



Konrad Lis, Zbigniew Pater

Kształtowanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych w walcierce skośnej sterowanej numerycznie



M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Kształtowanie wydłużonych wyrobów
osiowosymetrycznych w walcierce
skośnej sterowanej numerycznie

Monografie – Politechnika Lubelska

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:
Agnieszka RZEPKA

Dyrektor CIN-T:
Katarzyna WEINPER

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena CHOŁOJCZYK
Jarosław GAJDA
Anna KOŁTUNOWSKA
Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna DUDZIŃSKA
Małgorzata FRANUS
Arkadiusz GOLA
Paweł KARCZMAREK
Beata KOWALSKA
Anna KUCZMASZEWSKA
Jarosław LATAŁSKI
Tomasz LIPECKI
Zbigniew ŁAGODOWSKI
Joanna PAWŁAT
Lucjan PAWŁOWSKI
Natalia PRZESMYCKA
Magdalena RZEMIENIAK
Mariusz ŚNIADKOWSKI

Przedstawiciele honorowi:

Zhihong CAO, Chiny
Miroslav GEJDOŠ, Słowacja
Karol HENSEL, Słowacja
Hrvoje KOZMAR, Chorwacja
Frantisek KRCMA, Czechy
Sergio Lujan MORA, Hiszpania
Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan
Sirgii PAWŁOW, Ukraina
Natalia SAVINA, Ukraina
Natia SHENGELIA, Gruzja
Daniele ZULLI, Włochy

Konrad Lis
Zbigniew Pater

Kształtowanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych w walcierce skośnej sterowanej numerycznie



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDAWNICTWO

Lublin 2022

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Hadasik, Politechnika Śląska

dr hab. inż. Bartosz Koczurkiewicz, prof. uczelni, Politechnika Częstochowska

prof. dr hab. inż. Sebastian Mróz, Politechnika Częstochowska

Wydanie monografii zostało sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Monografia powstała na podstawie rozprawy doktorskiej napisanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Zbigniewa Patera oraz dra inż. Marcina Buczaja obronionej w 2022 roku na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2022

ISBN: 978-83-7947-535-3

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: Soft Vision Mariusz Rajski

www.printone.pl

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

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 30 egz.

Spis treści

Streszczenie	7
Summary	8
Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	9
1. Wprowadzenie	11
2. Analiza stanu zagadnienia	12
2.1. Przegląd literatury w zakresie walcowania skośnego	25
2.1.1. Walcowanie skośne dwuwalcowe	27
2.1.2. Walcowanie skośne trójwalcowe.....	31
2.2. Przegląd w zakresie konstrukcji walcarek kuźniczych	36
2.2.1. Walcarki kuźnicze wzdłużne	36
2.2.2. Walcarki kuźnicze poprzeczne	40
2.2.3. Walcarki kuźnicze skośne.....	49
2.3. Podsumowanie przeglądu literatury.....	57
3. Model numeryczny procesu walcowania skośnego	58
3.1. Zastosowana metoda obliczeń oraz jej zakres	58
3.2. Model materiałowy stosowany w obliczeniach numerycznych.....	60
3.3. Model tarcia	62
3.4. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych.....	64
4. Stanowisko badawcze	70
4.1. Konstrukcja mechaniczna	70
4.1.1. Analiza numeryczna walcarki skośnej z trzema rolkami kształtującymi.....	77
4.2. Sterowanie numeryczne	79
5. Badania doświadczalne	88
5.1. Zakres prac badawczych.....	88
5.2. Analiza uzyskanych wyników	91
5.2.1. Struktura geometryczna powierzchni odkuwek.....	92
5.2.2. Parametry siłowe w procesie walcowania skośnego	105
5.2.3. Dokładność geometryczna odkuwek	122

5.3. Przykładowe odkuwki.....	126
5.4. Ograniczenia przebiegu procesu walcowania skośnego	137
6. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	140
Literatura	142

Kształtowanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych w walcierce skośnej sterowanej numerycznie

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono analizę możliwości walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych w walcierce skośnej sterowanej numerycznie.

Wstępnie przeprowadzono analizę stanu zagadnienia w zakresie metod wytwarzania wydłużonych przedkuwek i odkuwek bazujących na kształtowaniu plastycznym metali oraz dokonano przeglądu konstrukcji walcerek kuźniczych.

W pracy omówiono wyniki analizy teoretycznej obejmującej obliczenia numeryczne procesu walcowania skośnego bazujące na metodzie elementów skończonych. Otrzymane rezultaty pozwoliły na przeanalizowanie wpływu ustawień początkowych procesu na jego przebieg, w tym rozkładu temperatury, intensywności odkształcenia, funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta–Lathama). W oparciu o uzyskane parametry siłowe skonstruowano i wykonano laboratoryjną walcarkę skośną. Stanowisko badawcze znajdujące się w Katedrze Obróbki Plastycznej Metali Politechniki Lubelskiej wykorzystuje układ sterowania numerycznego umożliwiający walcowanie wyrobów o różnych zarysach obwiedni, w wyniku sekwencyjnego przemieszczania narzędzi kształtujących na podstawie zadanej trajektorii ich ruchu.

W końcowej części pracy zaprezentowano wyniki prac doświadczalnych procesu walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych zrealizowane w laboratoryjnej walcierce skośnej. Określono wpływ zmian parametrów kształtowania, tj. kąta kształtującego α narzędzi, ich ustawienia kąтового θ względem osi walcowania, prędkości przemieszczania V_u uchwyty szczękowego, stopnia gniotu δ na jakość otrzymywanych wyrobów (falistość, wymiary geometryczne) oraz uzyskiwane parametry siłowe. Przeprowadzono także weryfikację doświadczalną sprawdzającą zasadność stosowania procesu walcowania skośnego do kształtowania wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych.

Zrealizowany zakres badań umożliwił sformułowanie wniosków, które przedstawiono w ostatnim rozdziale pracy.

Słowa kluczowe: walcowanie skośne, stopniowane wały i osie, walcarka skośna sterowana numerycznie

Formation of elongated axisymmetric parts in a CNC skew rolling mill

Summary

The objective of this work is to analyse whether elongated axisymmetric parts can be formed by skew rolling conducted with three tapered rolls in a CNC skew rolling mill.

First, a literature review on metal forming methods for elongated preforms and forged parts is presented. In addition to that, an overview of forging mill designs is given.

After that, theoretical analysis results are presented and discussed. The analysis involved performing numerical simulations of the skew rolling process by the finite element method. Numerical results made it possible to investigate the effect of initial parameters on the skew rolling process, including the distributions of temperature, effective strain and damage function (according to the Cockcroft–Latham criterion). Obtained force parameters were used to design and build a laboratory skew rolling mill. The machine is available in the Department of Metal Forming at Lublin University of Technology. It is equipped with numerical control, which makes it possible to produce parts of various envelope profiles because the tools move sequentially according to preset trajectories.

In a successive chapter, experimental results of the skew rolling process conducted with three tapered rolls in the laboratory skew rolling mill are presented. The effect of forming parameters such as the forming angle α , the skew angle θ , the jaw chuck velocity V_u and the reduction ratio δ on product quality (waviness, geometry) and force parameters is determined. In addition to that, it is experimentally verified whether the skew rolling process is suited for producing elongated axisymmetric parts.

The scope of the research made it possible to formulate conclusions that are presented in the final part of the work.

Keywords: skew rolling, stepped shafts and axles, CNC rolling mill

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

C	–	wartość krytyczna funkcji zniszczenia
D	–	średnica narzędzi
E	–	moduł sprężystości wzdłużnej
F_r	–	siła promieniowa
F_x	–	siła osiowa
M	–	moment obrotowy
R_e	–	granica plastyczności
R_p	–	względna redukcja przekroju poprzecznego
S_0	–	pole przekroju poprzecznego wsadu
S_1	–	pole przekroju odwalcowanego wyrobu
T	–	temperatura
V	–	prędkość osiowa przemieszczania wsadu
V_r	–	prędkość narzędzi w kierunku promieniowym
V_t	–	prędkość posuwu igły pomiarowej
V_u	–	prędkość liniowa uchwytu szczękowego
W_p	–	wysokość najwyższego wzniesienia profilu
W_t	–	całkowita wysokość profilu
W_v	–	głębokość najniższego wgłębienia profilu
W_z	–	największa wysokość profilu
$X_{s_{sr}}$	–	średnia szerokość elementów profilu
$Z_{t_{sr}}$	–	średnia wysokość elementów profilu
a	–	długość odcinka kalibracyjnego narzędzi
c_1, c_2	–	stałe liczbowe
d_0	–	średnica początkowa wsadu
d_1, d_2	–	średnica odwalcowanego wyrobu
d_j	–	wartość pomiarowa średnicy wyrobu
d_n	–	średnica nominalna
\bar{d}_t	–	średnia arytmetyczna z poszczególnych średnic wyrobu
k	–	granica plastyczności przy czystym ścinaniu
l_0	–	długość początkowa wsadu
l_1, l_2	–	stałe liczbowe
l_n	–	odcinek pomiarowy
l_w	–	długość odcinka elementarnego profilu falistości
m_1, m_2	–	stałe liczbowe
m	–	czynnik tarcia
m	–	liczba elementów profilu
n_1, n_2	–	stałe liczbowe
n	–	liczba obrotów walcowanego wyrobu
n	–	prędkość obrotowa narzędzi
p	–	nacisk normalny

r	–	promień zaokrągleń narzędzi
s_1	–	odsadzenie skośne narzędzi od uchwytu szczękowego
s_2	–	obszar zsynchronizowanego przemieszczania narzędzi i uchwytu szczękowego
s_3	–	obszar przemieszczania wyłącznie uchwytu bez zmiany położenia rolek
x_{si}	–	szerokość poszczególnych elementów profilu
z_{ti}	–	wysokość poszczególnych elementów profilu
Δd_o	–	owalizacja wyrobu
Δr	–	głębokość walcowania
α	–	kąt kształtujący
β	–	kąt rozwarcia klina
δ	–	stopień gniotu
ε	–	odkształcenie plastyczne materiału
θ	–	kąt zukosowania narzędzi roboczych względem osi walcowania
λ_f	–	filtr profilu
μ	–	współczynnik tarcia
ν	–	liczba Poisson'a
σ_1	–	maksymalne naprężenie główne
σ_i	–	naprężenie zastępcze
σ_p	–	naprężenie uplastyczniające
τ	–	naprężenie styczne
φ	–	intensywność odkształcenia
$\dot{\varphi}$	–	prędkość odkształcenia
ω	–	prędkość kątowna

