach o największej redukcji przekroju utrzymuje się wysoka wartość temperatury. Niejednorodny rozkład temperatury należy tłumaczyć różnym stopniem przerobu plastycznego poszczególnych obszarów odkuwki. W strefach centralnych materiał najdłużej styka się z narzędziami, a niewielki przerób plastyczny nie jest w stanie zrekompensować strat ciepła. Znacznie większe odkształcenia plastyczne stopni pośrednich (o najmniejszej średnicy) pozwalają na utrzymanie wysokich temperatur. Natomiast zamiana pracy tarcia na ciepło, przekazywane do strefy centralnej skrajnych stopni pozwala na utrzymanie w nich wysokiej temperatury.

Rotacyjne procesy kształtowania związane są z niebezpieczeństwem pęknięcia materiału w obszarach centralnych odkuwek. Dlatego też podczas prowadzonych obliczeń dokonano oceny możliwości rozdzielenia materiału w oparciu o rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama (rys. 5.7).

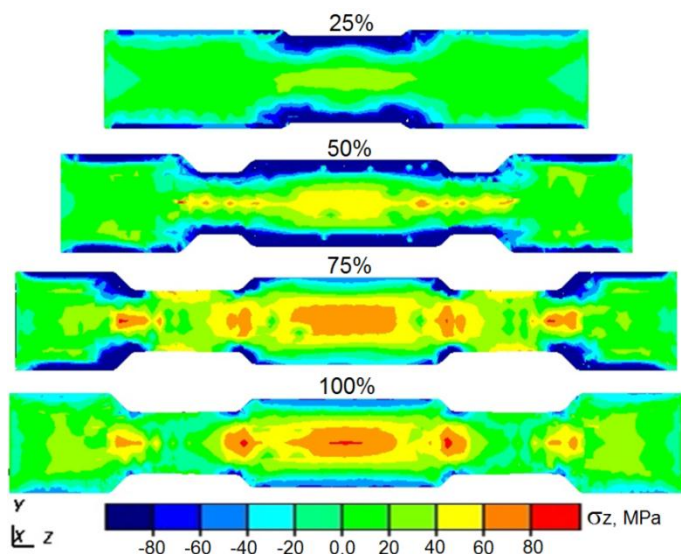


**Rys. 5.7.** Wyznaczone MES rozkłady kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama na powierzchni i w przekroju osiowym odkuwki kształtowanej w procesie WPK

Otrzymane rezultaty obliczeń wskazują, iż w przypadku walcowania poprzeczno-klinowego istnieje niebezpieczeństwo pęknięcia materiału w strefie centralnej, położonej w osi odkuwki oraz w obszarach przejściowych, między kolejnymi stopniami. Wartości całki Cockrofta-Lathama w tych miejscach (około 1,0) są bardzo duże i w zależności od charakteru naprężeń mogą przekraczać wartości graniczne dla stali C45. Co ciekawe, mechanizm powstawania pęknięć w niebezpiecznych obszarach odkuwki będzie odmienny. W przypadku stref centralnych pęknięcie odkuwki będzie związane z niskocyklowym zmęczeniem materiału, charakterystycznym dla rotacyjnych procesów obróbki plastycznej. Natomiast w obszarach przejściowych pomiędzy poszczególnymi stopniami odkuwki, które są kształtowane z różnymi gniotami, dochodzi jeszcze zjawisko skręcania półwyrobu. Spowodowane jest ono różnymi prędkościami obwodowymi walcowanych stopni. W rezultacie taki schemat obciążeń może

prowadzić do naruszenia spójności materiału, zwłaszcza w przypadku obniżenia jego plastyczności, wywołanego nadmiernym wychłodzeniem odkuwki.

Kolejnym ograniczeniem, które może się pojawić w trakcie WPK odkuwek jest przewężenie lub nawet zerwanie kształtowanych stopni. Zjawisko to spowodowane jest działaniem sił rozciągających wzdłuż osi odkuwki, które wywołane są przez klinowe powierzchnie narzędzi. Zgodnie z rysunkiem 5.8 rozkład naprężeń osiowych ( $\sigma_z$ ) jest silnie niejednorodny. Największe wartości koncentrują się w strefie centralnej odkuwki (wzdłuż jej osi) i następnie w miarę oddalania się od osi obserwuje się szybki spadek tych naprężeń. Widoczne jest również, że charakter rozkładu naprężeń osiowych w dużym stopniu uzależniony jest od stopnia zaawansowania procesu. W etapach intensywnego wydłużania odkuwki w warstwach powierzchniowych pojawiają się dość duże, osiowe naprężenia ściskające, przy jednoczesnym rozciąganiu rdzenia półfabrykatu. Wywołane są one siłami tarcia na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami, które hamują osiowe płynięcie materiału i przyczyniają się do powstawania odmiennego stanu naprężeń w rdzeniu i obszarach powierzchniowych. Największe wartości naprężeń rozciągających pojawiają się w ostatniej fazie procesu, gdy naciski na powierzchni materiału szybko spadają, powodując obniżenie osiowych sił tarcia. W rezultacie klinowe powierzchnie narzędzi powodują rozciąganie centralnej części odkuwki, przy braku przeciwstawnych naprężeń ściskających w obszarach powierzchniowych. Należy jednak zaznaczyć, że ekstremalne wartości naprężeń osiowych są stosunkowo niewielkie (około 80 MPa) i nie powinny mieć negatywnego wpływu na przebieg procesu.



**Rys. 5.8.** Wyznaczone MES rozkłady naprężeń w kierunku osiowym odkuwki w zależności od stopnia zaawansowania procesu

## 5.2. Badania doświadczalne WPK odkuwki wałka stopniowanego

Zadowalające wyniki symulacji numerycznych potwierdziły możliwość walcowania odkuwek wałka stopniowanego w oparciu o zaprojektowane narzędzia. Dlatego też na potrzeby eksperymentu wykonano dwa zestawy segmentów narzędziowych, których kształt był zgodny z rys. 5.1. Następnie narzędzia zostały zamontowane na wałach roboczych klatki walcowniczej (rys. 5.9).

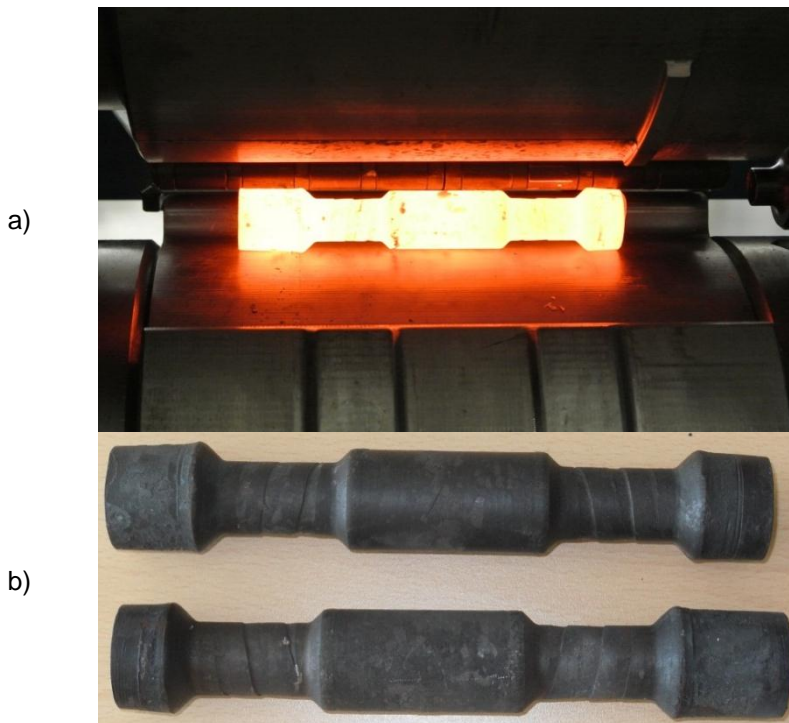
Wsad wykorzystany do prób walcowania stanowiły pręty ze stali w gatunku C45 o średnicy zewnętrznej  $\varnothing 30$  mm, i długości  $l = 150$  mm (zgodnie z wymiarami przyjętymi podczas obliczeń). Wsady nagrzewano w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około  $1150$  °C, a następnie wprowadzano je za pomocą kleszczy do przestrzeni roboczej walcarki (utworzonej przez dwa walce i dwie prowadnice). Położenie osiowe wsadu w przestrzeni roboczej ustalane było przy pomocy zderzaka w kształcie występu, umieszczonego na początkowym segmencie.



**Rys. 5.9.** Narzędzia klinowe wykorzystane do walcowania odkuwki zamontowane na wałach głównych walcarki

Następnie uruchamiano ruch obrotowy narzędzi, które obracając się w tym samym kierunku ze stałą prędkością  $n = 16,5$  obr/min kształtowały kolejne stopnie odkuwki. Po wykonaniu przez narzędzia pełnego obrotu następowało automatyczne zatrzymanie walców i usunięcie ukształtowanej odkuwki z przestrzeni roboczej. W trakcie walcowania półfabrykat utrzymywany był w przestrzeni roboczej narzędzi przez dwie prowadnice, przymocowane do stojaków klatki walcowniczej. Odległość między prowadnicami dobrano większą od maksymalnej średnicy walcowanych odkuwek, dzięki czemu nie następowało klinowanie się wyrobów podczas procesu (w wyniku lokalnego wzrostu średnicy odkuwki).

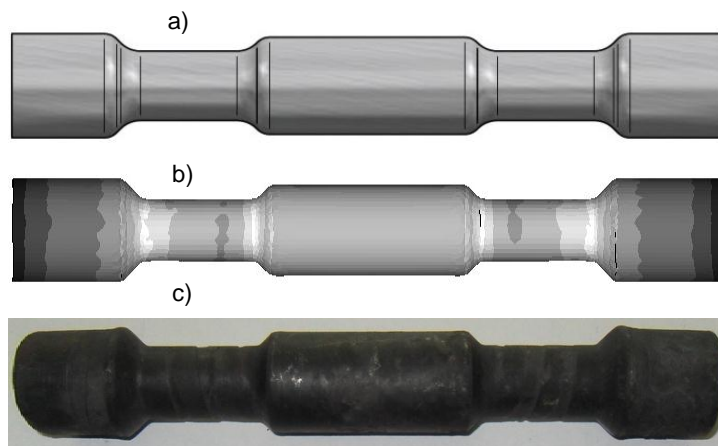
W trakcie eksperymentu stwierdzono, że proces walcowania odkuwek przebiegał stabilnie, nie zaobserwowano żadnych zjawisk ograniczających, które mogłyby negatywnie wpływać na jakość półwyrobu (poślizgu, przewężenia, wygięcia). Ukształtowane podczas prób doświadczalnych odkuwki wałków stopniowanych pokazano na rysunku 5.10.



**Rys. 5.10.** Odkuwki stopniowanego wałka ukształtowane w procesie WPK:  
a) bezpośrednio po walcowaniu, b) po ostygnięciu

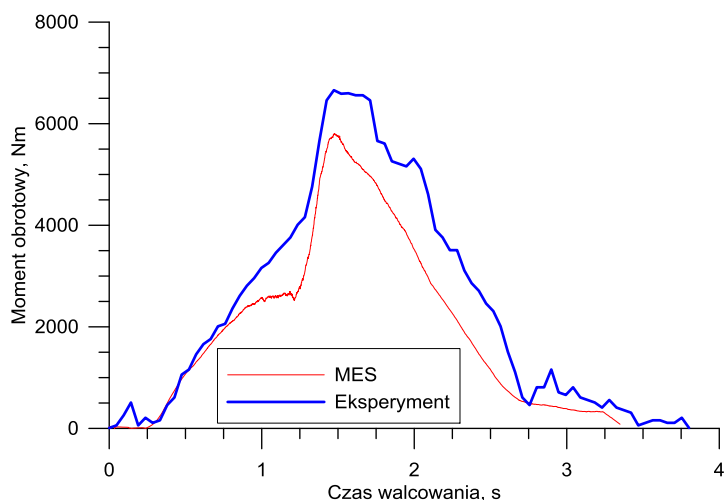
Uzyskane wyroby odznaczają się zadowalającą dokładnością i powtarzalnością kształtu, ale ograniczoną jakością powierzchni, spowodowaną przez spiralne rowki na ukształtowanych stopniach. Związane były one z zastosowaniem zbyt małych promieni zaokrąglenia krawędzi klinów. Należy jednak wspomnieć,

że głębokość powstałych rowków nie przekraczała 0,15 mm, co mieści się w obszarze pozostawionego naddatku na obróbkę wykańczającą. Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych (w zakresie kształtu i wymiarów walcowanych odkuwek) pozostawały w dobrej zgodności z założeniami teoretycznymi (kształtem odkuwki opracowanym na etapie projektowania) oraz wynikami prowadzonych symulacji numerycznych (rys. 5.11). W celu wykrycia ewentualnych wad wewnętrznych w odwalcowanych odkuwkach wykonano badania defektoskopowe. W tym celu wykorzystano defektoskop ultradźwiękowy typu OmniScan UT. Uzyskane wyniki nie wskazują na występowanie pęknięć wewnętrznych w ukształtowanych półwyrobach. Nie stwierdzono również występowania często pojawiających się podczas WPK wad, takich jak: pęknięcia powierzchniowe, zawalcowania oraz wygięcie osi odkuwki (pomimo jej dużej smukłości).



**Rys. 5.11.** Kształt odkuwki wałka stopniowanego: a) model CAD, b) wyznaczonej MES, c) odwalcowanej w trakcie eksperymentu

W trakcie prowadzonych badań (teoretycznych i doświadczalnych) dokonano rejestracji parametrów siłowych procesu (momentów obrotowych), których przebiegi przedstawiono na rysunku 5.12. Cechą charakterystyczną uzyskanych przebiegów jest duża zbieżność wyników eksperymentalnych i numerycznych, zarówno jakościowych, jak i ilościowych. Natomiast zaobserwowana różnica w ekstremalnych wartościach momentów, które uzyskano podczas modelowania numerycznego i eksperymentu może być związana z rozbieżnościami w przyjętym do obliczeń modelu materiałowym (stali C45) z jej faktycznymi właściwościami. Nie bez znaczenia są również trudności w utrzymaniu jednakowych warunków termicznych podczas kształtowania i modelowania MES, co może wpływać na wartości momentów obrotowych. Zaobserwowane różnice są stosunkowo niewielkie (wynoszą około 10,5%), co w przypadku tego typu procesów jest zadowalającym wynikiem.



**Rys. 5.12.** Przebieg momentu obrotowego podczas WPK odkuwki wałka stopniowanego

W trakcie badań podjęto również próby (zakończone powodzeniem) walcowania odkuwek ze stopów metali nieżelaznych. Przykładowe odkuwki wałka stopniowanego, odwalcowane ze stali, stopu aluminium oraz stopu tytanu pokazano na rys. 5.13.



**Rys. 5.13.** Odkuwki stopniowanego wałka odwalcowane metodą WPK podczas prób w uniwersalnej walcarce kuźniczej: a) ze stali C45, b) ze stopu aluminium 2618, c) ze stopu tytanu Ti6Al4V

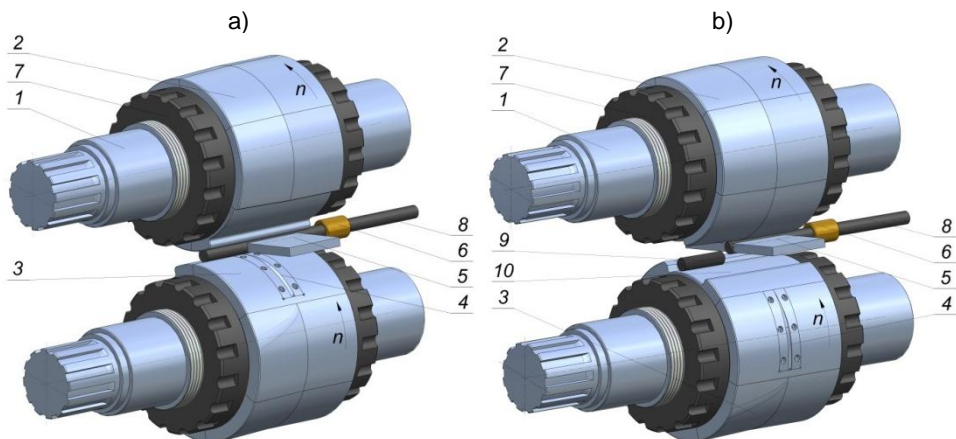
Na podstawie uzyskanych wyników jednoznacznie stwierdzono, że możliwe jest kształtowanie osiowoosymetrycznych odkuwek stopniowanych wałków metodą walcowania poprzeczno-klinowego w uniwersalnej walcarce kuźniczej.