<i>CFC</i>	–	<i>Continuous Function Chart</i>
<i>FBD</i>	–	<i>Function Block Diagram</i>
<i>FSR</i>	–	<i>Flexible Skew Rolling</i>
<i>IDE</i>	–	<i>Integrated Development Environment</i>
<i>IL</i>	–	<i>Instruction List</i>
<i>LD</i>	–	<i>Ladder Diagram</i>
<i>PAC</i>	–	<i>Parker Automation Controller</i>
<i>PAM</i>	–	<i>Parker Automation Manager</i>
<i>PFI</i>	–	<i>Programmable Function Interface</i>
<i>SFC</i>	–	<i>Sequential Function Chart</i>
<i>ST</i>	–	<i>Structured List</i>

1. Wprowadzenie

Produkcja części szeroko stosowanych w budowie maszyn, w tym wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych wymaga ciągłych prac nad rozwojem technologicznym metod wytwórczych, które umożliwią minimalizację strat materiałowych, energochłonności i jednocześnie wpłyną pozytywnie na jakość i dokładność produkowanych wyrobów.

Niekwestionowana pozycja obróbki ubytkowej w systemach wytwarzania charakteryzuje się opłacalnością wykonywania wyrobów w produkcjach małoseryjnych, w których pozostałe techniki, w tym obróbka plastyczna charakteryzuje się mniejszą elastycznością, wynikającą głównie z kosztów wytworzenia narzędzi roboczych. Powoduje to, że metody plastycznego kształtowania wykorzystywane są przede wszystkim w wielkoseryjnych procesach produkcyjnych, pomimo niewielkiego jednostkowego czasu kształtowania wyrobu, jak również dobrego uzysku materiału.

Stosowanie obróbki skrawaniem do przygotowania osiowosymetrycznych części wynika również z integracji maszyn wytwórczych z precyzyjnymi systemami sterowania numerycznego wspomagającego proces wytwarzania. Dlatego też wprowadzanie systemów automatyzujących procesy kształtowania dokonuje się również w zakresie technologii obróbki plastycznej, gdzie ustawianie materiału wyjściowego względem matryc następuje poprzez pracę manipulatorów przemysłowych, a pozycjonowanie narzędzi kształtujących realizowane jest w wyniku sygnału sprzężenia zwrotnego z elektronicznych czujników zintegrowanych z systemami kontroli i wizualizacji procesu.

W niniejszej pracy zbadano możliwość kształtowania wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych w oparciu o walcarkę skośną sterowaną numerycznie, skonstruowaną w Katedrze Obróbki Plastycznej Metali Politechniki Lubelskiej. Prace teoretyczne obejmujące obliczenia numeryczne walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych oparte na metodzie elementów skończonych umożliwiły poznanie wpływu parametrów na proces kształtowania. Poprzez prace doświadczalne, wprowadzając zmienne warunki początkowe zweryfikowano ich wpływ na jakość uzyskiwanych wyrobów, parametry siłowe, jak również zjawiska ograniczające proces walcowania skośnego.

Autorzy składają również wyrazy podziękowania pracownikom Katedry Obróbki Plastycznej Metali Politechniki Lubelskiej, którzy czynnie uczestniczyli w badaniach oraz wspierali swoim bogatym doświadczeniem. Ponadto wyrazy wdzięczności kierowane są do recenzentów monografii, których cenne uwagi wpłynęły na ostateczną postać opracowania.

2. Analiza stanu zagadnienia

Wydłużone wyroby osiowosymetryczne, głównie w postaci stopniowanych osi i wałów stosowane są w przemyśle maszynowym oraz środkach transportu, w tym motoryzacyjnym, lotniczym i kolejowym. Wykorzystywane są przede wszystkim w układach napędowych, nośnych oraz przekładniach mechanicznych. W szeroko rozumianej budowie maszyn występują w postaci wałów korbowych, rozrzędu, Cardana, stopniowanych wałków przekładniowych, półosi oraz osi.

Przy produkcji małoseryjnej i jednostkowej wytwarzanie stopniowanych wałów i osi realizowane jest metodami obróbki skrawaniem. Głównym procesem jest toczenie, które poprzez usuwanie kolejnych warstw materiału powoduje uzyskanie pożądanego kształtu i wymiaru obrabianego elementu. Dodatkową operacją jest frezowanie, zapewniające wykonanie niezbędnych stopni kształtowych, wielowypustów oraz rowków. Końcowe prace obejmują obróbkę ścierną, której celem jest uzyskanie zadanej chropowatości powierzchni otrzymanego elementu. Metoda ta charakteryzuje się dużą materiałochłonnością oraz pracochłonnością, dlatego też stosowana jest w produkcji wyrobów o małych różnicach przekrojów poprzecznych, umożliwiając korzystanie z wsadów materiałowych w postaci prętów hutniczych o standaryzowanych średnicach.

Stosowanie półfabrykatów w postaci odkuwek w produkcji wyrobów wydłużonych, głównie wałów i osi jest uzasadnione finansowo w produkcji średnio i wielkoseryjnej. Elementy te kształtowane są metodami obróbki plastycznej, głównie kuciem lub walcowaniem. Umożliwiają one zmniejszenie zużycia materiału w procesie wytwarzania, skrócenie czasu obróbki skrawaniem, w szczególności operacji tokarskich oraz energochłonności parku maszynowego, ze względu na zmniejszenie naddatków technologicznych. Dodatkowo, odkuwki wykazują lepsze własności wytrzymałościowe ze względu na korzystne zachowanie ciągłości układu włókien kształtowanego materiału, inaczej niż w przypadku wyrobów wykonywanych wyłącznie obróbką ubytkową.

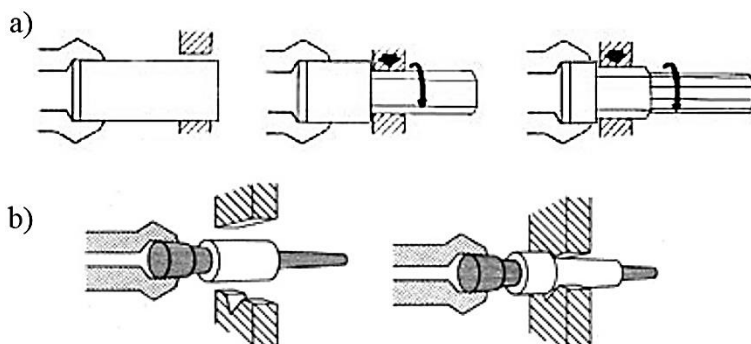
Kształtowanie wielkogabarytowych przedkuwek oraz wydłużonych odkuwek, takich jak stopniowane osie i wały w procesach obróbki plastycznej realizowane jest poprzez:

- kucie swobodne,
- kucie matrycowe,
- kucie na kowarkach,
- walcowanie wzdłużne,
- walcowanie poprzeczne,
- walcowanie skośne.

Proces kucia swobodnego umożliwia zmianę kształtu obrabianego wyrobu w wyniku działania bijaka młota lub suwaka prasy. Stosowany jest przy niedużych seriach do wykonywania odkuwek ciężkich, głównie w produkcji wałów, elementów wydłużonych dla najcięższych maszyn przemysłowych i pojazdów. Przy maksymalnej masie odkuwek do 250 kg w procesie kucia

wykorzystywane są młoty sprężarkowe o masie części spadających do 1 t. Odkuwki średnie do 1500 kg wykonuje się na młotach parowo-powietrznych o masie części spadających do 5 t. Odkuwki ciężkie o masie nawet do 250 t wydłuża się na prasach hydraulicznych o nacisku do 200 MN.

Kształtowanie wyrobów w postaci stopniowanych wałów i osi odbywa się poprzez operację wydłużania, podczas której następuje zmniejszanie przekroju poprzecznego i wzrost długości materiału w kierunku osiowym (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Schemat procesu kucia swobodnego: a) odkuwki pełne, b) odkuwki drążone [91]

Nagrzany wsad po każdym nacisku bądź uderzeniu kowadłem górnym jest obracany o 90° i ponownie uderzany w miejsce poszerzone. Po każdym wykonanym przejściu materiał zostaje przesunięty na kowadło dolnym, po czym następuje kolejny gniot. Proces kucia swobodnego wykorzystywany jest zarówno do wytwarzania wyrobów pełnych jak i drążonych, gdzie jako materiał wyjściowy wykorzystuje się wlewki, półwyroby kute lub walcowane o przekroju kwadratowym, pręty walcowane lub kształtowe [38, 69, 86, 87].

Przykładowe odkuwki wałów pośrednich z kołnierzami, kształtowane metodą kucia swobodnego z wlewków zaprezentowano na rysunku 2.2. Podczas ich kucia istotny jest ciągły pomiar odległości pomiędzy kołnierzami. W przypadku, gdy po ostygnięciu zmierzona odległość jest za mała istnieje możliwość dalszego swobodnego wydłużenia na kowadłach, jednak wiąże się to z ponownym procesem nagrzewania materiału. Gdyby nastąpiło przekroczenie wymiarów granicznych na średnicy przygotowywanej odkuwki a tym samym odległości między kołnierzami, to nie ma możliwości przeprowadzania ponownego kształtowania, co wiąże się ze złomowaniem odkuwki. Przy odpowiednio dobranej temperaturze nagrzewania wsadu oraz sile uderzenia młota bądź nacisku prasy następuje przekucie części środkowej przekroju materiału prowadzące do utworzenia drobnoziarnistego rdzenia. Natomiast przy zbyt niskich temperaturach kształtowania lub słabych uderzeniach uzyskiwany jest wyrób z nieprzekutym rdzeniem, a wyłącznie z odkształconą powierzchnią warstwą materiału. Stosowanie tej technologii wytwarzania wymaga pozostawienia nadatków na

dalszą obróbkę skrawaniem. Dla odkuwek o średnicy do 200 mm minimalny naddatek to 1,5 mm, pomiędzy 201 mm a 400 mm jest to 3 mm a dla wymiarów powyżej 400 mm, najmniejszy dopuszczalny naddatek na obróbkę mechaniczną to 5 mm.

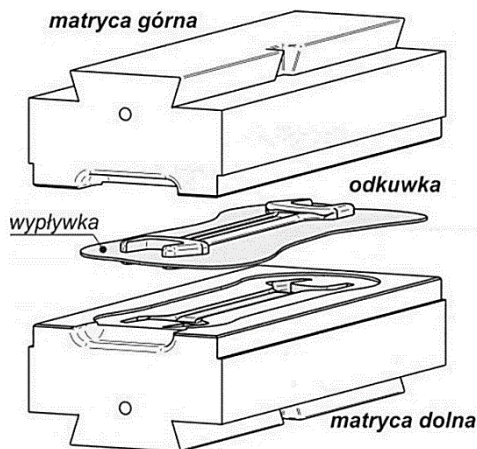


Rys. 2.2. Odkuwki wałów pośrednich otrzymanych metodą kucia swobodnego [69]

Wyroby drażone wydłuża się poprzez wykorzystanie trzpienia (rys. 2.1b). W ten sposób zwiększana jest długość odkuwki, przy jednoczesnym zmniejszaniu jej średnicy zewnętrznej. Podczas kucia stosowane jest dolne kowadło w kształcie litery V natomiast górne jest płaskie. Trzpień powinien być gładko obrobiony i mieć małą zbieżność. Przy kształtowaniu długich tulei należy stosować trzpienie z kołnierzem oraz drażone, które mają możliwość chłodzenia od wewnątrz wodą. Kucie swobodne drażonych wyrobów stosuje się do produkcji odkuwek, np. na lufy do dział, cylindrów pras hydraulicznych [86].

Kolejnym procesem umożliwiającym wytwarzanie wyrobów stopniowanych i wydłużonych jest kucie matrycowe (rys. 2.3). Jest ono jedną z najbardziej rozpowszechnionych technologii obróbki plastycznej w przemyśle. Proces kształtowania wyrobów prowadzony jest na młotach, gdzie odkształcenie materiału realizowane jest w sposób dynamiczny poprzez jedno- lub wielokrotne uderzenie. Materiał płynie bardziej powierzchniowo natomiast energia kinetyczna części spadających młota jest tylko częściowo przekształcana w pracę odkształcenia. Drugą możliwością jest wytwarzanie na prasach kuźniczych, tj. korbowych, śrubowych i hydraulicznych. Wsad odkształcany jest w sposób statyczny, co wynika z realizowanej pracy suwaka prasy, którego siła nacisku jest podstawowym parametrem tych maszyn przemysłowych. Kształtowanie wyrobu poprzez wywołanie ciągłego nacisku powoduje odkształcenie materiału w całej jego objętości wraz z jednoczesnym, intensywniejszym jego płynięciem na boki.

Odkuwki wydłużone, charakteryzujące się długością większą od wymiarów poprzecznych, w tym odkuwki proste, wygięte, posiadające rozwidlenia lub odgałęzienia kute są w kierunku prostopadłym do osi wydłużonej materiału wsadowego.



Rys. 2.3. Matryca jednowykrojowa do kucia na młotach wraz z odkuwką [38]

Stosowanymi wsadami są pręty oraz wykonywane z nich przedkuwki. Wytwarzane są one w maszynach kuźniczych w oddzielnej operacji, np. podczas kucia na prasach lub walcowania wzdłużnego, poprzeczno-klinowego bądź w matrycach wielowykrojowych w jednej operacji podczas kucia na młotach, gdzie zarówno przedkuwka jak i odkuwka wykonywana jest za pomocą tej samej matrycy [38, 84, 86].

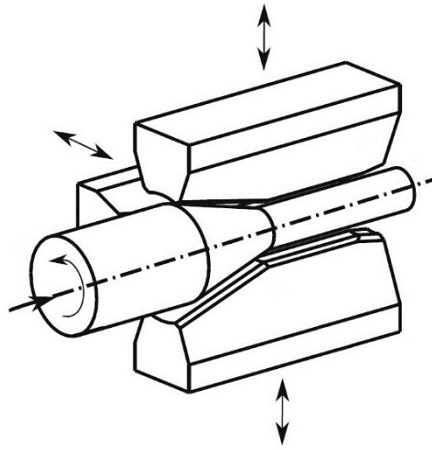
Przykładowymi wyrobami wydłużonymi są odkuwki cięższych wałów korbowych kształtowane w specjalnym przyrządzie kuźniczym TR, montowanym na prasach mechanicznych o nacisku do 100 MN (rys. 2.4). Ta metoda kucia opracowana została przez prof. Tadeusza Ruta w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Podczas kształtowania zastosowany w przyrządzie układ przegubowy powoduje rozkład siły nacisku na dwie składowe, tj. pionową oraz poziomą. Pierwsza z wymienionych sił podczas przemieszczania suwaka prasy powoduje samoczynne zaciśnięcie pręta w wykrojach matryc. Natomiast składowa pozioma pokonuje opór spęczania materiału pomiędzy czołami tych matryc. Ciągły ruch suwaka i dalsze pochylenie łączników przegubowych powoduje przemieszczanie matryc do środka przyrządu prowadzące do spęczenia korby. W końcowym etapie procesu wyginak kształtuje pojedyncze wykorbienie wału. Opisana metoda wytwarzania odkuwek charakteryzuje się zmniejszeniem pracochłonności, oszczędnością materiału poprzez pozostawianie minimalnych nadatków technologicznych i na obróbkę ubytkową. Zalety te umożliwiają zastąpienie przez tę technologię kucia swobodnego, stosowanego do

kształtowania odkuwek wałów korbowych, charakteryzującego się dużymi nadadatkami na obróbkę [61, 73, 86].



Rys. 2.4. Odkuwka wału korbowego otrzymana metodą TR [92]

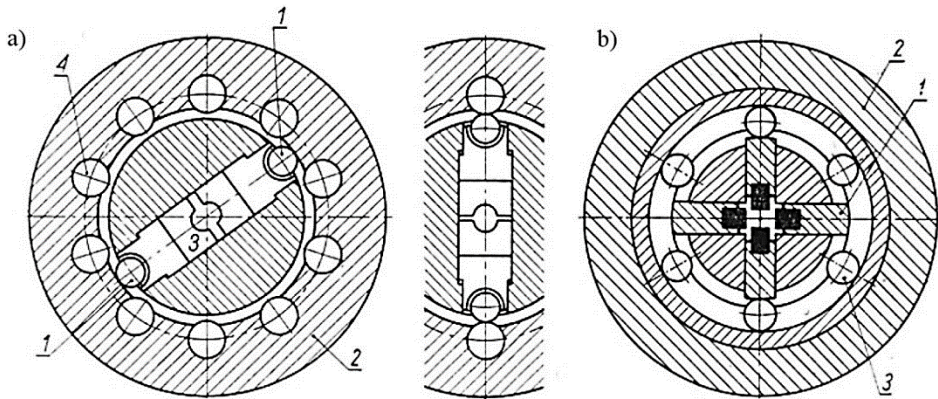
Kształtowanie wydłużonych odkuwek wykonywane jest również poprzez kucie na kowarkach. Są to maszyny kuźnicze wielokowadełkowe pracujące udarowo, gdzie kształtowanie materiału następuje poprzez cykliczne, promieniowe uderzenia we wsad (rys. 2.5). Kowadła pracują z dużą częstotliwością uderzeń, powodując przemieszczenie względnie małych objętości obrabianego materiału, co przekłada się na małe wartości nacisku oraz energii odkształcenia. Umożliwia to wykonanie m. in. wałów wielostopniowych o przekrojach kołowych, prętów o przekrojach kwadratowych, prostokątnych i innych wielokątnych, osi oraz rur grubościennych. Kształtować można powierzchnie zewnętrzne wyrobu oraz ich powierzchnie wewnętrzne stosując odpowiednie trzpienie. Metoda ta może również służyć, jako jedna z pośrednich operacji kuźniczych przygotowujących wsad do dalszej obróbki plastycznej. Najczęściej stosowanymi wsadami do kucia na kowarkach są wlewki oraz półwyroby kute lub walcowane [11, 57, 77, 84, 99].