## 6. Dzielenie bezodpadowe prętów w uniwersalnej walcierce kuźniczej

Trzecią technologią, która jest planowana do realizacji w uniwersalnej walcierce kuźniczej jest dzielenie bezodpadowe. Jak już wcześniej wspomniano, proces dzielenia bezodpadowego ma duże szanse wdrożenia przemysłowego w przypadku zastosowania niedrogich i wydajnych maszyn z narzędziami obrotowymi. Wydaje się, że opracowana konstrukcja walcarki doskonale nadaje się do realizacji również tego procesu. Dlatego też w celu potwierdzenia zakładanych możliwości technologicznych walcarki przeprowadzono próby łamania prętów w warunkach laboratoryjnych.

Idea dzielenia bezodpadowego jest stosunkowo prosta i polega na zaadoptowaniu technologii WPK narzędziami obrotowymi do ukształtowania pierścieniowego karbu w miejscu podziału, a następnie cyklicznym przeginananiu łamanego pręta, podczas ruchu obrotowego pręta między stożkowymi powierzchniami narzędzi (rys. 6.1).



**Rys. 6.1.** Schemat procesu dzielenia bezodpadowego prętów w uniwersalnej walcierce kuźniczej: a) początek procesu, b) koniec procesu; 1 – wał główny, 2 – segment narzędziowy górny, 3 – segment narzędziowy dolny, 4 – nóż, 5 – prowadnica, 6 – tuleja wprowadzająca, 7 – nakrętka czołowa, 8 – pręt do dzielenia, 9 – odcięty półwyrób, 10 – gniazdo do usuwania półfabrykatów

Pręty do dzielenia podawane są do przestrzeni roboczej w specjalnej tulei wprowadzającej, umieszczonej w stojaku klatki roboczej w osi walcowania. Długość dzielonego półwyróbu ustalana jest przy pomocy zderzaka,



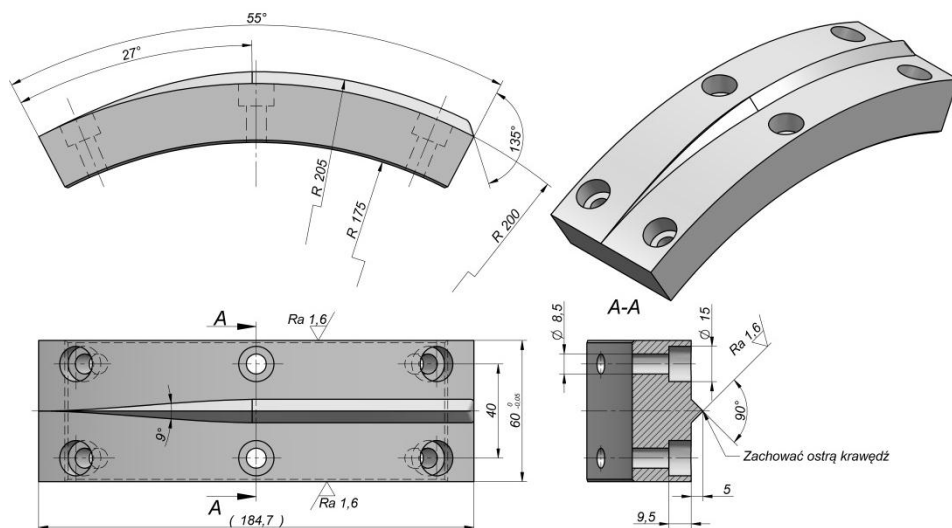
umieszczonego w drugim stojaku, naprzeciwko tulei wprowadzającej. Ucinki prętów są samoczynnie usuwane z przestrzeni roboczej, dzięki czemu proces może być realizowany w sposób ciągły (bez konieczności zatrzymywania ruchu obrotowego walców).

## 6.1. Konstrukcja narzędzi do dzielenia bezodpadowego prętów

Na potrzeby badań opracowano konstrukcję narzędzi do dzielenia bezodpadowego, które pokazano na rys. 6.2 (zestaw narzędzi górnych) oraz rys. 6.3. (zestaw narzędzi dolnych). Sposób montażu narzędzi dostosowano do rozwiązania konstrukcyjnego klatki walcowniczej (zaciskanie segmentów na powierzchniach stożkowych przy pomocy dwóch nakrętek czołowych). Zaprojektowane zestawy narzędziowe składają się z sześciu segmentów, których powierzchnia robocza (po złożeniu narzędzi) tworzy cztery strefy: wprowadzającą pręt, wygniatającą karb, rozdzielającą oraz wyjściową. W pierwszej strefie – wprowadzającej, powierzchnia robocza ma kształt walca i jej zadaniem jest ułatwienie bezkolizyjnego wprowadzania pręta do przestrzeni roboczej oraz ustalenie jego położenia względem narzędzi przy pomocy regulowanego zderzaka. W drugiej strefie umieszczone są klinowe noże wygniatające karb na obwodzie dzielonego pręta. Strefa rozdzielająca ma kształt walcowo-stożkowych powierzchni, których zadaniem jest obracanie półfabrykatu i jego cykliczne przeginanie, aż do pęknięcia zmęczeniowego materiału w obszarze uprzednio wykonanego karbu. Stożkowe powierzchnie dolnych i górnych segmentów narzędziowych pochylone są w przeciwnych kierunkach, w ten sposób, że po zmontowaniu narzędzi na wałach, ich tworzące są do siebie równoległe i pochylone w jednym kierunku w stosunku do osi walcowania. Przy czym powierzchnie cylindryczne mają za zadanie wywołać ruch obrotowy pręta, zaś powierzchnie stożkowe doprowadzić do przeginania dzielonego odcinka pręta podczas jego ruchu obrotowego. W ostatniej strefie – wyjściowej na powierzchni segmentów wykonano specjalne obniżenia, w których usuwany jest ucinek pręta z przestrzeni roboczej walcarki podczas nagniatania kolejnego rowka na dzielonym materiale. Zaprojektowane narzędzia charakteryzowane są przez takie parametry jak: średnica robocza walców  $\varnothing 400$  mm (umożliwia dzielenie prętów o średnicach od  $\varnothing 30$  mm do  $\varnothing 70$  mm), kąt pochylenia powierzchni stożkowych (gnących)  $\theta = 2,5^\circ$ , długość powierzchni cylindrycznej (w strefie rozdzielania)  $l_1 = 150$  mm, długość powierzchni stożkowej (w strefie rozdzielania)  $l_2 = 150$  mm. Ponadto przyjęto, że noże nagniatające karb będą wykonane jako wkładki wymienne. Taka konstrukcja umożliwi łatwą ich wymianę i regenerację. Konstrukcja noży nagniatających została przedstawiona na rysunku 6.4. Do eksperymentu przyjęto, że wysokość występu noża będzie wynosiła  $h = 5$  mm, kąt kształtowania  $\alpha = 45^\circ$ , kąt rozwarcia klina  $\beta = 9^\circ$  oraz kąt nawinięcia klinowego występu nagniatającego  $55^\circ$ .







Uwaga:

Materiał: SW18

1. Ostre krawędzie stępić 0,5 x 45 stopni.
2. Hartować i odpuszczać do twardości 62 +/- 2 HRC.

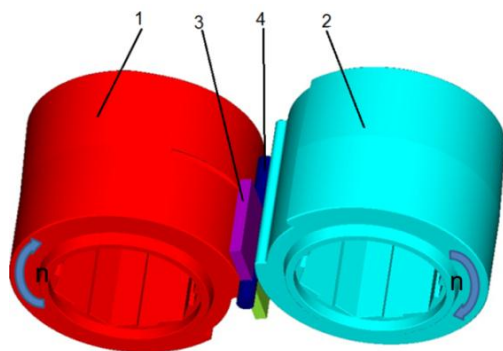
**Rys. 6.4.** Konstrukcja noża nagiatającego, umieszczonego w narzędziach do dzielenia bezodpadowego

## 6.2. Analiza numeryczna dzielenia bezodpadowego prętów w uniwersalnej walcierce kuzniczej

Symulacje numeryczne procesu dzielenia bezodpadowego w układzie dwóch narzędzi obrotowych przeprowadzono w oprogramowaniu Simufact. Forming. Do obliczeń przyjęto, że zostanie zamodelowany proces dzielenia prętów stalowych w gatunku C45 o średnicy  $\varnothing 30$  mm na odcinki o długości  $l = 100$  mm. Celem prowadzonych obliczeń była weryfikacja opracowanej konstrukcji narzędzi.

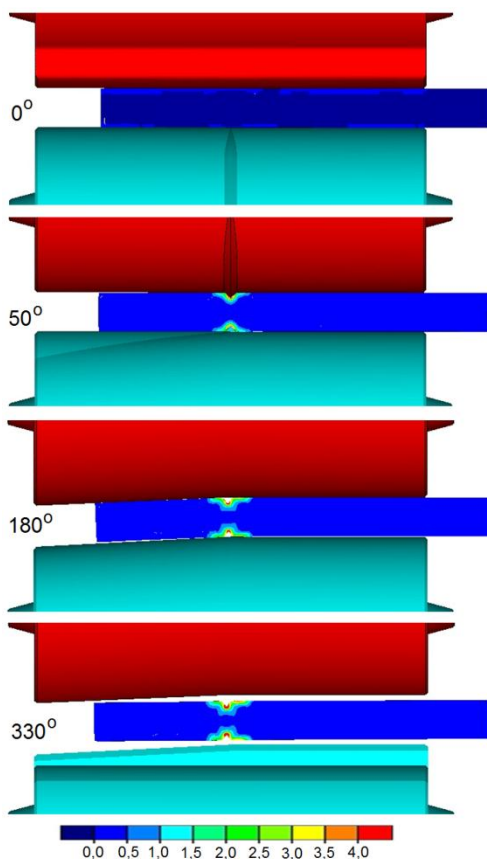
Zbudowany na potrzeby analizy model geometryczny procesu dzielenia pokazano na rys. 6.5. Składa się on z dwóch segmentów narzędziowych: dolnego – 1 oraz górnego – 2, dwóch prowadnic – 3 oraz dzielonego pręta – 4. Narzędzia zamodelowano jako obiekty sztywne, natomiast półfabrykat opisano jako obiekt sprężysto-plastyczny, modelowany przy pomocy heksagonalnych elementów ośmiowęzłowych. Podobnie, jak w poprzednich analizach, model materiałowy stali C45 przyjęto z bazy danych oprogramowania Simufact. Forming. Ponadto założono, że powierzchnia kontaktu między narzędziami, a materiałem jest opisana modelem tarcia stałego, reprezentowanym przez czynnik tarcia o wartości  $m = 0,5$ . W trakcie procesu narzędzia obracają się w zgodnym kierunku, z jednakowymi prędkościami, wynoszącymi  $n = 16,5$  obr/min. Z uwagi na trudności natury numerycznej w zamodelowaniu całkowitego

rozdzielenia materiału, wyniki symulacji wykorzystano jedynie do wstępnej oceny możliwości rozdzielenia materiału, które następnie zostały zweryfikowane podczas prób doświadczalnych.



**Rys. 6.5.** Model geometryczny procesu dzielenia bezodpadowego prętów, wykorzystany w obliczeniach MES: 1 – segment narzędziowy dolny, 2 – segment narzędziowy górny, 3 – prowadnica, 4 – łamany pręt

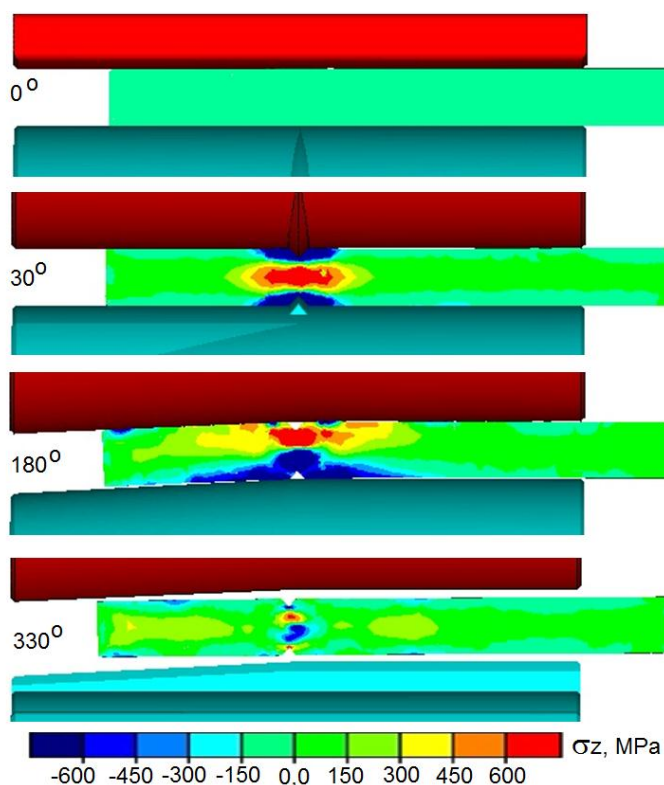
Wyznaczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w przekroju osiowym pręta, w zależności od kąta obrotu narzędzi pokazano na rys. 6.6.



**Rys. 6.6.** Wyznaczony MES rozkład intensywności odkształcenia (w przekroju osiowym pręta) podczas dzielenia bezodpadowego materiału w zależności od kąta obrotu narzędzi

Widoczne jest, że w początkowym etapie procesu, podczas wygniatania pierścieniowego rowka odkształcenia lokalizują się wyłącznie w obszarze tworzącego się przewężenia. Wraz z rozpoczęciem gięcia obrotowego poszerza się objętość materiału podlegająca uplastycznieniu na strefy bezpośrednio przylegające do odwalcowanego karbu. Wielokrotne przeginanie pręta powoduje deformację wykonanego w pierwszym etapie rowka. Można również zauważyć niewielkie przemieszczenie osiowe pręta, spowodowane oddziaływaniem stożkowych powierzchni narzędzi.

Zginanie obrotowe pręta prowadzi do koncentracji cyklicznie zmiennych naprężeń w obszarze wykonanego karbu. W rezultacie taki schemat obciążenia powoduje niskocyklowe zmęczenie materiału, którego efektem jest jego rozdzielanie. Rozkład naprężeń głównych, działających w kierunku osi pręta pokazano na rys. 6.7.

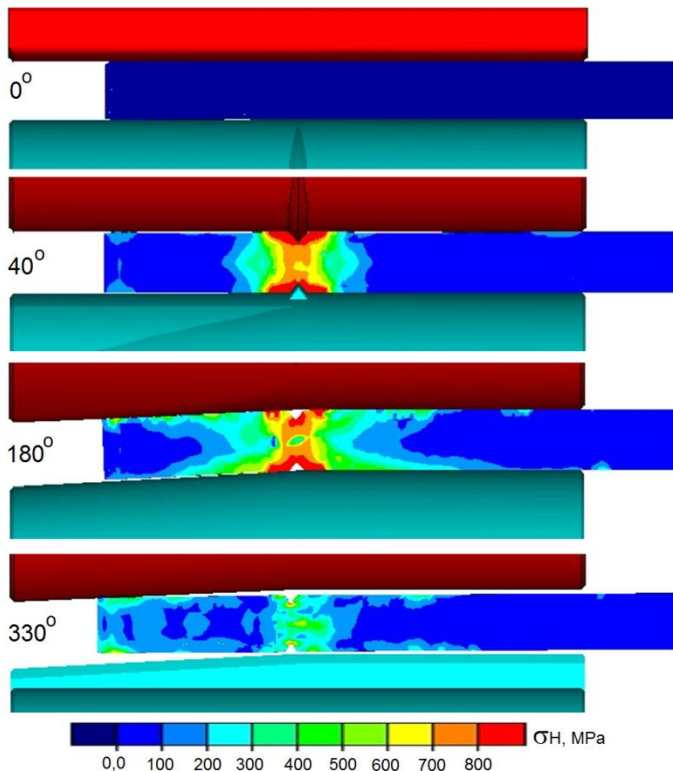


**Rys. 6.7.** Wyznaczony MES rozkład naprężeń głównych w kierunku osi pręta (w przekroju osiowym), podczas dzielenia bezodpadowego w zależności od kąta obrotu narzędzi

Obszar występowania naprężeń ściskających i rozciągających ulega cyklicznym zmianom podczas ruchu obrotowego pręta. Dla przyjętego kształtu narzędzi, pręt w czasie dzielenia (w fazie gięcia obrotowego) może obrócić się ponad dziewięć

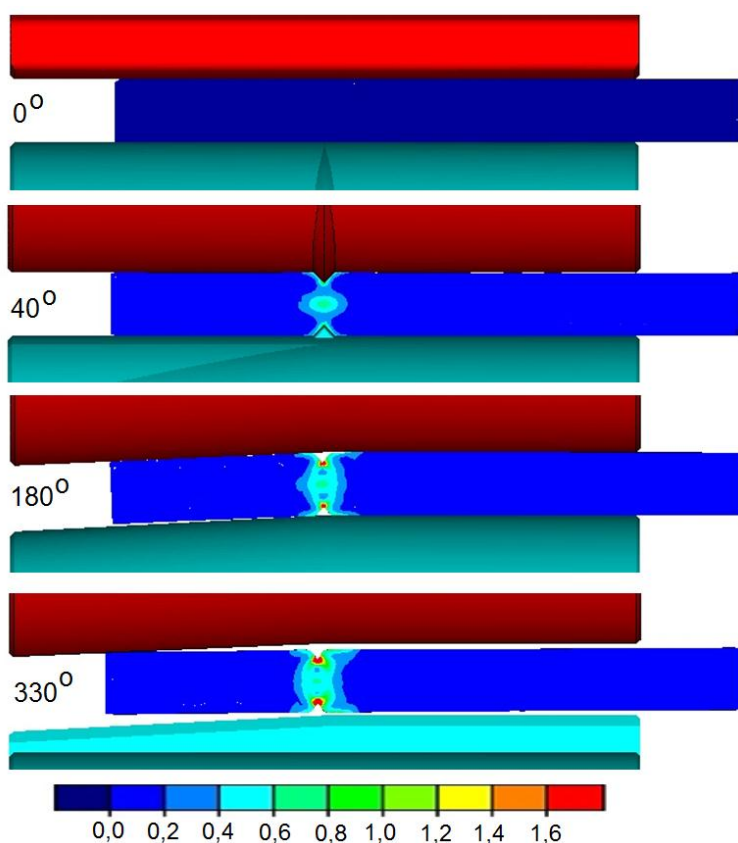
razy, powodując dziewiętnastokrotną zmianę naprężeń. Przy amplitudzie naprężeń przekraczającej 1200 MPa, występuje bardzo duże prawdopodobieństwo pęknięcia materiału podczas gięcia obrotowego pręta.