Rys. 2.5. Schemat procesu kucia na kowarce rotacyjnej [83]

Ze względu na kinematykę ruchu narzędzi roboczych kowarki można podzielić na trzy grupy, tj. rotacyjne, mimośrodowo-korbkowe oraz hydrauliczne.

Kowarki rotacyjne charakteryzują się tym, że wykonywany jest ruch obrotowy dookoła kutego materiału przez mechanizmy zgniatające bądź obudowy tych mechanizmów (rys. 2.6).



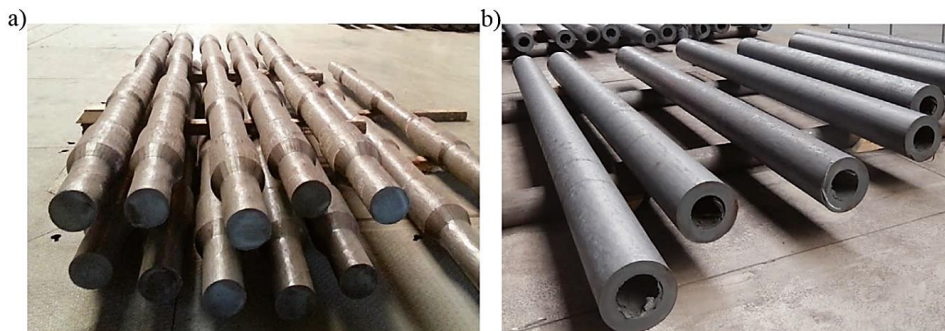
Rys. 2.6. Kowarki rotacyjne: a) z wirującymi bijakami (1 – rolki, 2 – obudowa, 3 – bijaki, 4 – rolki osadzone w obudowie), b) z wirującą obudową (1 – bijaki, 2 – wirująca obudowa, 3 – rolki) [84]

Dlatego też kowarki podzielone zostały na trzy grupy. Pierwsze z nich to kowarki z wirującymi bijakami, w których zespół zgniatający z kowadłami obraca się dookoła wsadu z jednoczesnym ruchem posuwisto-zwrotnym, powodując przemieszczanie kowadeł do osi półfabrykatu. W kowarkach z wirującą obudową bijaki z kowadłami wykonują wyłącznie ruch posuwisto-

-zwrotny wywołany przez wirującą obudowę z osadzonymi w niej rolkami, wykonującą ruch obrotowy wokół kształtowanego materiału. Obrót wsadu realizowany jest przez zewnętrzny manipulator. Ostatni rodzaj to kowarki z wirującą obudową i bijakami wykonującymi ruch obrotowy wokół osi wsadu i ruchy promieniowe kowadeł. Wymienione kowarki stosowane są w produkcji wielkoseryjnej do wytwarzania odkuwek z prętów o średnicach w przedziale od 1,5 do 50 mm oraz rur o średnicach od 10 do 160 mm, gdzie wielkość i kształt przekuwanego materiału zależy od rodzaju kowarki. W dwubijakowych kowarkach z wirującymi bijakami wykonywane są wyłącznie odkuwki o przekroju okrągłym. Kowarki czterobijakowe z wirującą obudową wytwarzają wyroby o przekrojach kołowych, kwadratowych lub prostokątnych. Trzybijakowe kowarki o zmiennym skoku stosowane są do kształtowania wałów wielostopniowych oraz stożkowych. Dokładność wymiarowa elementów wytwarzanych w kowarkach rotacyjnych przy kuciu na gorąco mieści się w przedziale od 0,06 do 0,3 mm, natomiast przy kuciu na zimno w przedziale od 0,02 do 0,1 mm [7, 86].

W kowarkach mimośrodowo-korbowych kowadła zamocowane w bijakach wykonują wyłącznie promieniowe ruchy posuwisto-zwrotne, tym samym nie jest wykonywany ruch obrotowy dookoła osi obrabianego materiału. Maszyny te wykorzystywane są do produkcji długich i cienkich odkuwek o wydłużonych kształtach oraz prętów i rur. Umożliwiają kucie wyrobów przy jednym nagrzewaniu z zachowaniem wysokich wymagań odnośnie dokładności oraz odpowiedniej trwałości zespołów roboczych [22].

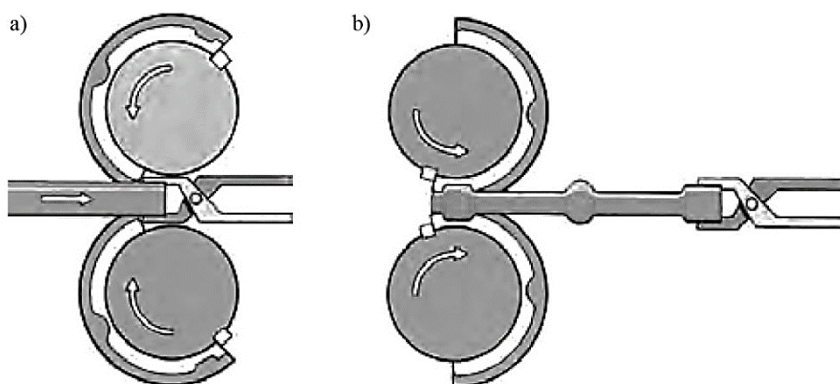
Ostatnim rodzajem są kowarki z układami hydraulicznego przemieszczenia bijaków z kowadłami. Każdy z nich połączony jest z oddzielnym tłokiem umieszczonym w cylindrze odlanej ramy. Zsynchronizowany ruch posuwisto-zwrotny narzędzi w kierunku osi odkształcanego materiału realizowany jest w sposób automatyczny na podstawie przygotowanego programu sterującego. Omawiany rodzaj kowarki charakteryzuje się dużą prędkością kucia wynoszącą nawet do 300 uderzeń/ min oraz stosowaniem dużych posuwów narzędzi. W porównaniu do kucia swobodnego na prasach hydraulicznych wydajność tych maszyn jest czterokrotnie większa [30]. Przykładowe wyroby uzyskiwane metodą kucia na kowarkach z hydraulicznym napędem narzędzi przedstawiono na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Odkuwki kute na kowarce: a) podwójne osie kolejowe, b) rury grubościenne [71]

Walcowanie jest kolejnym procesem obróbki plastycznej metali umożliwiającym kształtowanie wielkogabarytowych przedkuwek i odkuwek wydłużonych. Stosowane jest do produkcji gotowych odkuwek, ale również jako pośredni proces w przygotowywaniu przedkuwek, które po odwalcowaniu bez dodatkowego nagrzewania mogą zostać poddane następnej operacji kuźniczej, np. kuciu matrycowemu. W zależności od rodzaju ruchu oraz ustawienia walców wyróżnić można trzy rodzaje walcowania, tj. wzdłużne, poprzeczne oraz skośne [16, 85].

Podczas walcowania wzdłużnego odkształcanie materiału następuje pomiędzy dwoma walcami obracającymi się w przeciwnych kierunkach. W wyniku występującego tarcia pomiędzy kształtowanym wsadem a walcami, materiał zostaje wciągnięty między walce przemieszczając się ruchem prostoliniowym.

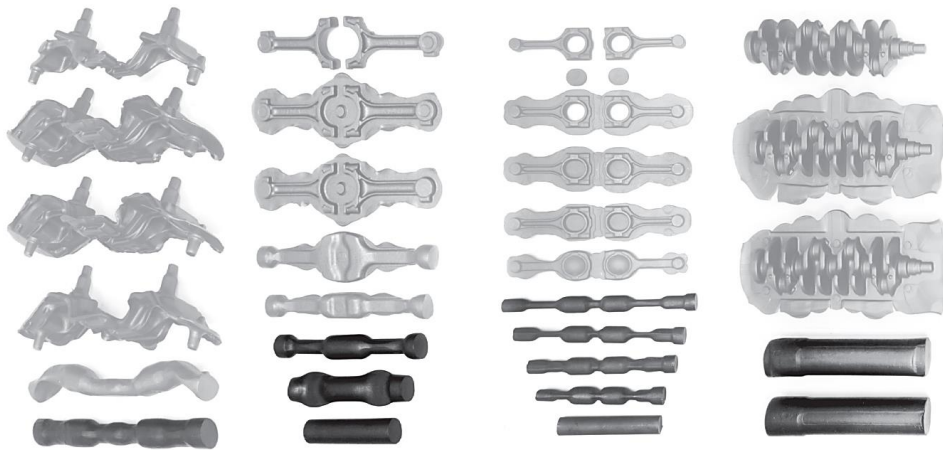


Rys. 2.8. Schemat walcowania wzdłużnego kuźniczego [70]:
a) wprowadzony materiał pomiędzy walcami, b) odwalcowany wyrób

Na rysunku 2.8 zaprezentowano walcowanie na walcach segmentowych, podczas którego materiał wsuwany jest pomiędzy odchylone narzędzia

a następnie obracające się walce kształtują materiał i cofają go do położenia wyjściowego. W zależności od kształtu i wymiarów przedkuwki, proces przeprowadzany jest w jednym bądź w kilku wykrojach narzędzi. Walcowanie wzdłużne kuźnicze stosowane jest do kształtowania przedkuwek wydłużonych, m. in. przedkuwek korbowodów, kluczy maszynowych oraz różnego rodzaju dźwigni. W porównaniu do operacji wydłużania na młotach do kucia swobodnego, walcowanie charakteryzuje się zmniejszeniem zużycia materiału, zwiększoną wydajnością produkcyjną, oraz małą pracochłonnością. Ponadto zastosowanie tego procesu polepsza warunki kucia matrycowego odkuwek poprzez usuwanie zgorzeliny w trakcie walcowania, jak również wpływa na zwiększenie trwałości matryc w wyniku optymalizacji kształtu przedkuwki. Dodatkowo, umożliwiało kształtowanie przedkuwek o przekroju różnym od kołowego, tj. owalnym, kwadratowym, prostokątnym [75].

Przykładowe półwyroby otrzymane w procesie walcowania wzdłużnego przedstawiono na rysunku 2.9. To wydłużone przedkuwki m. in. korbowodów, wałów korbowych, które kształtowane są następnie metodą kucia matrycowego [1, 70].



Rys. 2.9. Kształtowanie wyrobów z podziałem na poszczególne operacje: obraz pociemniony – walcowanie wzdłużne kuźnicze, obraz wyszarzony – kucie matrycowe wraz z operacjami jego zamknięcia [70]

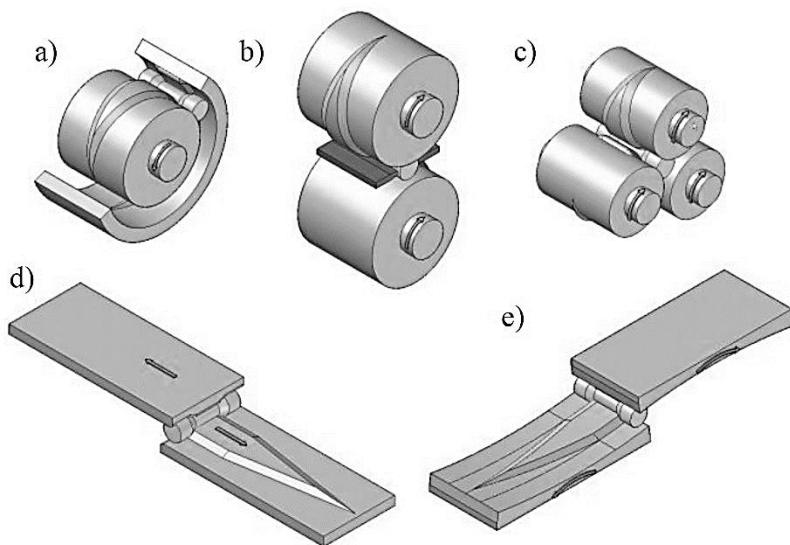
Innymi elementami wytwarzanymi omawianą metodą walcowania są przednie osie samochodowe. Największe z nich o długości ponad 2000 mm ważą powyżej 200 kg. Na rysunku 2.10 przedstawiono jedną z takich osi, której długość wynosi ponad 1800 mm. Kształtowanie jej odbywa się z użyciem wsadu materiałowego o wymiarach $\varnothing 130$ mm x 1050 mm [4, 15, 20, 62, 76, 102].



Rys. 2.10. Kształtowanie belki osi przedniej samochodowej w procesie walcowania wzdłużnego: a) po pierwszym przepuszczeniu, b) po drugim przepuszczeniu, c) po trzecim przepuszczeniu, d) gotowy wyrób [102]

Złożona geometria belki osi przedniej została podzielona na 7 przekrojów poprzecznych, co umożliwia przygotowanie odpowiednich dla nich wykrojów walców segmentowych. Przedkuwka walcowana jest z wypływką w trzech przepustach a następnie poddawana jest gięciu, okrawaniu z nadkładu materiałowego oraz kuciu na prasach śrubowych w celu uzyskania zakładanego kształtu. W zależności od gabarytów belek osi do ich kucia stosowane są prasy kuźnicze o naciskach od 25 do 40 MN.

Kolejnym rodzajem walcowania umożliwiającym wytwarzanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych jest walcowanie poprzeczne, w tym najbardziej rozpowszechnione w kuźnictwie poprzeczno-klinowe. Polega ono na plastycznym kształtowaniu części w wyniku oddziaływania klinowych segmentów narzędziowych umieszczonych na walcach bądź płaskich lub wklęsłych płytach walcarek (rys. 2.11). Proces ten wykorzystywany jest w produkcji odkuwek stopniowanych wałów i osi oraz części motoryzacyjnych, tj. czopów mechanizmów kierowniczych i układów zawieszenia. Ponadto, metodą tą wykonywane są przedkuwki wyrobów, takich jak klucze maszynowe, korbowody, dźwignie, widełki przeznaczone do kucia na prasach kuźniczych. Materiałem wsadowym może być długi pręt, umożliwiający kształtowanie kilkunastu lub kilkudziesięciu wyrobów bądź krótszy odcinek pręta przeznaczony jedynie na jeden lub maksymalnie dwa wyroby [14, 17, 28, 29, 35, 38, 41, 43, 46, 47, 67, 72, 100, 101].



Rys. 2.11. Schematy procesu walcowania poprzeczno-klinowego w układzie: a) walec-segment wklęsły, b) dwóch walców, c) trzech walców, d) dwóch klinów płaskich, e) dwóch klinów wklęsłych [38]

Metoda walcowania poprzeczno-klinowego charakteryzuje się dobrym wykorzystaniem materiału. Straty nie przekraczają na ogół 10%, gdzie np. w procesie kucia straty te wynoszą 15–30%, a w obróbce skrawaniem nawet 40%. Zwiększona jest również wydajność kształtowania wyrobów. Jest ona od 5 do 20 razy większa niż przy kuciu i obróbce ubytkowej [35, 55].

Przykładem wyrobu uzyskanego omawianą metodą walcowania z wykorzystaniem płaskich narzędzi klinowych (rys. 2.11d) jest wał przekładni tylnej śmigłowca, który ukształtowano w układzie podwójnym (rys. 2.12).



Rys. 2.12. Odkuwka wałka stopniowanego odwalcowanego w walcierce płaskoklinowej [46]

Wykorzystano walcarkę o kinematyce ruchu określonej przez nieruchome narzędzie dolne i przemieszczające się narzędzie górne [41, 46]. Długość

pojedynczego wyrobu wynosi 148,5 mm przy maksymalnej jego średnicy 62,5 mm. Do wykonania odkuwki zastosowano wsad stalowy o wymiarach $\text{Ø}48 \text{ mm} \times 204 \text{ mm}$.

Stopniowaną przedkuwkę (o długości 249 mm i największej średnicy 45 mm) kształtowaną w walcierce z dwoma walcami klinowymi (rys. 2.11b) przedstawiono na rysunku 2.13. Proces walcowania charakteryzuje się różnymi wartościami gniotów, w tym dużą redukcją przekroju poprzecznego środkowego stopnia wyrobu oraz brakiem symetrii. W celu zmniejszenia drogi kształtowania, a tym samym średnicy walców, zwiększono kąt rozwarcia klina narzędzi oraz wykonano na skrajnym stopniu pochylenie, co niwelowało osiowe przemieszczanie materiału w celu uniknięcia przewężenia i zerwania środkowego stopnia przedkuwki [47, 75].

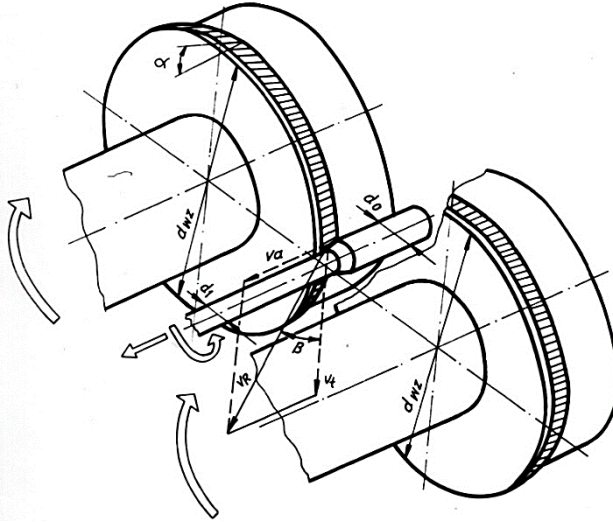


Rys. 2.13. Przedkuwka dźwigni odwalcowana w walcierce dwuwalcowej [75]

Prowadzone są również prace badawcze w zakresie walcowania wieloklinowego. Umożliwia ono kształtowanie wyrobu przez więcej niż jedną parę klinów, dzięki czemu zmniejsza się długość narzędzi, co równocześnie powoduje wzrost sił kształtowania oraz komplikuje geometrię segmentów narzędziowych. Badania naukowe z wykorzystaniem narzędzi wieloklinowych prowadzone są w zakresie walcowania wydłużonych wałów i osi samochodowych oraz kolejowych [14, 34, 40, 41, 66, 67, 72, 100, 101], jak również wyrobów krótkich, np. kul do młynów kulowych [44, 45].