W celu oszacowania stopnia wyężenia materiału w strefie dzielenia, a tym samym określenia możliwości pęknięcia doraźnego materiału, przeprowadzono analizę rozkładu naprężeń zredukowanych, które zostały określone na podstawie energetycznej hipotezy wytrzymałościowej Hubera – Misesa (rys. 6.8). Zgodnie z tą hipotezą, pęknięcie kruche materiału nastąpi w chwili, gdy wartość naprężeń zredukowanych przekroczy wytrzymałość rozdzielczą  $R_m$  dzielonego materiału. Uzyskane wyniki wskazują, że podczas dzielenia nie powinno dochodzić do doraźnego pęknięcia materiału, a jedynie do inicjowania pęknięć w warstwach zewnętrznych materiału. Spostrzeżenie to potwierdza obszar koncentracji maksymalnych naprężeń zredukowanych ( $\sigma_H = 800$  MPa), które przekraczają wytrzymałość materiału (dla stali C45  $R_m$  wynosi około 720 MPa). Jednak obszar ten jest stosunkowo niewielki i znajduje się bezpośrednio w strefie wykonanego karbu. Następnie w wyniku rotacyjnego gięcia materiału pęknięcia w warstwach zewnętrznych będą propagowane w kierunku osi pręta, aż do całkowitego rozdzielenia.



**Rys. 6.8.** Wyznaczony MES rozkład naprężeń zredukowanych (w przekroju osiowym pręta) podczas dzielenia bezodpadowego w zależności od kąta obrotu narzędzi

Podatność materiału do rozdzielenia oceniono również w oparciu o rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama. Mapy obrazujące rozkład całki Cockrofta-Lathama w przekroju osiowym pręta dla różnych położań kątowych narzędzi pokazano na rys. 6.9. Zgodnie z oczekiwaniami, największe wartości kryterium lokalizują się w obszarze rowka. Przy czym w początkowych etapach (podczas kształtowania rowka), wartości stałej są stosunkowo niewielkie. Dopiero podczas cyklicznego gięcia można zaobserwować wzrost kryterium do wartości, przy których powinno nastąpić rozdzielenie materiału. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami autora [153], dla stali w gatunku C45 wartość stałej C, przy której dochodzi do pęknięcia wynosi 0,69 (dla podanego schematu obciążenia).



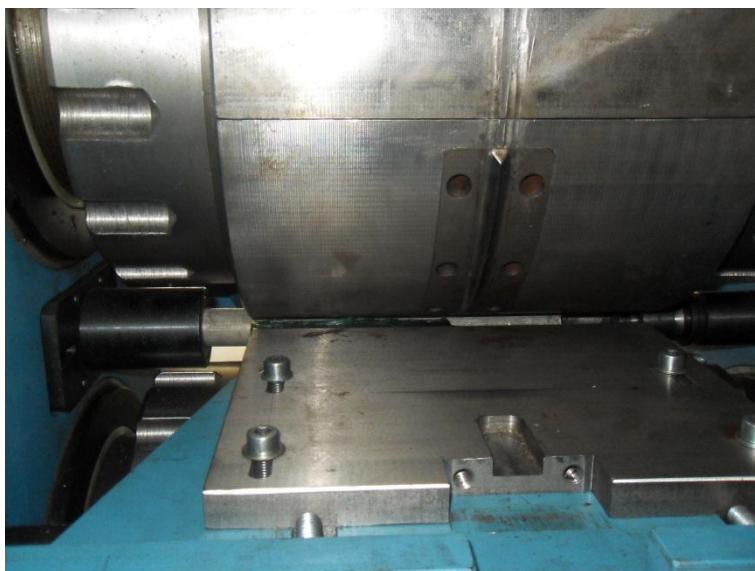
**Rys. 6.9.** Wyznaczony MES rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama w przekroju osiowym dzielonego pręta, w zależności od kąta obrotu narzędzi

### 6.3. Badania doświadczalne dzielenia prętów

W celu ostatecznego potwierdzenia przydatności uniwersalnej walcarki kującej do dzielenia bezodpadowego prętów przeprowadzono serię prób



doświadczalnych procesu. Na potrzeby eksperymentu wykonano dwa zestawy segmentów narzędziowych (górný i dolny), których parametry geometryczne były zgodne z przyjętymi podczas symulacji numerycznych (rys. 6.2 oraz rys. 6.3). Następnie narzędzia zostały zamontowane na wałach walcarki (rys. 6.10). Na potrzeby badań ustawiono odległość między osiami walców, która wynosiła 430 mm. Dzieleniu poddano pręty stalowe w gatunku C45 w stanie normalizowanym, których średnica wynosiła  $\varnothing 30$  mm. Pozostałe parametry procesu były identyczne z tymi, przy których prowadzono obliczenia.



**Rys. 6.10.** Narzędzia do dzielenia bezodpadowego, zamontowane w uniwersalnej walcierce kúźnicznej

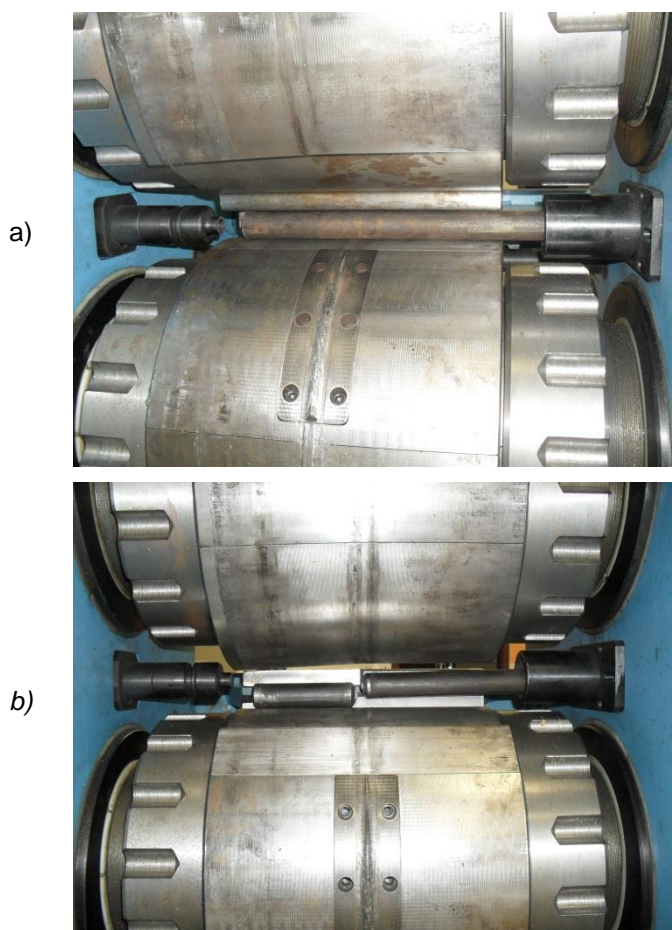
Dzielenie prętów zrealizowano w pięciu etapach:

- umieszczenie pręta w przestrzeni roboczej (rys. 6.11a),
- ustalenie jego położenia osiowego przy pomocy zderzaka,
- uruchomienie napędu wałów roboczych,
- dzielenie materiału podczas ruchu obrotowego walców,
- zatrzymanie walców i usunięcie odciętego półfabrykatu (rys. 6.11b).

W efekcie przeprowadzonych prób eksperymentalnych potwierdzono poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych walcarki oraz jej możliwości technologiczne odnośnie realizacji procesów dzielenia bezodpadowego. Uzyskane podczas prób uciniki prętów pokazano na rys. 6.12. Na powierzchniach rozdzielania materiału można wyróżnić dwie charakterystyczne strefy: pierścieniową, zewnętrzną (gładką i błyszczącą), powstającą w trakcie walcowania rowka na obwodzie pręta oraz wewnętrzną (chropowatą i matową), powstającą podczas pęknięcia materiału. Na powierzchni pęknięcia materiału można zauważyć spiralne rowki, które mają przebieg od powierzchni zewnętrznej

ku osi pręta (rys. 6.13). Jest to cecha charakterystyczna procesów dzielenia, w których wykorzystuje się gięcie obrotowe do stopniowej propagacji pęknięć.

W trakcie realizowanych badań przeprowadzono również próby dzielenia prętów z innych materiałów niż stal, głównie ze stopów aluminium i miedzi. Uzyskane wyniki prób w pełni potwierdziły przydatność tej technologii do dzielenia okrągłych prętów stalowych oraz ze stopów metali nieżelaznych. Prowadzono także badania pod kątem możliwości dzielenia rur grubościennych, jednak technologia dzielenia bezodpadowego półwyrobów drążonych, pomimo obiecujących wyników, wymaga jeszcze dopracowania.



**Rys. 6.11.** Realizacja procesu dzielenia bezodpadowego: a) umieszczenie pręta w przestrzeni roboczej, b) końcowy etap procesu z rozdzielonym półfabrykatem

Możliwość dzielenia bezodpadowego prętów uzależniona jest od parametrów siłowych walcarki (momentu obrotowego) oraz od dopuszczalnego obciążenia wałów siłą rozporową (powodującą wyginanie wałów). Wyznaczone w trakcie

badania przebiegi momentu obrotowego dla jednego z wałów walcarki (wyznaczone MES oraz zarejestrowane w czasie eksperymentu) przedstawiono na rys. 6.14. Widoczne jest, że największe obciążenie maszyny występuje podczas walcowania pierścieniowego rowka (związane z odkształceniem materiału na zimno).

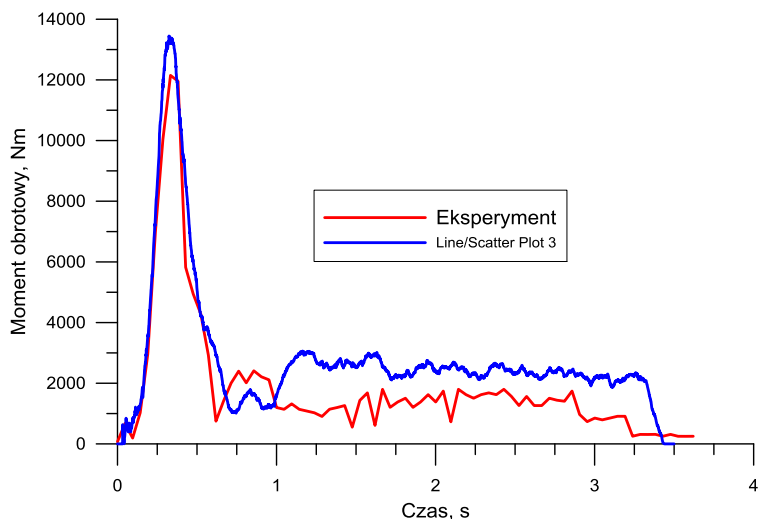


**Rys. 6.12.** Półwyroby otrzymane podczas prób dzielenia bezodpadowego w uniwersalnej walcierce kuźniczej



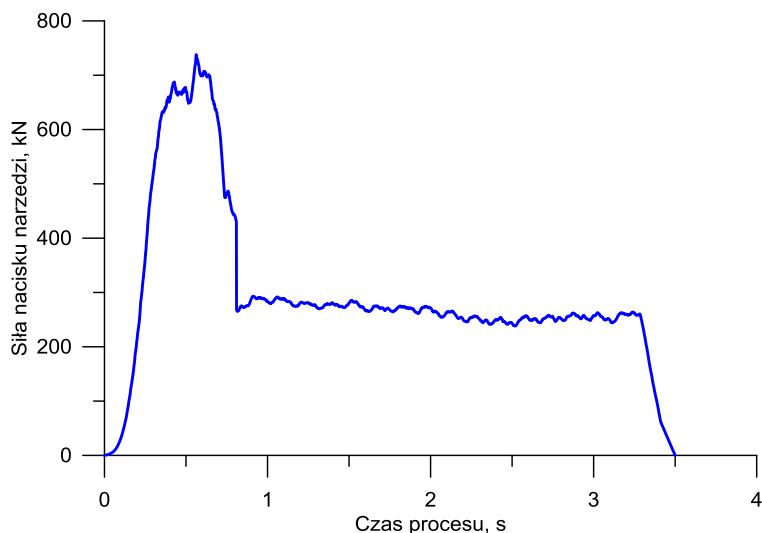
**Rys. 6.13.** Widok powierzchni rozdzielania pręta po procesie dzielenia w uniwersalnej walcierce kuźniczej

W tym etapie moment obrotowy osiąga wartość 12 kNm (w czasie prób doświadczalnych), co stanowi równowartość momentu nominalnego walcarki. Jednak dzięki wyposażeniu walcarki w koło zamachowe, możliwe jest chwilowe obciążenie wałów maszyny momentem o wartości do 20 kNm, bez niebezpieczeństwa przecięcia układu napędowego lub uszkodzenia elementów klatki roboczej. Następnie po wykonaniu pierścieniowego rowka obserwuje się kilkukrotny spadek wartości momentu obrotowego (do około 2 kNm). Jest to faza zginania obrotowego, podczas której opory są znacznie mniejsze. W chwili rozdzielania materiału moment walcowania przyjmuje wartości bliskie zera. Cechą charakterystyczną uzyskanych przebiegów jest duża zgodność, zwłaszcza jakościowa. Natomiast zaobserwowano niewielkie różnice między wartościami momentów wyznaczonych MES oraz zmierzonych podczas prób doświadczalnych. Najprawdopodobniej wynikają one z odkształceń sprężystych klatki walcowniczej. Na potrzeby obliczeń przyjęto narzędzia idealnie sztywne. W rzeczywistości klatka walcownicza ulega odkształceniom sprężystym, czego rezultatem jest zmniejszenie wartości momentu obrotowego.



**Rys. 6.14.** Przebiegi momentu obrotowego na jednym z wałów walcarki podczas dzielenia bezodpadowego prętów

W trakcie obliczeń wyznaczono również wartość siły nacisku narzędzi, która jest odpowiedzialna za odkształcenia sprężyste elementów klatki roboczej (rys. 6.15). Widoczne jest, że maksymalne wartości siły (około 760 kN) nie przekraczają obciążeń przyjętych podczas obliczeń sprawdzających maszyny (800 kN). Na tej podstawie można przypuszczać, że elementy klatki roboczej powinny zachować wymaganą sztywność podczas dzielenia prętów nawet o większych średnicach.