Wytwarzanie wyrobów wydłużonych możliwe jest również za pomocą walcowania poprzecznego z osiowym przemieszczaniem kształtowanego wsadu (rys. 2.14). Metoda ta polega na walcowaniu wsadu materiałowego pomiędzy dwiema rolkami obracającymi się w tym samym kierunku wyposażonymi w pierścienie robocze o kącie kształtującym α , z dodatkowymi nacięciami technologicznymi. Narzędzia przemieszczają się promieniowo kształtując pręt ze średnicy d_0 do d_1 w zależności od ustalonej trajektorii ich ruchu z możliwością dowolnej jej regulacji. Wraz z posuwem rolek zsynchronizowane jest osiowe przemieszczanie wsadu umieszczonego w obrotowym uchwycie. Tym samym kąt rozwarcia klina β stosowany w procesie walcowania poprzeczno-klinowego, powodujący osiowe płynięcie materiału nie jest częścią geometryczną narzędzi, a realizowany jest kinematycznie (jego wartość wynika ze stosunku prędkości osiowej oraz promieniowej). Walcowanie wsadu dwoma narzędziami wymaga umiejscowienia go poniżej osi rolek, dzięki czemu eliminowane jest stosowanie

dodatkowych prowadnic w celu utrzymania wyrobu w kotlinie walcowniczej, co ma miejsce w typowych walcarkach poprzeczno-klinowych dwuwalcowych [5, 9, 12, 27, 31, 63]. Przykład odwalcowanego w omawiany sposób stopniowanego wału zaprezentowano na rysunku 2.15.



Rys. 2.14. Schemat walcowania poprzecznego z osiowym przemieszczaniem wsadu [9]



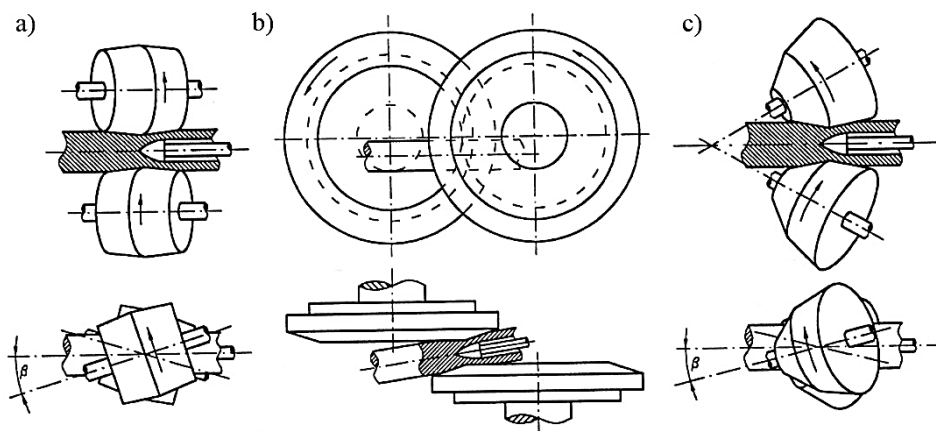
Rys. 2.15. Odwulka stopniowanego wału: a) wsad, b) odwalcowany wyrób, c) wyrób po obróbce skrawaniem [9]

2.1. Przegląd literatury w zakresie walcowania skośnego

Proces walcowania skośnego polega na plastycznym kształtowaniu wyrobów za pomocą walców o skośnym położeniu osi, obracających się w tym samym kierunku, wywołujących ruch postępowy oraz obrotowy kształtowanego materiału. Proces ten realizowany jest w walcarkach posiadających dwa lub trzy narzędzia robocze.

W trakcie kształtowania walce obracające się z tą samą prędkością i w jednakowym kierunku powodują, że punkty styczności z materiałem przemieszczają się ruchem śrubowym. Odkształcenie materiału wyjściowego jest wynikiem zmiany odległości pomiędzy powierzchniami roboczymi walców zmniejszającymi się w kierunku postępującego ruchu osiowego kształtowanego wyrobu. Stosowane narzędzia robocze mają odpowiedni kształt powodujący zwiększenie gniotu na długości obszaru odkształcenia. Umożliwia to uzyskanie warunków chwytu wsadu i w dalszym procesie jego poprawne kształtowanie.

Walcowanie skośne w dwuwalcowych walcarkach stosowane jest w produkcji tulei rurowych z wsadu, wlewka, kęsiska lub kęsa poprzez kształtowanie otworów okrągłych. Ponadto jest wykorzystane przy wydłużaniu tych tulei na cienkościennie rury oraz wyrównywaniu powierzchni i wymiarów gotowej rury, a także do wytwarzania odkuwek kul i krótkich wyrobów osiowosymetrycznych. Stosowane w tym celu są walce robocze, które podzielono według ich kształtów na trzy rodzaje (rys. 2.16) [6, 56, 85].



Rys. 2.16. Schematy skośnego ułożenia walców: a) beczkowe, b) tarczowe, c) stożkowe [6]

Walce beczkowe, (rys. 2.16a – najczęściej stosowane), o skośnym ustawieniu do osi walcownia pod odpowiednio dobranym kątem β , charakteryzują się kształtem dwóch stożków ściętych złączonych większymi podstawami. Wykorzystywane są głównie w walcowniach m. in. do kształtowania tulei z materiału, których średnice wynoszą od 60 mm do 650 mm dla klatek

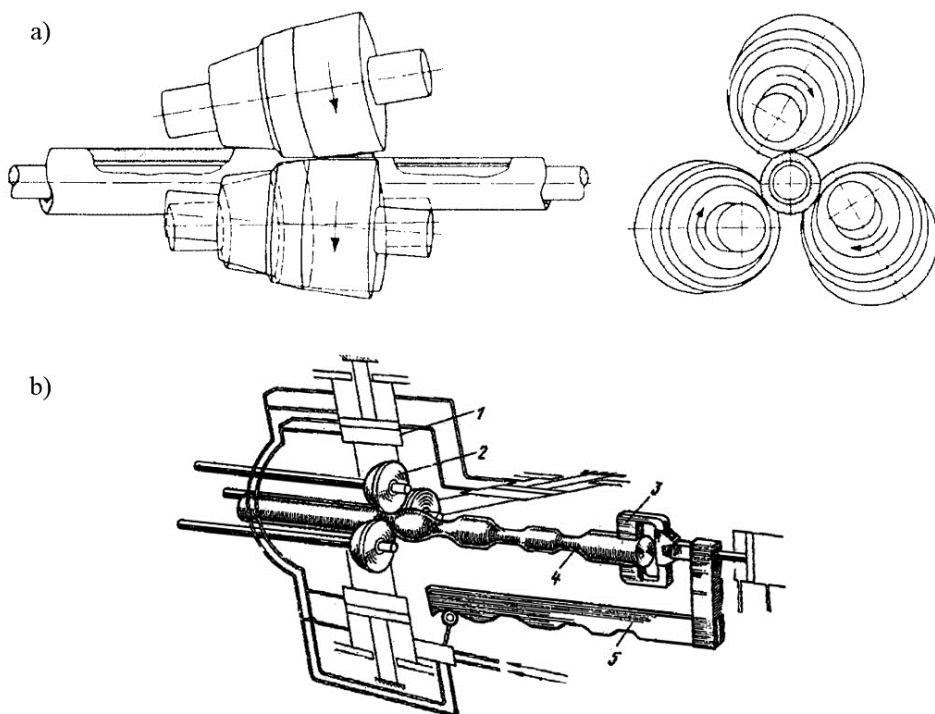
walcowniczych Mannesmanna i od 60 mm do 400 mm w walcarkach Stiefela. Stosowane są również w dwuwalcowych alongatorach wydłużających tuleje oraz w walcarkach Dischera do wydłużającego walcowania rur z tulei o długości do 12 m [2].

Skośny układ dwuwalcowy wykorzystywany jest również dla narzędzi posiadających śrubowo nacięte na obwodzie wykroje bruzdowe o zmiennym kształcie i skoku. Ich geometria spełnia zasady zachowania stałej objętości materiału podczas całego procesu kształtowania, zamykanego w stosunkowo krótkich odcinakach wykrojów, zapobiegając w ten sposób tworzeniu pęknięć w strefie osiowej półwyrobu. Metody te rozpowszechnione są w kuźnictwie i służą do walcowania kul stalowych oraz krótkich wyrobów osiowosymetrycznych o stosunkowo prostym kształcie [75, 42].

Walce tarczowe (rys. 2.16b) mają kształt ściętych stożków o równoległym ustawieniu osi narzędzi. Kształtowanie tulei rurowych zapewnione jest przez kąt rozwałcowania zawarty pomiędzy osią walcowania i osią walca roboczego w płaszczyźnie poziomej. Umożliwiają one walcowanie z okrągłych kęsów wyrobów o średnicach od 60 mm do 150 mm. Pomimo prostszej konstrukcji walcerek dla narzędzi tarczowych w stosunku do bezkowych, proces walcowania jest trudniejszy.