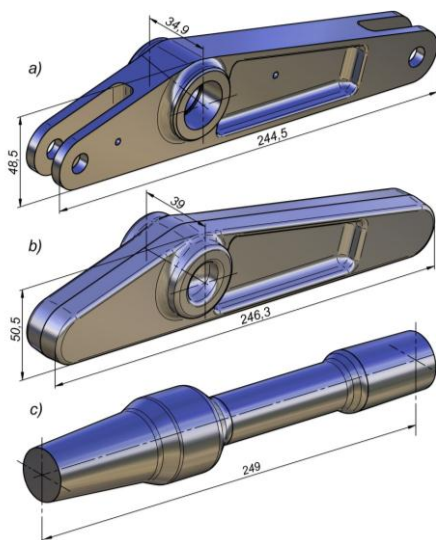
**Rys. 6.15.** Przebieg siły nacisku na jednym z narzędzi walcarki podczas dzielenia bezodpadowego prętów



## 7. Badania procesu walcowania przedkuwki dźwigni w uniwersalnej walcarni kuźniczej

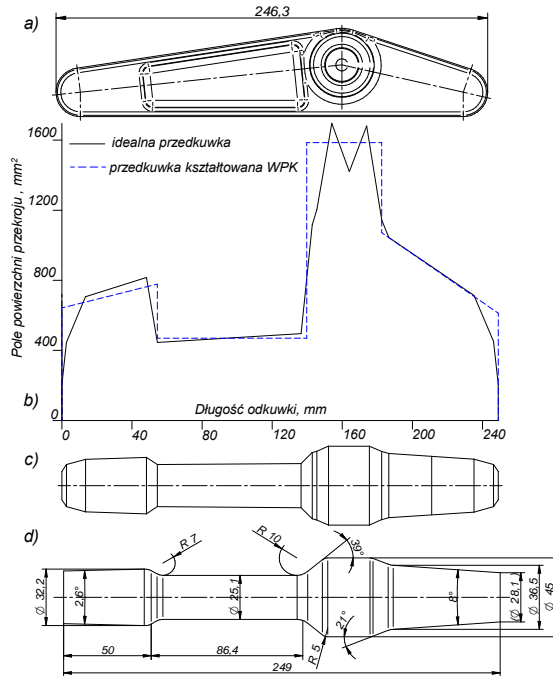
Dotychczasowe badania, które zrealizowano w uniwersalnej walcarni kuźniczej dotyczyły procesów walcowania stosunkowo prostego elementu. Zadowolające wyniki przeprowadzonych prób uruchomieniowych maszyny z wykorzystaniem materiałów rzeczywistych, skłoniły autora do opracowania technologii walcowania poprzeczno-klinowego bardziej złożonego wyrobu, który znajduje zastosowanie przemysłowe. W ten sposób możliwe stało się zweryfikowanie przydatności walcarki w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Elementem, który został wytypowany do kształtowania w walcarni była przedkuwka, stanowiąca półprodukt do operacji kucia odkuwki dźwigni (elementu konstrukcyjnego śmigłowca). Wybór ten nie był przypadkowy. Dźwignia wykonana jest ze stopu aluminium w gatunku 2014A (AlCuMg2). Obecnie brak jest szerszej wiedzy odnośnie walcowania poprzeczno-klinowego stopów metali lekkich, w tym aluminium, o czym świadczy uboga literatura dotycząca tej tematyki. Dlatego też w pełni zasadne stało się wykonanie kompleksowych badań, których głównym celem było określenie możliwości kształtowania stopów metali lekkich w opracowanej walcarni kuźniczej.

Kształt i wymiary gotowej części – dźwigni, półwyrobu (odkuwki) oraz materiału wyjściowego do kucia – przedkuwki pokazano na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Kształt i wymiary: a) dźwigni, b) odkuwki, c) przedkuwki

Kształt przedkuwki określono na podstawie wymiarów gotowej odkuwki. W tym celu sporządzono wykresy przekrojów odkuwki oraz idealnej przedkuwki, na podstawie których opracowano kształt idealnej i rzeczywistej przedkuwki (rys. 7.2).



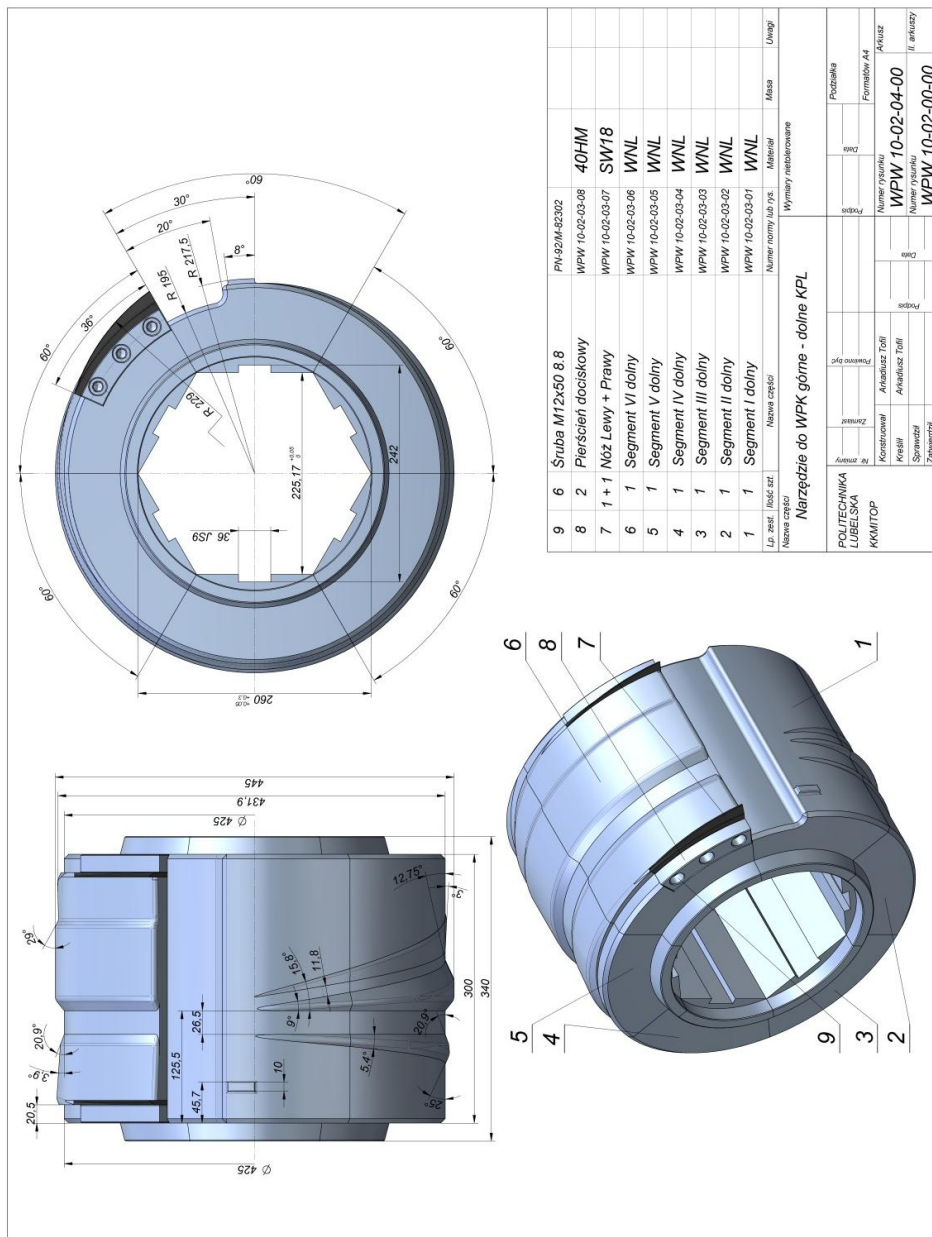
**Rys. 7.2.** Sposób projektowania przedkuwki: a) odkuwka, b) wykres przekrojów przedkuwki, c) idealna przedkuwka, d) rzeczywista przedkuwka

## 7.1. Konstrukcja narzędzi do walcowania przedkuwki

Planowana do odwalcowania przedkuwka charakteryzuje się dużym stopniem skomplikowania pod względem możliwości kształtowania w procesach WPK. Wynika to między innymi z braku symetrii oraz dużej wartości redukcji przekroju poprzecznego środkowego stopnia, koniecznej do uzyskanie na stosunkowo krótkiej drodze kształtowania ( $R_p = 69\%$ , przy założeniu, że średnica wsadu będzie równa największej średnicy przedkuwki). Przy wykorzystaniu konwencjonalnych narzędzi klinowych (zaprojektowanych zgodnie z zaleceniami wynikającymi z warunków stabilnego walcowania [69, 72]), ich długość przekraczałyby obwód walców. Drogę kształtowania można skrócić w wyniku zwiększenia wartości kąta rozwarcia klina  $\beta$ . Jednak pojawia się wtedy niebezpieczeństwo przewężenia i zerwania środkowego stopnia półwyrobu. Dlatego też w celu wyeliminowania niebezpieczeństwa przewężenia przedkuwki wprowadzono na skrajnym stopniu pochylenie, którego zadaniem jest hamowanie osiowego przemieszczania materiału.

7. Badania procesu walcowania przedkuwki dźwigni w uniwersalnej walcierce kuźniczej

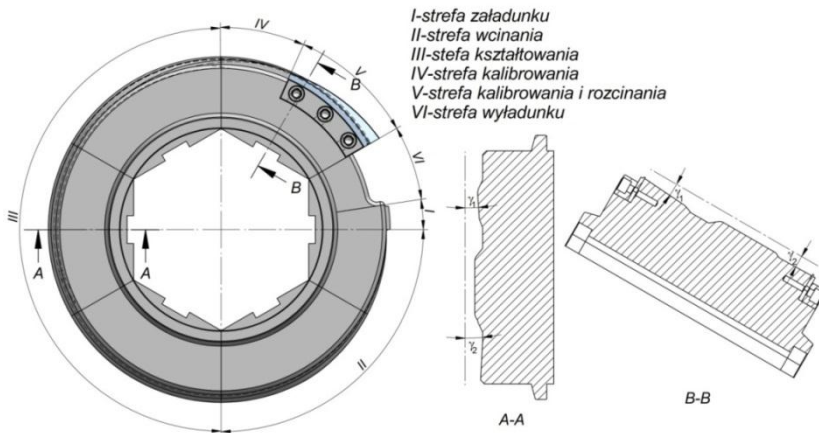
Jeden z zaprojektowanych zestawów narzędzi klinowych do walcowania przedkuwki pokazano na rys. 7.3. Składa się on z walca, który został podzielony na sześć segmentów, montowanych do wałów walcarki. Dodatkowo na ostatnim segmencie umieszczono wymienne noże, odcinające skrajne odpady od odwalcowanej przedkuwki.



Rys. 7.3. Zestaw narzędzi klinowych do WPK przedkuwki dźwigni



Klinową powierzchnię roboczą narzędzi można podzielić na sześć stref, w zależności od pełnionej funkcji (rys. 7.4). W pierwszej strefie następuje załadunek materiału wsadowego. W drugiej strefie klinowe występy wcinają się w walcowany materiał. W trzeciej strefie dochodzi do kształtowania kolejnych stopni przedkuwki. W kolejnych dwóch strefach (IV i V) następuje kalibrowanie ukształtowanej przedkuwki wraz z usunięciem niedokładności kształtu. Dodatkowo w piątej strefie umieszczone są noże, których zadaniem jest odcięcie skrajnych odpadów od walcowanego półfabrykatu. W ostatniej strefie wyładunku znajduje się wybranie, do którego spada ukształtowany półfabrykat, opuszczając w nim przestrzeń roboczą walcarki podczas walcowania kolejnej przedkuwki. Powierzchnie robocze narzędzi w strefie kształtowania i kalibrowania pochylone są w kierunku centralnej części segmentów pod kątami  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$ . Pochylenie powierzchni klinów ma za zadanie ograniczyć osiowe płynięcie materiału, które w obszarze największej redukcji przekroju przedkuwki może doprowadzić do nadmiernego przewężenia przedkuwki, a nawet jej zerwania. Dzięki takiemu rozwiązaniu zmniejszono długość roboczą narzędzi, co stwarza możliwość zamocowania ich na walcarkach o ograniczonej średnicy walców [93].



Rys. 7.4. Budowa narzędzia klinowego

## 7.2. Analiza numeryczna procesu WPK przedkuwki dźwigni

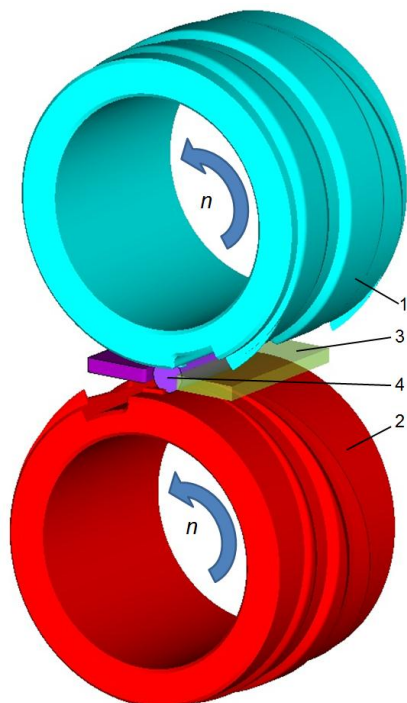
Weryfikację przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego narzędzi przeprowadzono w oparciu o wyniki symulacji numerycznych. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych (MES), wykorzystując pakiet oprogramowania Simufact. Forming. Obliczenia prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia z uwzględnieniem zjawisk termicznych. W efekcie możliwe stało się prześledzenie kinematyki płynięcia materiału oraz prognozowanie zjawisk zakłócających stabilny przebieg walcowania.

Na potrzeby prowadzonej analizy opracowano model geometryczny procesu walcowania przedkuwki dźwigni, który pokazano na rys. 7.5. Składa się on z dwóch walców: górnego – 1 oraz dolnego – 2, dwóch prowadnic – 3 oraz wsadu – 4. Narzędzia w kształcie walców zamodelowano jako elementy sztywne, na powierzchniach których umieszczono klinowe występy kształtujące. Wsad w postaci pręta o średnicy  $\varnothing 45$  mm i długości  $l = 150$  mm opisano modelem sztywno-plastycznym, a jego dyskretyzacji dokonano z użyciem elementów ośmiowęzłowych. Model materiałowy wsadu (stop aluminium w gatunku 2014A) przyjęto z bazy danych oprogramowania. Był on opisany zależnością [137]:

$$\sigma_p = 617,044 \cdot e^{(-0,0046728 \cdot T)} \cdot \varepsilon^{(-0,000281319 \cdot T - 0,048499)} \cdot e^{\left(\frac{0,0000189151 \cdot T - 0,0364602}{\varepsilon}\right)} \cdot \dot{\varepsilon}^{(0,000359241 \cdot T - 0,046827)}, \quad (4)$$

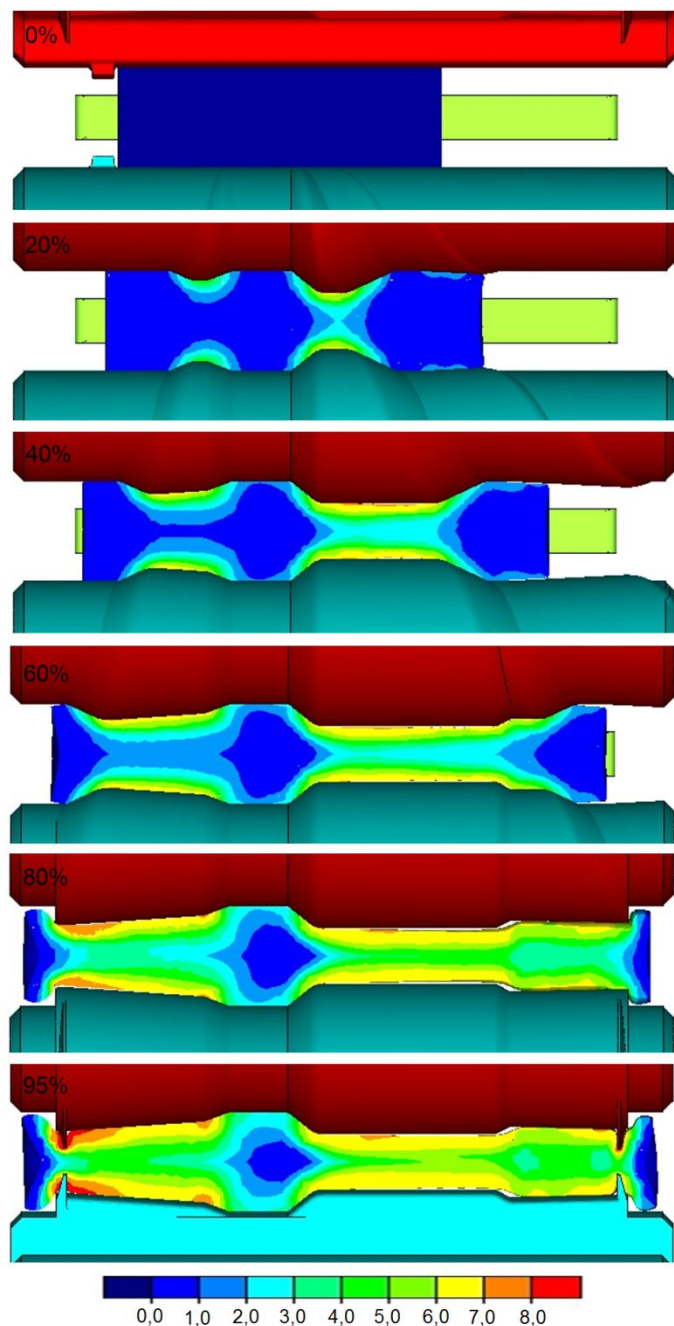
gdzie:  $T$  – temperatura (w zakresie od 300 °C do 480 °C),  $\varepsilon$  – odkształcenie,  $\dot{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia.

Pozostałe warunki brzegowe, jakie przyjęto do obliczeń to: temperatura początkowa wsadu 460 °C, temperatura narzędzi 100 °C (stała w trakcie procesu), czynnik tarcia  $m = 0,8$ , współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami 15 kW/m<sup>2</sup>K oraz między materiałem a otoczeniem 0,35 kW/m<sup>2</sup>K. W trakcie procesu walce obracały się w zgodnym kierunku z prędkością  $n = 16,5$  obr/min, a wsad utrzymywany był w przestrzeni roboczej przez dwie prowadnice.



**Rys. 7.5.** Model geometryczny WPK przedkuwki dźwigni: 1 – wałek górny, 2 – walce dolny, 3 – prowadnice, 4 – wsad

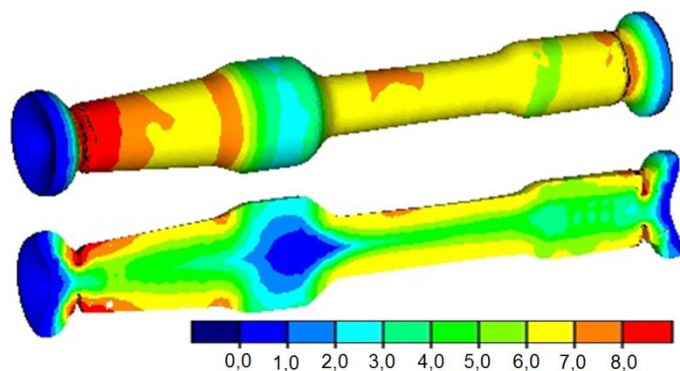
W rezultacie wykonanych symulacji numerycznych prześledzono kinematykę płynięcia metalu w analizowanym procesie WPK, którą przedstawiono na rysunku 7.6.



**Rys. 7.6.** Progresa kształtu przedkuwki podczas WPK wraz z zaznaczonymi rozkładami intensywności odkształcenia

W początkowej fazie procesu klinowe występy narzędzi wcinają się we wsad i wprawiają go w ruch obrotowy. Na obwodzie wsadu kształtowane są dwa rowki pierścieniowe, które w kolejnych etapach procesu rozszerzane są przez klinowe powierzchnie narzędzi na założoną długość walcowania. W ostatniej fazie procesu następuje skalibrowanie kształtu przedkuwki przez klinowe występy o stałej szerokości oraz odcięcie skrajnych odpadów. Z uwagi na trudności natury numerycznej w całkowitym rozdzieleniu materiału, proces odcinania nadatków nie został doprowadzony do końca. Uzyskany kształt przedkuwki charakteryzuje się dużą zgodnością z zarysem opracowanym na podstawie wykresu idealnej przedkuwki.

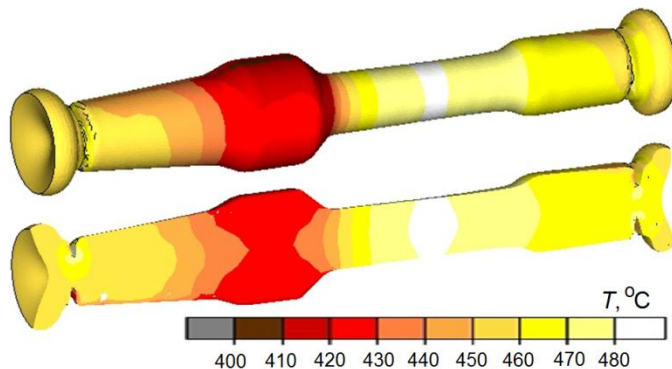
Analizując rozkłady intensywności odkształcenia (rys. 7.6 oraz rys. 7.7) daje się zauważyć dużą niejednorodność przerobu plastycznego materiału w poszczególnych stopniach przedkuwki. Widoczne jest, że za wyjątkiem centralnego stopnia (o największej średnicy) materiał zostaje uplastyczniony na wskroś. Co ciekawe ekstremalne odkształcenia plastyczne zlokalizowane są nie w obszarze stopnia, który podlega największej redukcji, a w obszarze stożkowych czopów (skrajnych stopni przedkuwki). Jest to efektem hamującego działania pochyłonych powierzchni narzędzi na osiowe przemieszczanie materiału. W tych obszarach dochodzi również do kumulacji odkształceń w kierunku stycznym (głównie w warstwach powierzchniowych), wywołanych przez siły tarcia, które powodują obwodowe płynięcie materiału. Potwierdza to trafność przyjętego założenia o hamującym oddziaływaniu pochyłonych powierzchni na osiowe płynięcie materiału.



**Rys. 7.7.** Rozkład intensywności odkształcenia (na powierzchni i w przekroju osiowym) w końcowym etapie walcowania przedkuwki

Walcowanie przedkuwek w walcarkach odbywa się z myślą wykorzystania ich jako półwyroby do operacji kucia matrycowego. Duże korzyści ekonomiczne można uzyskać, projektując proces w ten sposób, aby obie operacje (walcowanie i kucie) możliwe były do zrealizowania z jednego nagrzania. W ten sposób bardzo często postępuje się w przypadku kucia odkuwek stalowych, dla których

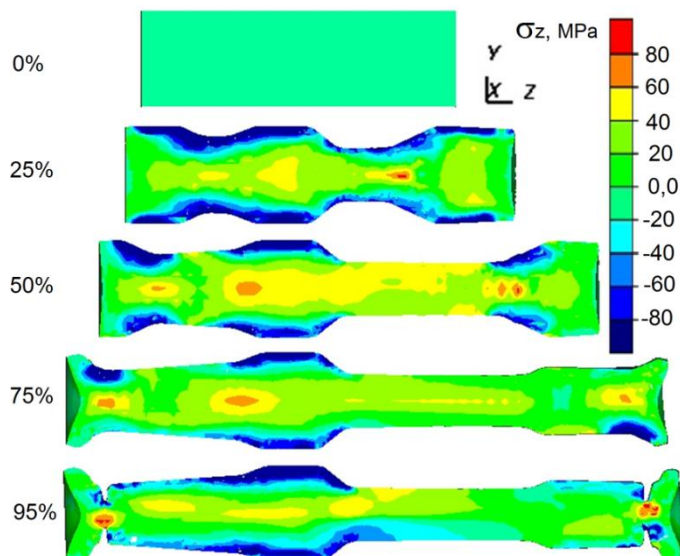
zakres temperatury kształtowania jest stosunkowo szeroki, a spadek temperatury materiału o 100 °C czy nawet 200 °C nie wpływa w istotny sposób na przebieg procesu kucia. Natomiast kształtowanie stopów aluminium w dwóch operacjach jest bardzo trudne do zrealizowania ze względu na ich wąski przedział temperatur obróbki plastycznej na gorąco. Dlatego też w celu oceny możliwości przeprowadzenia procesu kształtowania odkuwki dźwigni z jednego nagrzania dokonano analizy rozkładu temperatury w ukształtowanej przedkuwce (rys. 7.8). Cechą charakterystyczną są stosunkowo wysokie wartości temperatury zarówno na powierzchni jak i w przekroju ukształtowanego wyrobu (pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania). Jedynie w strefie niepodlegającej redukcji przekroju poprzecznego temperatura spadła do około 420–430 °C (w wyniku kontaktu materiału z chłodnymi narzędziami). W pozostałych obszarach można zaobserwować znacznie większe wartości temperatury, a nawet jej wzrost ponad wartość początkową. Tak wysokie wartości temperatur związane są z generowaniem znacznych ilości ciepła podczas odkształceń plastycznych materiału, które rekompensują straty związane przekazywaniem ciepła do narzędzi. Minimalne wartości temperatury przedkuwki (420–430 °C) pozwalają przypuszczać, że możliwa jest realizacja procesu kucia bezpośrednio po operacji walcowania. Jednak w przypadku kształtowania elementów bardziej odpowiedzialnych należałoby zastosować krótkotrwałe dogrzewanie półwyrobu celem wyrównania temperatury w całej objętości materiału.



**Rys. 7.8.** Rozkład temperatury w końcowym etapie walcowania przedkuwki

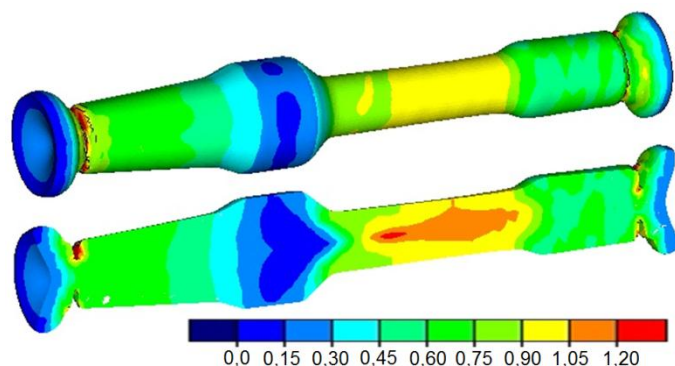
Jak już wcześniej wspomniano, walcowanie odkuwek z dużymi redukcjami przekroju poprzecznego przy pomocy krótkich narzędzi obarczone jest niebezpieczeństwem przewężenia lub zerwania materiału. Zjawisko to spowodowane jest działaniem sił rozciągających wzdłuż osi odkuwki, które wywołane są przez klinowe powierzchnie narzędzi. Zgodnie z rys. 7.9 dzięki zastosowaniu pochylonych powierzchni, które powstrzymują osiowe przemieszczanie materiału, udało się ograniczyć wartość naprężeń osiowych

(praktycznie w całym zakresie kształtowania) do około 70 MPa. W efekcie wyeliminowano niebezpieczeństwo zerwania środkowego stopnia przedkuwki.



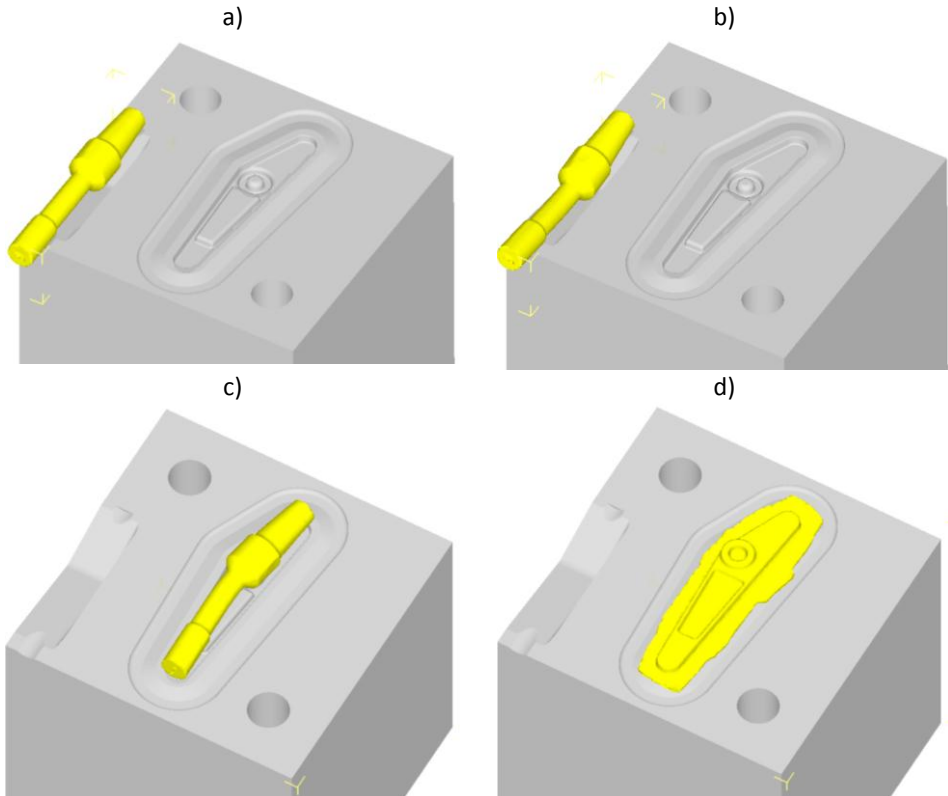
**Rys. 7.9.** Rozkłady naprężeń głównych, działających wzdłuż osi odkuwki, wyznaczone w kolejnych etapach walcowania

W trakcie obliczeń numerycznych dokonano oceny niebezpieczeństwa pęknięcia materiału w oparciu o rozkłady kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama (rys. 7.10). Otrzymane rezultaty obliczeń wskazują, iż podczas walcowania przedkuwki może dochodzić do naruszenia spójności materiału. Największe niebezpieczeństwo pęknięcia materiału występuje w centralnej strefie stopnia przedkuwki, kształtowanego z największą redukcją przekroju poprzecznego. Wartość całki Cockrofta-Lathama w tym obszarze jest bardzo wysoka.

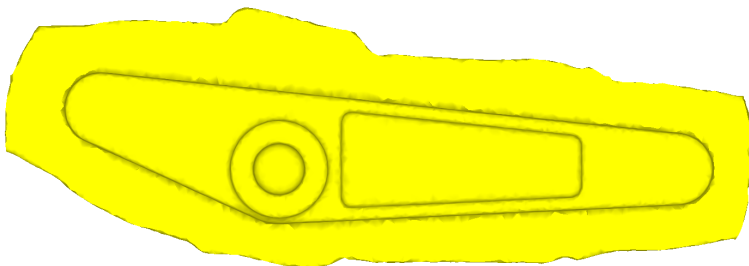


**Rys. 7.10.** Rozkład kryterium zniszczenia wg Cockrofta-Lathama w końcowym etapie walcowania przedkuwki

W oparciu o wyniki symulacji walcowania poprzeczno-klinowego przedkuwki dźwigni, zamodelowano proces kucia odkuwki. Proces kształtowania składał się z operacji gięcia i kucia matrycującego. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowo wyznaczony kształt przedkuwki, co przedstawiono na rys. 7.11. W obliczeniach uzyskano odkuwkę bez wad geometrycznych z równomiernie rozłożoną wypływką na obwodzie (rys. 7.12).



**Rys. 7.11.** Kolejne fazy procesu kucia odkuwki dźwigni z przedkuwki wykonanej metodą WPK: a) ułożenie przedkuwki w wykroju gnącym, b) koniec operacji gięcia, c) ułożenie przedkuwki w wykroju matrycującym, d) koniec operacji kucia matrycującego



**Rys. 7.12.** Wyznaczony numerycznie kształt odkuwki dźwigni ze stopu aluminium 2014, kutej z przedkuwki walcowanej w procesie WPK

Dzięki zastosowaniu przedkuwki wykonanej metodą WPK udało się zmniejszyć zużycie materiału o ok 8% w stosunku do kucia bezpośrednio z pręta [222], co w przypadku produkcji seryjnej i wysokiej ceny stopów aluminium pozwoli w znaczącym stopniu obniżyć koszty produkcji.

### 7.3. Weryfikacja doświadczalna walcowania poprzeczno-klinowego przedkuwki dźwigni

Weryfikację wyników modelowania numerycznego dokonano podczas prób doświadczalnych walcowania przedkuwki w uniwersalnej walcierce kuźniczej. W tym celu zostały wykonane dwa zestawy segmentów klinowych, zgodnie z wytycznymi, przedstawionymi na początku niniejszego rozdziału. Następnie narzędzia zostały zamocowane na wałach walcarki (rys. 7.13). Ponadto przestrzeń roboczą w płaszczyźnie poziomej, przechodzącej przez oś walcowania zamknięto dwiema prowadnicami, rozsuniętymi na odległość większą o 1,5–2 mm od średnicy wsadu (na około 47 mm).