Walce stożkowe (rys. 2.16c) zukosowane pod kątem β względem osi walcowania, charakteryzują się kształtem dwóch stożków ściętych (kolejno połączonych podstawą większą do wierzchołka następnego stożka) i zakończone są częścią walcową. Stosowane są do kształtowania tulei z metali nieżelaznych o średnicach od 70 mm do 150 mm. Utrzymanie materiału pomiędzy dwoma walcami w przestrzeni roboczej realizowane jest poprzez stosowanie dodatkowych prowadnic liniowych lub tarczowych bądź walców prowadniczych, ograniczając tym samym wielkość owalizacji kształtowanego wyrobu.

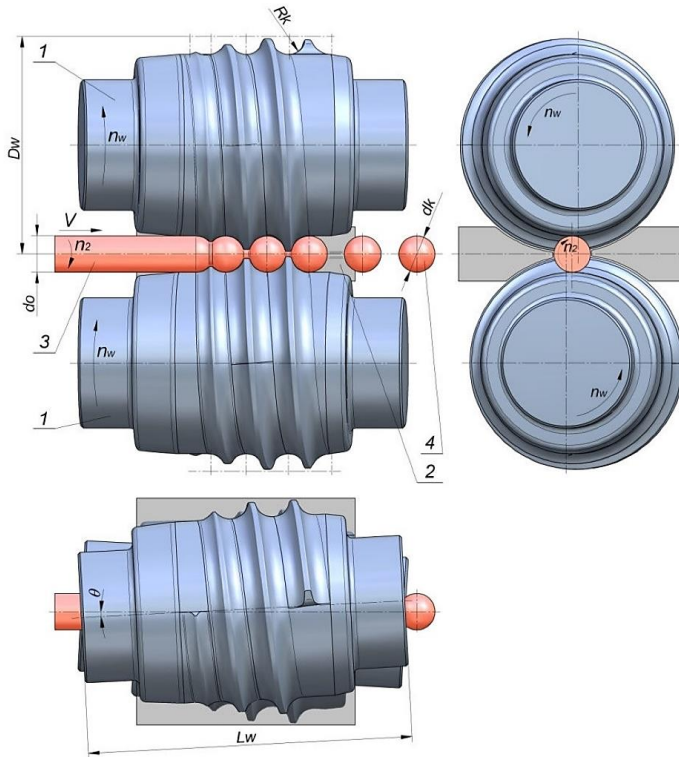
Walcowanie skośne realizowane jest również za pomocą trzech rolek stożkowych. Rozmieszczone na obwodzie wsadu co 120° , ustawione są skośnie względem osi wyrobu, obracając się z jednakową prędkością w tym samym kierunku. Narzędzia zachowują również jednakowe zmiany odstępów od osi walcowania. W hutnictwie stosowane są m. in. w kłatkach walcowniczych Assela (rys. 2.17a), w których realizowany jest proces walcowania rur grubościennych o średnicach od 40 mm do 240 mm z tulei rurowych. W kuźnictwie używane są również narzędzia w postaci rolek stożkowych podczas walcowania skośnego, wykorzystywanego do kształtowania stopniowanych wyrobów osiowosymetrycznych (rys. 2.17b).



Rys. 2.17. Schemat procesu walcowania skośnego: a) Assela do walcowania rur z tulei rurowych, b) kuźniczego do kształtowania stopniowanych wyrobów: 1 – siłownik hydrauliczny, 2 – rolka kształtująca, 3 – uchwyt, 4 – kształtowany wyrób, 5 – kopiał [2, 6]

2.1.1. Walcowanie skośne dwuwalcowe

Walcowanie kuźnicze dwoma walcami o wykrojach śrubowych, ustawionymi skośnie pod kątem θ do osi kształtowanego wsadu stosowane jest głównie w produkcji kul wytwarzanych z pełnego pręta (rys. 2.18). Wstępnie proces rozpoczyna się od umieszczenia w prowadnicach nagrzanego wsadu i wprowadzenia go w przestrzeń pomiędzy walce do momentu, gdy zostanie on uchwycony przez kołnierze narzędzi. Wsad obracając się wokół własnej osi jest kształtowany w wykroju śrubowym. Wzrost gniotu poprzecznego spowodowany jest zwiększoną wysokością kołnierzy wykroju, co powoduje płynięcie materiału i przyjmowanie zakładanego kształtu kuli. Podczas walcowania poszczególne kule połączone są łącznikami, tzw. mostkami, które są rozwalcowywane podczas kalibrowania kul. Do podtrzymania wsadu podczas procesu stosowane są prowadnice o szerokości dostosowanej do końcowego wymiaru walcowanej kuli. Każdy pełny obrót walców powoduje ukształtowanie co najmniej jednej kuli, co oznacza, że produktywność procesu zależna jest od prędkości obrotowej narzędzi roboczych.



Rys. 2.18. Schemat procesu walcowania skośnego kul: 1 – walec z wykojem śrubowym, 2 – prowadnica, 3 – wsad, 4 – ukształtowana kula [42]

Wskutek nieprawidłowego ustawienia osiowych walców, przesuwające się w wykoju kule powodują wciskanie się mostków w ich objętość, co może doprowadzić do powstawania łusek. Innymi defektami występującymi na powierzchni kul są nacięcia, spowodowane poprzez odkształcanie wyrobu ze zmiennym naciskiem, gdzie materiał jest częściowo ścinany brzegiem kołnierza wykoju. Wgniecenia na powierzchni kul wynikają z nalepiania się fragmentów materiału na walcach, które w postaci łusek oddzielają się z warstwy wierzchniej metalu w wyniku intensywnego poślizgu między kształtowanym wyrobem a narzędziami. Dodatkowo przy walcach o małej twardości, nadtopione części materiału wżerają się w narzędzia, co przy zetknięciu z kształtowaną kulą powoduje jej zniekształcenie.

Wykoje śrubowe można podzielić na dwie części, tj. kształtującą i kalibrującą. W pierwszej z nich następuje chwyt wsadu i rozpoczęcie kształtowania kul łączonych mostkiem, dokonywane przez kołnierze wykoju, których wysokość stopniowo wzrasta. Druga część odpowiada za końcowe kalibrowanie kształtu i wymiarów kul i ich rozdzielanie na pojedyncze wyroby.

Odnośnie walcowania kul stalowych przeprowadzono prace naukowe w zakresie modelowania numerycznego opartego na MES [31, 32, 45, 59, 60, 64, 79], jak również sposobu projektowania narzędzi kształtujących [10, 51, 58, 96]. Ponadto w Politechnice Lubelskiej realizowano prace badawcze polegające na opracowaniu metody wytwarzania kul, dla których wsadem są główki złomowanych szyn kolejowych [36, 42, 43]. Na ich podstawie opracowano technologię walcowania śrubowo-klinowego umożliwiającą zwiększenie wydajności kształtowania w stosunku do tradycyjnej metody walcowania śrubowego, poprzez zastosowanie narzędzi o wykrojach jedno lub wielozwojnych. Możliwość stosowania walców z nawiniętymi śrubowo na ich obwodzie zwielokrotnionymi klinami powoduje uzyskanie kilku kul w czasie jednego obrotu narzędzi. Ilość odkuwek wynika z krotności wykrojów śrubowych, gdzie przykładowo narzędzia trójzwojne, obracające się z prędkością 160 obr/min mogą ukształtować 480 kul w ciągu jednej minuty [42, 75].

Przeprowadzono również analizy numeryczne oraz prace doświadczalne w zakresie walcowania krótkich wyrobów osiowosymetrycznych w postaci stopniowanych wałków, sworzni kulistych oraz korpusów noży obrotowych z wykorzystaniem technologii walcowania śrubowo-klinowego [3, 33, 34, 40].

a)

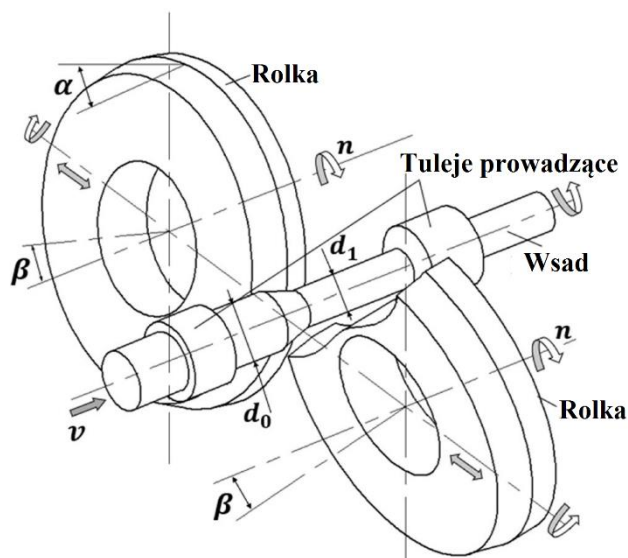


b)



Rys. 2.19. Odkuwki uzyskane w procesie walcowania śrubowo-klinowego: a) kula \varnothing 33mm, b) sworznie kuliste [3, 43]

Walcowanie skośne za pomocą rolek stożkowych alternatywnie niż walcami o wykrojach śrubowych umożliwia kształtowanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych (rys. 2.20). Rolki o nieskomplikowanym geometrycznie kształcie charakteryzuje część kształtująca o kącie α oraz kalibrująca o długości a . Strefa kształtująca posiada dodatkowe nacięcia technologiczne, co powoduje zwiększenie sił tarcia, a tym samym zwiększa kontakt obracających się narzędzi z kształtowanym wsadem. Dodatkowo na rolkach stosowana jest część wyjściowa, która może zostać opisana kątem α (tym samym co w części kształtującej) lub wykonana w postaci sfazowania o odpowiednich zaokrągleniach krawędzi, wpływając na poprawę jakości powierzchni odwalcowanego wyrobu.