**Rys. 7.13.** *Walec uniwersalnej walcarki kuźniczej uzbrojony w segmenty klinowe do walcowania przedkuwki*

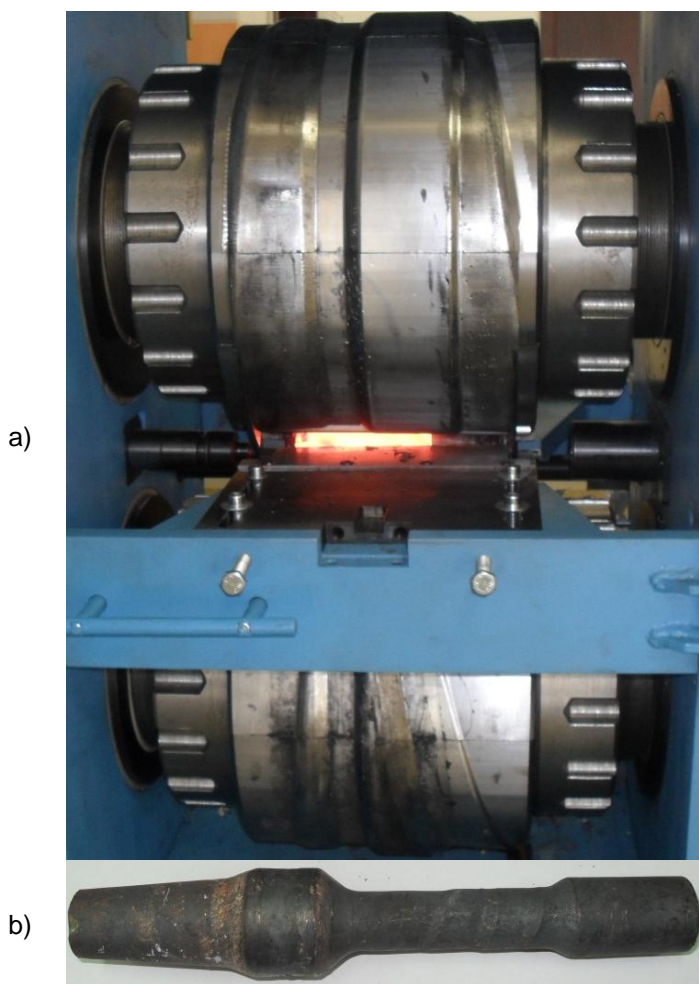
Pierwsze próby walcowania przedkuwek przeprowadzono z wykorzystaniem wsadów stalowych (w gatunku C45), nagrzewanych do temperatury 1150 °C (rys. 7.14). Odwalcowanie serii przedkuwek stalowych miało na celu poprawienie warunków tarcia przed walcowaniem stopów aluminium, poprzez usunięcie (wypalenie) warstwy smaru, znajdującej się na narzędziach oraz niewielkie schropowacenie powierzchni roboczych.

Kolejny etap badań obejmował próby WPK stopów aluminium. Bezpośrednio przed procesem walcowania powierzchnie narzędzi zostały podgrzane (przez pomocy palników gazowych). Wsad ze stopu aluminium w gatunku 2024A, który miał kształt odcinków pręta o średnicy  $\varnothing 45$  mm i długości  $l = 150$  mm



nagrzewano w piecu komorowym do temperatury 460 °C, po czym poddawano procesowi walcowania. Odwalcowaną serię przedkuwek przedstawiono na kolejnym rysunku 7.15.

Uzyskane półwyroby charakteryzują się dobrą jakością i powtarzalnością, a kształt i wymiary przedkuwek mieszczą się w zakładanym polu tolerancji. Również przeprowadzone po procesie oględziny nie wykazały większych wad zewnętrznych. Jedynym zauważonym mankamentem były płytkie rowki śrubowe na powierzchni stopnia walcowanego z maksymalną wartością współczynnika gniotu. Jako przyczynę należy upatrywać w zastosowaniu zbyt małych promieni zaokrąglenia krawędzi klinów. Jednak ze względu na przeznaczenie ukształtowanych przedkuwek (wsad do kucia matrycowego), nie miały one żadnego wpływu na jakość późniejszych wyrobów.



**Rys. 7.14.** Próby walcowania przedkuwek stalowych – a), ukształtowana przedkuwka – b)

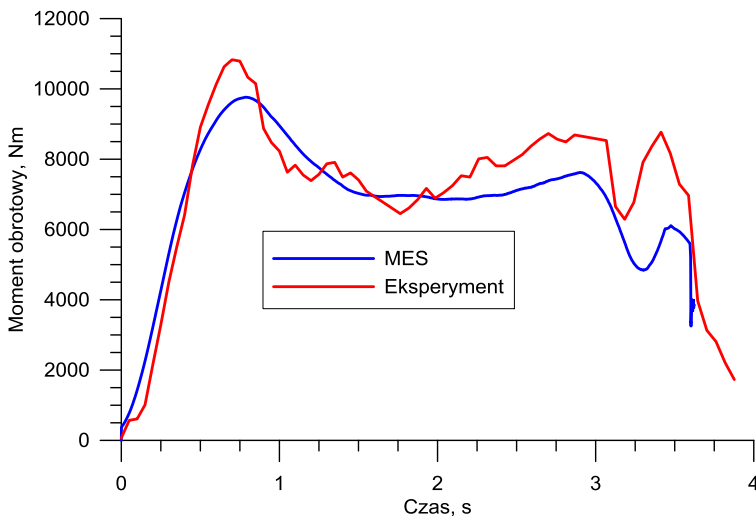
W trakcie prowadzonych badań rejestrowano również parametry siłowe procesu, które zestawiono w postaci przebiegów momentu walcowania na rys. 7.16 (wyznaczone MES oraz zmierzone podczas eksperymentu). Analizując dane zawarte na rysunku można zauważyć dużą zgodność wyników obliczeniowych z doświadczalnymi. Potwierdza to zasadność stosowania technik numerycznych do analizy złożonych procesów kształtowania plastycznego. Niewielkie rozbieżności, dotyczące głównie wartości maksymalnych momentów mogą być związane z warunkami termicznymi realizacji walcowania. Nawet stosunkowo niewielki spadek temperatury materiału (większy od zakładanego podczas obliczeń) będzie miał swoje odzwierciedlenie w wielkości oporów odkształcenia plastycznego, powodując wzrost momentu walcowania. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż zauważone rozbieżności wahają się w granicach 10%, co jest wynikiem zadowalającym.



**Rys. 7.15.** Przedkuwki dźwigni ze stopu aluminium 2014A ukształtowane w procesie WPK w uniwersalnej walcarni kuźniczej

Na podstawie charakteru uzyskanych rozkładów można określić poszczególne fazy procesu. Widoczne jest, że podczas fazy wcinania narzędzi

następuje gwałtowny wzrost momentów obrotowych do wartości maksymalnych (około 10–11 kNm). Następnie w fazie kształtowania obserwuje się początkowo stopniowy spadek wartości momentów obrotowych (do około 7 kNm), który spowodowany jest wzrostem temperatury, wywołanym intensywnym odkształcaniem materiału, a następnie ponowny wzrost momentów (do około 8–9 kNm), który jest efektem rozwinięcia redukcji przekroju na wszystkie stopnie przedkuwki. Wraz z rozpoczęciem kalibrowania, podczas którego nie dochodzi do redukcji przekroju poprzecznych oraz nie zwiększa się długość strefy kształtowania, obserwuje się dość szybki spadek momentu obrotowego. Kolejny gwałtowny wzrost wartości momentów obrotowych (w końcowym etapie kalibrowania) jest związany z odcinaniem skrajnych odpadów.



**Rys. 7.16.** Wartości momentów obrotowych na jednym z walców podczas walcowania przedkuwki

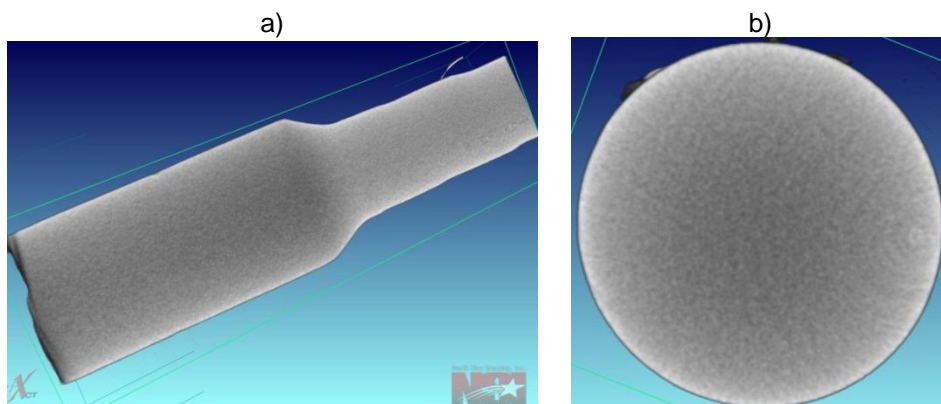
Wyniki obliczeń numerycznych sugerowały na możliwość tworzenia się pęknięć wewnętrznych podczas procesu walcowania (wysokie wartości kryterium zniszczenia Cockrofta-Lathama). Dlatego też na losowo wybranych przedkuwkach przeprowadzono defektoskopowe badania rentgenowskie, celem wykrycia i lokalizacji ewentualnych pęknięć. Do badań wykorzystano urządzenie rentgenowskie X-VIEW model X-25 firmy NSI North Star Imaging Inc. (rys. 7.17), które zainstalowane jest w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie.

Z uwagi na moc urządzenia, badania defektoskopowe zostały wykonane dla strefy podlegającej największej redukcji przekroju podczas procesu walcowania. Jest to obszar, w którym zarejestrowano największe wartości całki Cockrofta-Lathama. Uzyskane na podstawie wykonanych prześwietleń informacje nie wskazują na występowanie jakichkolwiek nieciągłości (rys. 7.18). Tym samym jednoznacznie stwierdzono, że proces WPK z wykorzystaniem narzędzi

opracowanych wg autorskiej metody pozwala na kształtowanie wyrobów wolnych od pęknięć wewnętrznych.



**Rys. 7.17.** Rentgen X-VIEW model X25 firmy NSI North Star Imaging Inc., wykorzystany do badań defektoskopowych



**Rys. 7.18.** Zdjęcia rentgenowskie odwalcowanej przedkuwki ze stopu aluminium: a) wykonane w płaszczyźnie przechodzącej przez oś przedkuwki, b) wykonane w płaszczyźnie prostopadłej do osi przedkuwki, w połowie długości stopnia o najmniejszej średnicy

Ostatecznym potwierdzeniem poprawnie zaprojektowanego procesu walcowania było ukształtowanie odkuwek dźwigni z wykorzystaniem przedkuwek odwalcowanych w uniwersalnej walcierce kuźniczej. Próby kucia zrealizowano

w warunkach przemysłowych lokalnej kuźni matrycowej (w Zakładzie Obróbki Plastycznej w Świdniku). W wyniku eksperymentu uzyskano odkuwki bez wad w postaci pęknięć, zakuć, czy też niewypełnienia wykroju (rys. 7.19 oraz rys. 7.20).

W trakcie realizowanych badań były również podjęte próby walcowania przedkuwek ze stopów tytanu, jednak w tym przypadku zaobserwowano duże przewężenie środkowego stopnia (rys. 7.21). Główną przyczyną przewężenia mogą być mniejsze wartości sił tarcia na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami (w wyniku pokrycia powierzchni wsadu tlenkami tytanu, które charakteryzują się właściwościami poślizgowymi).



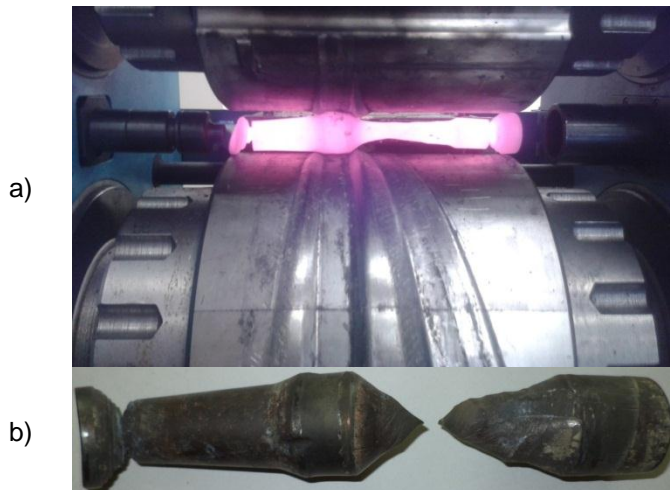
**Rys. 7.19.** Odkuwka dźwigni ukształtowana z przedkuwki walcowanej w procesie WPK (z pozostawioną wyplawką)



**Rys. 7.20.** Odkuwki dźwigni ukształtowane z przedkuwek walcowanych w procesie WPK (po odcięciu wyplawki)

W rezultacie siły tarcia, powodujące obrót odkuwki oraz hamowanie osiowego przemieszczania materiału były mniejsze niż w przypadku walcowania stopów aluminium, czy stali, co w rezultacie prowadziło do przewężenia a nawet zerwania przedkuwki (rys. 7.21). Dlatego też podczas walcowania stopów tytanu

należałoby wykonać na powierzchniach klinowych narzędzi nacięcia technologiczne, celem zwiększenia sił tarcia.



**Rys. 7.21.** Przedkuwki walcowane ze stopu tytanu: a) przewężenie środkowego stopnia, b) zerwanie przedkuwki



## Podsumowanie i wnioski

W bieżącym opracowaniu przedstawiono wyniki zrealizowanych prac badawczych, których głównym celem było opracowanie konstrukcji uniwersalnej walcarki kuźniczej, przeznaczonej do walcowania odkuwek w układzie wzdłużnym, poprzecznym oraz do dzielenia bezodpadowego prętów. Każdy z procesów walcowania kuźniczego, który przewidziano do realizacji w walcierce jest obecnie szeroko wykorzystywany, jednak wymaga wykorzystania drogich i specjalistycznych maszyn. Nierzadko jest to przyczyną stosowania mniej opłacalnych technologii, obniżających konkurencyjność zakładów produkcyjnych.

Prace badawcze zmierzające do opracowania wielozadaniowej walcarki kuźniczej, a następnie weryfikacji jej możliwości technologicznych zostały podzielone na trzy etapy. Pierwszy etap obejmował rozpoznanie stanu wiedzy w zakresie konstrukcji walcarek, procesów walcowania odkuwek oraz metod dzielenia bezodpadowego. Drugi etap związany był z opracowaniem konstrukcji uniwersalnej walcarki kuźniczej. Ostatnim etapem były próby realizacji technologii walcowania i dzielenia, które miały na celu potwierdzenie przyjętych założeń.

Przeprowadzona analiza rozwiązań konstrukcyjnych walcarek kuźniczych, dostępnych na rynku, wskazuje na brak maszyn uniwersalnych, przeznaczonych do realizacji odmiennych kinematycznie procesów walcowania odkuwek. Natomiast dokonany przez autora przegląd metod walcowania oraz asortymentu wyrobów możliwych do kształtowania z wykorzystaniem technologii walcowniczych, wskazuje na duży potencjał rozwojowy walcowania kuźniczego. Na szczególną uwagę zasługują również procesy dzielenia bezodpadowego, w rozwój których duży wkład wniósł autor monografii. Ze względu na oszczędność materiałów, narzędzi i robocizny, technologia dzielenia bezodpadowego może znaleźć zastosowanie nie tylko w wydziałach kuźni, ale także we wszelkiego rodzaju zakładach obróbki mechanicznej, gdzie powszechną operacją jest cięcie półfabrykatów. Jednak przemysłowe wdrożenie technologii dzielenia półfabrykatów według koncepcji autora wymaga opracowania konstrukcji wydajnych i tanich maszyn zabezpieczających realizację procesu.

Koncepcja wielozadaniowej walcarki kuźniczej powstała w Politechnice Lubelskiej, gdzie od wielu lat pod kierunkiem profesora Zbigniewa Patera rozwijane są nowatorskie technologie walcownicze, o czym może świadczyć liczba uzyskanych w ostatnim czasie patentów, których tematyka związana jest przede wszystkim z rotacyjnymi procesami kształtowania metali i ich stopów.



Szereg realizowanych prac badawczych, których efektem są nowatorskie rozwiązania technologiczno-konstrukcyjne inspirowany był kontaktami ze środowiskiem przemysłowym, które zgłaszało cenne uwagi i ściśle współpracowało z Katedrą Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. W trakcie prac konstrukcyjnych, związanych z opracowaniem walcarki wykorzystano nowoczesne narzędzia numeryczne CAD/CAE, ułatwiające projektowanie i analizę powstającej konstrukcji.

Decyzja o wykonaniu wielozadaniowej walcarki kuźniczej według koncepcji autora pozwoliła na dokonanie pełnej weryfikacji doświadczalnej możliwości technologicznych maszyny. W trakcie prób zrealizowano procesy walcowania odkuwek w układzie wzdłużnym oraz poprzecznym. Przeprowadzono również próby dzielenia bezodpadowego prętów. Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły przydatność wielozadaniowej walcarki kuźniczej do kształtowania odkuwek i przedkuwek, a także dzielenia prętów. Opracowano również innowacyjną konstrukcję narzędzi klinowych, umożliwiających walcowanie przedkuwek (głównie ze stopów aluminium) z dużymi wartościami redukcji przekroju poprzecznego, uzyskiwanymi na stosunkowo krótkich drogach kształtowania.

Wydaje się, że zaproponowana konstrukcja wielozadaniowej walcarki kuźniczej może być ciekawym rozwiązaniem dla krajowego przemysłu kuźniczego, który charakteryzuje się dużą różnorodnością produkowanych odkuwek. Należy przy tym wspomnieć, że technologie walcownicze, pomimo ich licznych zalet są wykorzystywane przez krajowe kuźnie w ograniczonym zakresie. Taka sytuacja wynika między innymi z braku dostępności na krajowym rynku lekkich i tanich walcarek kuźniczych, których eksploatacja byłaby opłacalna w obszarze działalności polskich kuźni.

W związku z tym wydaje się, że w pełni uzasadniony jest pomysł rozwijania własnych konstrukcji walcarek kuźniczych, dostosowanych do potrzeb krajowego przemysłu kuźniczego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań teoretyczno-doświadczalnych sformułowano następujące wnioski:

- Analiza literatury specjalistycznej oraz ofert producentów maszyn kuźniczych wykazała, że obecnie nie produkuje się walcarek umożliwiających realizację procesów walcowania wzdłużnego i poprzecznego. Zaprojektowana i zbadana walcarka jest zatem innowacyjnym rozwiązaniem zapełniającym lukę na rynku maszyn kuźniczych. Analizy teoretyczne rozkładu naprężeń i odkształceń, oparte na MES wykazały, że opracowana konstrukcja spełnia przyjęte założenia odnośnie sztywności i nośności. Zostało to również potwierdzone w badaniach doświadczalnych, w których nie stwierdzono żadnych przeciążeń, a odkształcenia zawierały się w przyjętych granicach, co zapewniło bezpieczną pracę maszyny i zakładana jakość wymiarową wyrobów.

- Przyjęta koncepcja opracowanego procesu walcowania wzdłużnego odkuwki stopniowanego wałka ze stali C45 oraz weryfikacja teoretyczna na podstawie symulacji numerycznych wykazały prawidłowość przyjętych założeń obliczeniowych. Wyniki badań doświadczalnych potwierdziły rezultaty analizy teoretycznej i dowiodły skuteczności działania maszyny jako walcarki kuźniczej wzdłużnej.
- Pozytywne rezultaty uzyskano również w zakresie walcowania poprzeczno-klinowego. Wyniki prac teoretyczno-doświadczalnych potwierdziły prawidłowe zaprojektowanie procesu kształtowania odkuwki z dwoma przewężeniami ze stali C45. Uzyskanie prawidłowych wyrobów pod względem kształtu i wymiarów wykazały przydatność maszyny jako walcarki poprzeczno-klinowej.
- W ramach prac badawczych rozwijano własną, oryginalną metodę bezodpadowego dzielenia prętów. Wykorzystanie specjalnych narzędzi o odpowiednich powierzchniach roboczych pozwoliło efektywnie rozdzielić pręty okrągłe ze stali, stopów aluminium, i stopów miedzi. Tym samym potwierdzone zostały opracowane przez autora zależności parametrów zapewniających prawidłowy przebieg procesu, a tym samym możliwość wykorzystania uniwersalnej walcarki do bezodpadowego dzielenia prętów okrągłych, co poszerza zakres zastosowań maszyny.



# Literatura

1. ASM Metal Handbook Volume 14 Forming and Forging, 1996
2. Astrop A. W., Redman demonstrate wedge-roll hot forming process. Machinery and Production Engineering 19 February 1969, 291-294
3. Automatic feed for forging roll sets, US patent no 3338081, 1967
4. Baoyu W., Zheng Z., Zhenghuan H., Jianguo L., Methodology on Precision Cross Wedge Rolling of Camshaft, Steel Research International, 81 (2010) no 9, 222-225
5. Bartnicki J., Pater Z., Walcowanie poprzeczno-klinowe wyrobów drążonych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005
6. Bartnicki J., Pater Z., Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft. Journal of Materials Processing Technology 2005 vol. 164-165, 1154-1159
7. Bartnicki J., Pater Z., Siły w procesach walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów drążonych. Mat. VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej”, Częstochowa, czerwiec 2005, 235-23
8. 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
9. Bulzak T., Tomczak J., Pater Z., Forming a Lever Prevorm Made of Aluminium Alloy 2014. Metalurgija 53 (2014) no. 4, 505-508
10. Cai Z., Precision design of roll-forging die and its application in the forming of automobile front axles. Journal of Materials Processing Technology 168 (2005), 95-101
11. Chen J.D., Yu D.H., Wang Y.W., Zhang Z.G., Brittle precision cropping of metal materiale. Int. J. Mach. Tools Manufact. 1992, Vol. 32, Nr 3, 415-424
12. Chen J.D., Yu D.H., Wang Y.W., Zhang Z.G., Plastic precision cropping of metal material. Int. J. Mach. Tools Manufact. 1992, Vol. 32, Nr 3, 425-433
13. 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
14. Cichosz P., Narzędzia skrawające, WNT, Warszawa 2006
15. Cropping of steel bar – its mechanism and practice. I.C.F.G. International Cold Forging Group, Paryż 1992
16. Cross-Wedge and Forging Rolls, [dostęp 21 sierpień 2014]. Dostępny w World Wide Web: [ww.lasco.de/umformtechnik/media/archive2/technische\\_informationen/QuerkeilundReckwalzen\\_2012\\_E.pdf](http://ww.lasco.de/umformtechnik/media/archive2/technische_informationen/QuerkeilundReckwalzen_2012_E.pdf)

17. 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
18. 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
19. 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
20. 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
21. 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
22. Feld M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych części maszyn*, WNT Warszawa 2003
23. Forging press with separable rolls, US patent no 2691907, 1954
24. FORGING-ROLLS. US patent 648,915, 1900
25. 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 (1993) no. 3, 367-400
26. Gong W., Shu X., Peng W., Sun B., The Research on the Microstructure Evolution Law of Cross Wedge Rolling Asymmetric Shaft-parts Based on Parity Wedge, *Applied Mechanics and Materials*, 201-202 (2012), 1121-1125
27. Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W., *Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów szynowych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003
28. Gontarz A., Pater Z., Tofil A., Analiza metod kształtowania plastycznego wałka ze stopu Ti-6Al-4V. *Inżynieria Materiałowa*, (2009) nr 5, 400-403
29. Gontarz A., Pater Z., Weroński W., Head forging aspects of new forming process of screw spike. *Journal of Materials Processing Technology* 153-154 (2004), 736-740
30. Górka J., Krysta M., Jakość cięcia stali obrobionej termomechanicznie plazmą powietrzną, laserem i strumieniem wody, *Przegląd Spawalnictwa* 2007, nr 8, 102-106.
31. Grass H., Kremaszky C., Reip T., Werner E. 3-D Simulation of hot forming and microstructure evolution. *Computational Materials Science* 28 (2003), 469-477
32. Grass H., Kremaszky C., Werner E. 3-D FEM-simulation of hot forming processes for the production of a connecting rod. *Computational Materials Science* 36 (2006), 480-489
33. He T., Wang B., Hu Z., The profile curve of die of eccentric shafts with cross wedge rolling, *Advanced of Materials Research*, 154-155 (2011), 1796-1799
34. Hladky V., *Príčne klinové valcovani ve strojiřenske vyrobe*. *Strojirenska Vyroba Brezen* 1971, 171-179

35. Hu B., Shu X., Yu P., Peng W., The Strain Analysis at the Broadening Stage of the Hollow Railway Axle by Multi-wedge Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 494-495 (2014), 457-460
36. Jia Z., Zhou J., Ji J., New type of groove used to improve friction in roll forging. *Journal of Central South University* 21 (2014), 493-499
37. Jin M., Li J., Ying F., Study on Influencing Factors of Tooth Forming Quality for Gear Shaft with Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 201-202 (2012), 1164-1169
38. Kaul W. and Mockel L., Shaft forging, the East Germany way, *Metalworking Prod.* 1969 vol. 19, 49-50
39. Kazanecki J., Pater Z., Analiza termomechaniczna procesu walcowania pierścieni w trójwalcowej walcierce skośnej. *Rudy i Metale Nieżelazne* (2007) nr 11, 861-866
40. Klušin V. A., Makušok E. M., Šcukin V. Ja., Soveršenstvovanie poperečno-klinovoj prokatki. Minsk: Nauka i Technika 1980
41. Kudo H., Nakagawa T. Tamamura K., A survey of round bar cropping-its mechanism and techniques for producing cold forging billets. *Slug Preparation*, JCFC September 1975
42. Kwaśniewski B., Stankiewicz Z., Śpiewakowski J., *Obróbka plastyczna*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1981
43. Lange K., *Handbook of Metal Forming*. Society of Manufacturing Engineers, Michigan 1985
44. Lebek A., *Roilmachine zur Herstellung von Rotationssymmetrischen Korpern*. Deutsches Patent 10089 V (1879)
45. 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
46. Lenard J. G., *Primer on Flat Rolling*. Elsevier Science and Technology, Elsevier 2007.
47. Li Q., Lovell M., On the interfacial friction of a two-roll CWR process, *Journal of Materials Processing Technology*, 160 (2005), 245-246
48. Li R., Jiao S., Numerical Simulation for Precision Roll-Forging of Automobile Front Axle. *Advanced Materials Research* 602-604 (2013), 1850-1854
49. Li R., Jiao S., Roll forging technology and 3D finite element simulation of automobile front axle. *Applied Mechanics and Materials* 178-181 (2012), 2845-2849
50. Li R., Jiao S., Thermal coupled FEM Analysis of Precision Roll Forging Performing of Automobile Front Axle. *Advanced Materials Research* 557-559 (2012), 1330-1335
51. Li R., Jiao S., Wang J., Roll-Forging Technology of Automotive Front Axle Precision Performing and Die Design. *IERI Procedia* 1 (2012), 166-171
52. 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
53. Lisowski J., *Walcowanie kuźnicze*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974

54. Liu G., Jiang Z., Bian Y., Ren G., Xu Ch., Influence of Tool Wear on Center Defects of the Workpiece during Cross Wedge Rolling Process, *Advanced Materials Research*, 154-155 (2011), 1779-1782
55. Lovell M. R., Evaluation of Critical Interfacial Friction in Cross Wedge Rolling, *Transactions of the ASME-F-Journal of Tribology* 123 (2001) no. 2, 424-429
56. Ma W., Wang B., Zhou J., Li Q., Analysis of Square Billet Cross Wedge Rolling Process Using Finite Element Method, *Applied Mechanics and Materials*, 271-272 (2013), 406-411
57. Machine for making and forming turbine blades, US patent no 2654277, 1953 r
58. Meyer M., Stonis M., Behrnes B. A., Cross wedge rolling preforms for crankshafts, *Key Engineering Materials*, 504-506 (2012), 205-210
59. Minutolo F. C., Durante M., Lambiasi F., Langella A., Dimensional analysis of a new type of groove for steel rebar rolling. *Journal of Materials Processing Technology* 175 (2006), 69-76
60. Mirhamadi S. J., Hamed M., Ajami S., Investigating the effects of cross wedge rolling tool parameters on formability of Nimonic® 80A and Nimonic® 115 superalloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, published online: 17 June 2014
61. Neugebauer R., Lorenz B., Steger J., Holstein D., Cross Wedge Rolling in Preforming Titanium Alloy Aero Engine Vanes, *Steel Research International*, 79 (2008) no 1, 375-381
62. Niezgodziński M. E., Niezgodziński T., *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004.
63. Pan R., Zhang K. S., Jia Z., Analysis on processing boundary of stepped shaft during cross wedge rolling process, *Advanced of Materials Research*, 472-475 (2012), 775-780
64. Pater Z., Analysis of the Helical-Wedge Rolling Process for Producing a Long Stepped Shaft. *Key Engineering Materials*. 622-623 (2014), 893-89
65. Pater Z., Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a workholding bolt. *Metalurgija*, 53 (2014) no 4, 653-656
66. Pater Z., Modelowanie numeryczne procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwki wałka napędowego. *Mechanik*, (2010) nr 12, 942-946
67. Pater Z., Multi-wedge cross rolling of balls. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20 (2013) no 10, 46-50
68. Pater Z., New methods of steel ball rolling. *International Journal of Materials & Product Technology*, 47 (2013) no 1/2/3/4, 12-22
69. Pater Z., *Podstawy teoretyczne procesu walcowania poprzeczno-klinowego*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1995
70. Pater Z. Tofil A., Intensyfikacja odkształcenia w procesie walcowania poprzeczno-klinowego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika*, (2011) z. 238, 127-132
71. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Bogusz E., Bogusz P. *Walcarka nawrotna*, Polskie zgłoszenie patentowe nr P410189, 2014 r
72. Pater Z., *Walcowanie poprzeczno – klinowe*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009

73. Pater Z., Tofil A., Narzędzie do kształtowania plastycznego wyrobów ze zgrubieniami skrajnymi metodą walcowania klinami płaskimi. Polski patent nr 215888, 2013 r
74. Pater Z., Tofil A., Sposób kształtowania plastycznego wyrobów ze zgrubieniami skrajnymi metodą walcowania klinami płaskimi. Polski patent nr 215890, 2013 r
75. 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
76. Pater Z., Bartnicki J., Finished Cross-Wedge Rolling of Hollowed Cutters, *Archives of Metallurgy and Materials*, 51 (2006) no 2, 205-211
77. Pater Z., Bogusz E., Gontarz A., Weroński W., Walcarka i narzędzie do wytwarzania wyrobów kształtowych, zwłaszcza śrubowych. Polski patent nr 208033, 2005 r.
78. Pater Z., Bulzak T., Tofil A., Tomczak J., Helical-wedge rolling of balls. *Kovarenstvi* (2013) nr 47, 84-87
79. Pater Z., Gontarz A., Samołyk G., Bartnicki J., Analysis of cross rolling process of toothed tytanm shafts. *Archives of Metallurgy and Materials*, 54 (2009) no 3, 617-626
80. Pater Z., Gontarz A., Tofil A., Analysis of the Cross-Wedge Rolling Process of Toothed Shafts Made from 2618 Aluminium Alloy. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 16 (2011) no 2, 162-166
81. Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o kształtach złożonych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011
82. Pater Z., Gontarz A., Weroński W., New method of thread rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004), 722-728
83. Pater Z., Gontarz A., Weroński W. S., *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno – klinowego*, Polskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2001
84. 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
85. Pater Z., Gontarz A., Modelowanie numeryczne procesu walcowania na gorąco uzwojenia ślimaka, *Przegląd Mechaniczny*, (2009) nr 10, 37-41
86. Pater Z., Gontarz A., Modelowanie numeryczne procesu walcowania uzębienia skośnego, *Rudy i Metale Nieżelazne*, 55 (2010) nr 6, 366-369
87. Pater Z., Łukasik K., Stebliuk V. I., Numerical simulations of screw spike, worm and gear rolling. *Vistnik Nacional'nogo technicnogo universitetu Ukraini "Kijvskij politechnicnij institut"*, Serija Maszinoobuduvaniija (2010) no 58, 289-294
88. Pater Z., Samołyk G., *Podstawy technologii Obróbki Plastycznej*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2013
89. Pater Z., Tofil A., Analiza procesu walcowania śrubowo-klinowego odkuwki korpusu noża obrotowego. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, (2013) nr 10, 692-696
90. Pater Z., Tofil A., Tomczak J., Steel balls forming by cross rolling with upsetting. *Metalurgija* (2013) no 1, 103-106
91. Pater Z., Tofil A., Analiza termomechaniczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek drążonych ze stopu aluminium 2618, *Rudy i Metale Nieżelazne*, (2011) nr 2, 153-159



92. Pater Z., Tofil A., Experimental and Theoretical Analysis of the Cross-Wedge Rolling Process in Cold Forming Conditions, Archives of Metallurgy and Materials, 52 (2007) no 2, 289-297
93. Pater Z., Tomczak J., Tofil A., Bulzak T., Narzędzie klinowe do walcowania odkuwek. Polskie zgłoszenie patentowe, 2016
94. Pater Z., Tomczak J. Walcowanie śrubowe kul do młynów kulowych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2012
95. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M. R., Menezes P. L. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 67 (2013), 1-7
96. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Wpływ kształtu obrzeża na przebieg procesu walcowania kul. Mechanik (2013) nr 3, 187-191
97. Pater Z., Tomczak J., Analiza numeryczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek drążonych ze stopu tytanu Ti6Al4V, Obróbka Plastyczna Metali, 21 (2010) nr 4, 239-247
98. Pater Z., A FEM Analysis of Cross-Wedge Rolling of Toothed Shafts, Acta Mechanica Slovaca, 15 (2011) no 2, 50-58
99. Pater Z., A study of cross wedge rolling, Journal of Materials Processing Technology, 80-81 (1998), 370-375
100. Pater Z., Analiza pęknięcia metalu w procesie walcowania poprzeczno – klinowego. Hutnik – Wiadomości Hutnicze, (2007) nr 11, 588-595
101. Pater Z., Finite element analysis of cross wedge rolling, Journal of Materials Processing Technology, 173 (2006), 201-208
102. Pater Z., Modelowanie numeryczne procesu walcowania poprzeczno-klinowego wkrętów szynowych, Obróbka Plastyczna Metali, (2009) nr 3, 13-24
103. Pater Z., Modelowanie procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwki wałka pośredniego. Obróbka Plastyczna Metali, (2008) nr 2, 21-27
104. Pater Z., Numerical modelling of cross wedge – rolling of rotary cutter body. Acta Mechanica Slovaca, (2008) no 3A, 361-366
105. Pater Z., Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting, Journal of Materials Processing Technology, 92-93 (1999), 468-473
106. Pater Z., Simulation of cross-wedge rolling process using the upper-bound method, Scandinavian Journal of Metallurgy, 27 (1998), 120-127
107. Pater Z., Stress State in Cross Wedge Rolling Process, Archives of Metallurgy, 48 (2003) no 1, 21-35
108. Pater Z., The Analysis of the Strain in Parts Formed by Means of the Wedge-Rolls Rolling (WRR), Archives of Metallurgy and Materials, 50 (2005) no 3, 675-690
109. Pater Z., Theoretical and experimental analysis of cross wedge rolling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40 (2000), 49-63
110. Pater Z., Tools optimization in cross-wedge rolling, Journal of Materials Processing Technology, 138 (2003), 176-182
111. Pater Z., Wstępna analiza numeryczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek ze stopu magnezu AZ31. Hutnik – Wiadomości Hutnicze, (2009) nr 8, 641-643

112. Pater Z., Wstępna analiza teoretyczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów drążonych, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, (2002) nr 11, 426-429
113. Pater Z., Cross-Wedge Rolling. In *Comprehensive Materials Processing*; Ed.; Elsevier Ltd., Vol. 3 (2014), 211-279
114. Pater Z., Analiza procesu walcowania poprzecznego uzwojenia ślimaka. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, (2009) nr 10, 746-751
115. Peng W., Zhang K., Theoretical Research of the Axial Force about Cross Wedge Rolling, *Key Engineering Materials*, 433 (2010), 27-32
116. 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)*
117. Precision Roll Forging for Automotive Front Axles and Crankshafts—Die Forging Line. [dostęp 21 sierpień 2014]. Dostępny w World Wide Web: [www.brimet.ac.cn/en/productinfo.aspx?cid=453&id=23&i=5](http://www.brimet.ac.cn/en/productinfo.aspx?cid=453&id=23&i=5)
118. 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
119. Qui P., Xiao H., Li M., Effect of Non-uniform Temperature Field on Piece Rolled by Three-roll Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 16-19 (2009), 456-461
120. Regone W., da Silva M., Button S., Numerical and experimental analysis of the microstructural evolution during cross wedge rolling of V-Ti microalloyed steel, *REM - Revista Escola de Minas, Metalurgia & Materials*, 62 (2009) no. 4, 495-502
121. Ren X., Liu Y., Study on the Influence of Deforming Velocity on Steel Ball Quality Based on DEFORM. *Applied Mechanics and Materials*, 117-119 (2012), 1806-1809
122. Ren X., Loi Y., Jin Y., Optimization of Screw Rolling Ball Process Parameters Based on Orthogonal Test. *Applied Mechanics and Materials*, 201-202 (2012), 1190-1193
123. Roberts W.L., *Cold Rolling of Steel*, Manufacturing engineering and materials processing, New York 1978
124. Sawamiphakdi K., Pauskar P. M., Lahoti G. D., Applications of finite element modeling in industrial forming processes at the Timken Company. *Proc. of NUMIFORM 2004*, 654-659
125. Schukin V. Y., Kozehnikova G. V., Petrenko V. V., Cross-Wedge Rolling at Pti Nas Belarus, *Applied Mechanics and Materials*, 201-202 (2012), 1198-1202
126. 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
127. 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
128. Sedighi M., Mahmodi M., An approach to simulate cold roll-forging of turbo-engine thin compressor blade. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 81/3 (2009), 191-198
129. Shen F., Yu W., Peng W., Shu X., Yu C., The Strain Analysis of Plate Cross Wedge Rolling of Spiral Shaft Parts, *Advanced Materials Research*, 941-944 (2014), 1895-1900

130. Shi X., Wang B., Numerical simulation of Al. ball forming process in skew rolling. *Materials Science Forum*, 704-705 (2012), 151-154
131. Shi X., Wang B., Li Z., Optimization of Pass Parameters on Two-Grooves Skew Rolling for Al Ball. *Key Engineering Materials*, 419-420 (2010), 313-316
132. Shu X., Li Z., Zu W., Bending Analysis and Measures of the Forming of Automobile Semi-axle on Cross-Wedge Rolling with Multi-wedge, *Applied Mechanics and Materials*, 184-185 (2012), 75-79
133. Shu X., Sun B., Xiao M., Influence regularities of axial force of cross wedge rolling symmetric shaft-parts about technical parameters, *Advanced Materials Research* 314-316 (2011), 589-593
134. Shu X., Wei X., Chen L., Influence Analysis of Block Wedge on Rolled-piece End Quality in Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 101-102 (2012), 1055-1058
135. Shu X., Wei X., Li Ch., Hu Z., The influence rules of stress about technical parameters on synchronous rolling railway axis with multi-wedge cross-wedge rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 37-38 (2010), 1482-1488
136. Simonds G., Maschine zur Herstellung von Wagenaschen Werkstücken für Gewenrlanfe und anderen unregelambig Geformen Schmiedestücken. *Deutsches Patent* 36494 Y (1885)
137. Simufact.material 2012. 0.0.14871, simufact engineering gmbh, Hamburg.
138. Sińczak J., Łukaszek-Solek A., Bednarek S., Modelowanie numeryczne wielooperacyjnego procesu kucia matrycowego. *Obróbka Plastyczna Metali*. Nr 2 (2005)
139. Solid Forming Machines, Cross-Wedge and Forging Rolls. LASCO Umformtechnik GmbH, 2012
140. Song J. L., Li Y. T., Liu Z. Q., Fu J. H., Ting K. L., Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained state, *Materials Science and Engineering A*, 2009, Vol. 499, Nr 1-2, 225-229
141. Staszyński M., Cięcie plazmą - przewodnik po technologii , *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*, 2, 2007, 15-21
142. Sun B., Zeng X., Shu X., Peng W., Sun P., Feasibility Study on Forming Hollow Axle with Multi-wedge Synchrostep by Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 201-202 (2012), 673-677
143. Świadectwo autorskie nr 460925 (ZSRR)
144. Świadectwo autorskie ZSRR nr 1180186, Sposob lomki prokata
145. Świadectwo autorskie ZSRR nr 1292946, Ustrojstwo dla rozdelenija prokata lomkoj.
146. The Ajax Manufacturing Co. [www.ajax-ceco.com](http://www.ajax-ceco.com)
147. The Early Use of Rolls in the Manufacture of Metals by W. F. Durfee, 1899, *Cassier's Magazine*
148. Thirumarudchelvan S., Cropping of round aluminum alloy rods using torque and a narrow band of lateral compressive stress, *Journal of Mechanical Working Technology*, 1989, Vol. 19, Nr 1, 1-10
149. Tichauer P., Issledovanie poperečnoj prokatki na klinowych kalibrach. *Trudy Leningradskogo Politechniceskogo Instituta*, 1965, nr 243, 146-153

150. Tofil A., Pater Z., Dzielenie bezodpadowe metalowych pretów okrągłych, Rudy i Metale Niezależne 11, 2007
151. Tofil A., Pater Z., Experimental and theoretical analysis of the cross-wedge rolling process in cold forming conditions, Archives of Metallurgy and Materials 52, 2007
152. Tofil A., Pater Z., Wasteless splitting of metal round bars basing on cross-wedge rolling process, Acta Mechanica Slovaca 15, 2011
153. Tofil A., Pater Z., Dzielenie bezodpadowe metalowych prętów okrągłych. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie, Chełm 2009
154. Tofil A., Bezodpadowe dzielenie prętów. Mechanik 2011, R84, nr 4, 308-310
155. Tofil A., Research of new splitting process of pipe billets from 2618A, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 58, 2013, no 3, 725-729
156. Tofil A., Pater Z., Tomczak J., Dwuwalcowa klatka walcownicza, zwłaszcza do walcowania poprzecznego, wzdłużnego oraz dzielenia bezodpadowego. Polski patent nr PL 215512, 2013
157. Tofil A., Tomczak J., Pater Z., Przekładnia redukcyjna ze zmiennym kierunkiem obrotów wałów wyjściowych, z możliwością pomiaru momentu obrotowego. Polski patent nr PL 219484, 2013
158. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T., Walcarka skośna. Polskie zgłoszenie patentowe, 2016
159. Tomczak J., Pater Z., Teoretyczno-doświadczalna analiza procesu walcowania kul w walcach śrubowych. Hutnik – Wiadomości Hutnicze (2013) nr 2, 151-156
160. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J., Modelowanie numeryczne procesu walcowania wielostopniowego uzębionego wałka drążonego, Mechanik (2011) nr 11, 894-899
161. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J., Skew rolling of balls in multiple helical impressions Archives of Metallurgy and Materials, 58 (2013) nr 4, 1072-1076
162. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J., Chyła P., Kazanecki J., Wpływ metody kalibrowania wykrojów śrubowych na jakość kul walcowanych w walcarkach skośnych. Przegląd Mechaniczny (2012) nr 11, 33-39
163. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J., Analiza numeryczna procesu walcowania wałków drążonych z uzębieniami, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, (2011) nr 8, 678-681
164. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T., Thermo-mechanical Analysis of a Lever Preform Forming from Magnesium Alloy AZ31. Archives of Metallurgy and Materials 57 (2012) no. 4, 1211-1218
165. Tomczak J., Pater Z., Próby doświadczalne procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek ze stopów aluminium w gatunkach PA38 i 2618A. Obróbka Plastyczna Metali, 21 (2010) nr 4, 249-260
166. Tomczak J., Pater Z., Walcarka ramowo-konsolowa, zwłaszcza do walcowania wzdłużnego wyrobów płaskich polski patent o numerze PL 221074
167. 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
168. 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

169. VeraCAD – Highlights. [dostęp 21 sierpień 2014]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.netformmetal.com/images/yazilimlar/veracad/VeraCAD%20-%20Highlights.pdf>
170. 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
171. 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
172. 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 (2009) no. 1, 38-43
173. Wang Q., He F., A review of developments in the forging of connecting rods in China. *Journal of Materials Processing Technology* 151 (2004), 192-195
174. Wang Q., Xiao J., Study on the method for groove design in the helical rolling of steel balls. *Journal of Materials Processing Technology*, 55 (1995), 340-344
175. Wang X., Zhang K., Liu J., Hu Z., The effect and experimental research of forming angle on internal defect of valve roughcast formed by single cross wedge rolling, *Advanced Materials Research*, 230-232 (2011), 389-394
176. Wasiunyk P., *Kucie matrycowe*, WNT, Warszawa 1987
177. Wei X., Shu X., Study on Production Mechanism of End Concavity in Cross Wedge Rolling, *Advanced Materials Research*, 314-316 (2011), 468-472
178. Weroński W., Gontarz A., Pater Z., Some Aspects of New Forming Process of Screw Spike, *Key Engineering Materials*, 233-236 (2003), 407-412
179. [www.amtengine.com](http://www.amtengine.com)
180. [www.beltechnologia.by](http://www.beltechnologia.by)
181. [www.brimet.ac.cn](http://www.brimet.ac.cn)
182. [www.lazarsales.com](http://www.lazarsales.com)
183. [www.skewrollingmill.com](http://www.skewrollingmill.com)
184. [www.smeral.cz](http://www.smeral.cz).
185. [www.sms-meer.com](http://www.sms-meer.com)
186. [www.vniimetmash.ru](http://www.vniimetmash.ru)
187. [www.wkfinetools.com](http://www.wkfinetools.com)
188. [www.zds.com.cn](http://www.zds.com.cn)
189. Xia H., Guo X., Ji C., Numerical Simulation of Blank-making Roll Forging Process for Heavy Automotive Front Axle. *Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Materials Science (MEMS 2012)*, 481-484
190. Xing X., Shu X., Finite Element Analysis of Stress and Strain in Two-wedge Cross Wedge Rolling Step-shaft Part, *Materials Science Forum*, 575-578 (2008), 255-260
191. 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

192. 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 (English Letters)*, 20 (2007) no. 4, 463-468
193. 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
194. Yan H., Liu J., Hu Z., Han P., Mao H., Ma S., Effects of Die tooth Profile on Forming Helical Tooth Shaft in Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 274 (2013), 165-169
195. Yan H., Mao H., Li G., He X., Liu J., Hu Z., Effect of Blank Shape and Size on the Forming Quality of Thread Shaft Rolling in Cross Wedge Rolling, *Advanced Materials Research*, 853 (2014), 605-609
196. Yan H., Wang L., Liu Y., Li G., Liu J., Hu Z., Effect of Thread Helix Angle on the Axial Metal Flow of Cross Wedge Rolling Thread Shaft, *Applied Mechanics and Materials*, 440 (2014), 177-181
197. Yang C., Zhang K., Hu Z., Development of central minute cavity in the workpiece of cross wedge rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 215-216 (2012), 766-770
198. Yang C., Zhang K., Hu Z., Simulation Analysis of Cross Wedge Rolling Hollow Parts With Mandrel, *Advanced Materials Research*, 538-541 (2012), 542-547
199. Yang S. C., Chen C. K., The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 215 (2001), 523-532
200. Yang S., Kou S., Deng Ch., Research and application of precision roll-forging taperleaf spring of vehicle. *Journal of Materials Processing Technology* 65 (1997), 268-271
201. Ying F., Shen J., Wu L., Study on the Process of Gear Shaft Formed by Cross Wedge Rolling Based on Deform, *Advanced Materials Research*, 497 (2012), 55-60
202. Yoshimura H., Tanaka K., Precision forging of aluminum and steel. *Journal of Materials Processing Technology* 98 (2000), 196-204
203. Yuan W., Wang Z., Shi B., Cheng G., Theoretical Analysis of the Displacement on the End-Section of the Rolled Parts for Multi-wedge Cross Wedge Rolling, *Advanced Materials Research*, 538-541 (2012), 1162-1169
204. Zhang L. J., Zhao S. D., Lei J., Liu W., Investigation on the bar clamping position of a new type of precision cropping system with variable frequency vibration, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, Vol. 47, Nr 7-8, 1125-1131
205. Zhao F., Liu J., Huang J., Hu Z., Analysis of the wedge tip fillet for central defects in the process of cross wedge rolling 4Cr9Si2 valve, *Advanced Materials Research*, 706-708 (2013), 3-6
206. Zhao J., Lu L., The application of multi-wedge cross wedge rolling forming long shaft technology, *Applied Mechanics and Materials*, 101-102 (2012), 1002-1005
207. Zheng H. Y., Han Z. Z., Chen Z. D., Chen W.L., Yeo S., Quality and Cost Comparisons between Laser and Waterjet Cutting, *Journal of Material Processing Technology* 1996, 62, 294-298
208. Zheng Z., Wang B., Hu Z., Study on Roller Profile for Cam Forming by Cross Wedge Rolling, *Applied Mechanics and Materials*, 217-219 (2012), 1713-1718

209. Zhou J., Jia Z., Liu H., Wang M., A study on simulation of deformation during roll-forging process using system of special shaped and hat groove. *Reviews on Advanced Materials Science* 33 (2013), 354-359
210. Zhou J., Xiao C., Yu Y., Jia Z., Influence of Tool Parameters on Central Deformation in Two-wedge Two-roll Cross-wedge Rolling, *Advanced Materials Research*, 486 (2012), 478-483
211. Zhou J., Yu Z., Zeng Q., Analysis and experimental studies of internal voids in multi-wedge cross wedge rolling stepped shaft, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72 (2014), 1559-1566