Rys. 2.20. Schemat walcowania skośnego za pomocą rolek stożkowych [98]

Rozpoczęcie procesu walcowania zaczyna się od umieszczenia nagrzanego do odpowiedniej temperatury wsadu o średnicy d_0 i długości l_0 w otworach tulei prowadzących. Wstępne wprowadzenie materiału pomiędzy narzędzia odbywa się przy wykorzystaniu popychacza, który zostaje wycofany w momencie chwycenia wsadu przez rolki. W kolejnym etapie następuje zukosowanie narzędzi pod kątem β względem osi materiału wyjściowego. Rolki stożkowe obracające się z tą samą prędkością obrotową n oraz w tym samym kierunku rozpoczynają zsynchronizowany przesuw promieniowy do osi wsadu dokonując jego kształtowania do określonej średnicy d_1 w zależności od przyjętej redukcji przekroju poprzecznego. Materiał podczas kształtowania przemieszczany jest osiowo w wyniku tarcia pomiędzy powierzchniami trącymi eliminując stosowanie dodatkowego uchwytu ciągnącego walcowany wyrób. Wszelkie parametry ustawcze procesu, w tym prędkość obrotowa n , kąt zukosowania β , prędkość posuwu promieniowego narzędzi odbywa się w wyniku zaprogramowanych sekwencji ruchów poszczególnych podzespołów. Przykładowe wydłużone osiowosymetryczne przedkuwki oraz odkuwki uzyskane podczas prac laboratoryjnych nad procesem walcowania skośnego za pomocą dwóch rolek stożkowych zaprezentowano na rysunku 2.21 [21, 98].

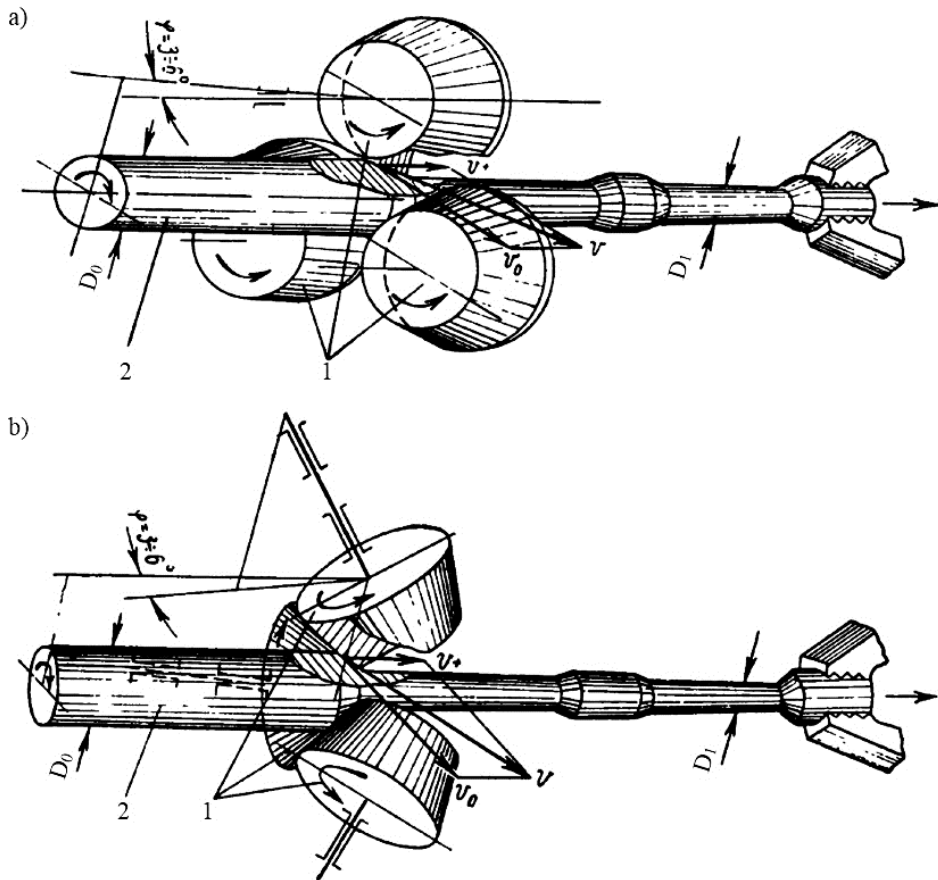


Rys. 2.21. Wyroby uzyskane metodą walcowania skośnego za pomocą rolek stożkowych [21]

2.1.2. Walcowanie skośne trójwalcowe

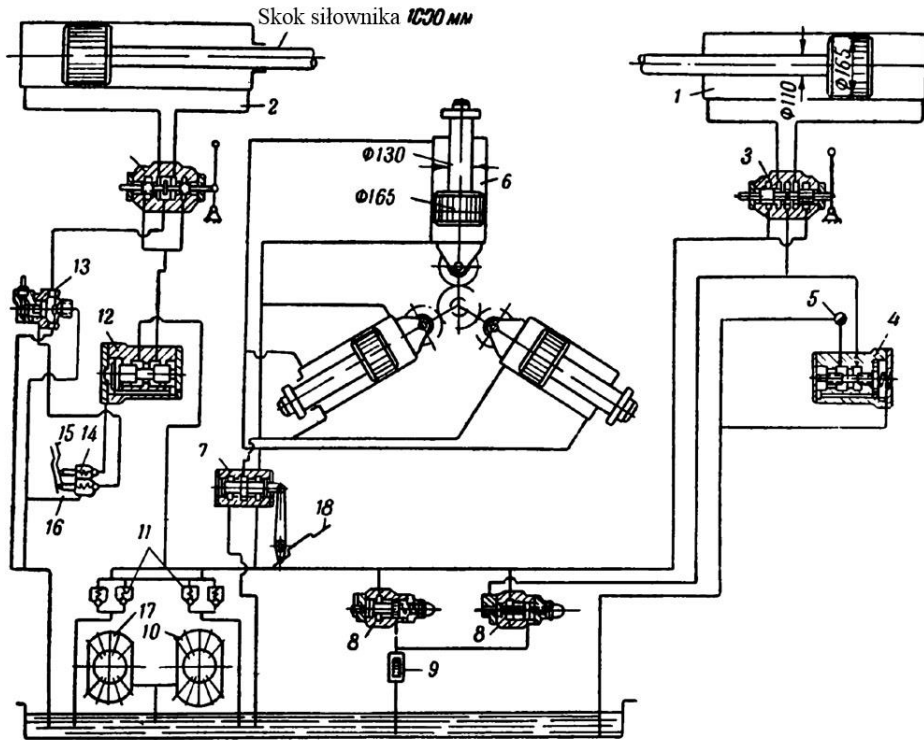
Walcowanie kuźnicze skośne za pomocą trzech rolek rozmieszczonych co 120° na obwodzie wsadu umożliwia kształtowanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych. Dodatkowo rolki ustawione są skośnie pod określonym kątem względem osi wsadu i obracają się z jednakową prędkością w tę samą stronę. Promieniowy posuw narzędzi roboczych poprzez symetryczne przybliżanie i odsuwanie od osi wsadu powoduje kształtowanie określonej średnicy wyrobu. W tym samym czasie materiał wyjściowy przemieszczany jest osiowo przez uchwyt, w którym mocowany jest koniec walcowanej odkuwki.

Próby doświadczalne walcowania skośnego trzema rolkami realizowano w przedsiębiorstwie Vniimetmash pod przewodnictwem A. I. Celikova. Schemat procesu kształtowania wyrobów osiowosymetrycznych przedstawiono na rysunku 2.22.



Rys. 2.22. Schemat walcowania skośnego trzema rolkami: a) stożkowymi z częścią walcową (typ I), b) stożkowymi (typ II); 1 – rolki kształtujące, 2 – wsad [65]

Realizację przesuwu promieniowego narzędzi kształtujących dokonano za pomocą siłowników hydraulicznych, których posuw zależny był od kopiału stanowiącego obwiednię wyrobu. Przesuw osiowy przedmiotu obrabianego wykonywany był przez kolejny siłownik hydrauliczny ze sterowalnym skokiem i prędkością posuwu. Powodował on również przesuw wzornika z zarysem odkuwki, co pozwalało na synchronizację pozycji wszystkich czterech siłowników. Przykładowy układ hydrauliczny do zasilania siłowników stosowany w przytoczonych walcarkach przedstawiono na rysunku 2.23.



Rys. 2.23. Schemat układu hydraulicznego walcarki skośnej trójrolkowej: 1, 2 – siłowniki osiowe, 3 – zawór suwakowy, 4 – regulator prędkości posuwu, 5 – zawór nastawny, 6 – siłowniki promieniowe, 7 – zawór śledzący kopiał, 8 – zawór bezpieczeństwa, 9 – filtr siatkowy, 10 – pompa, 11 – zawór zwrotny, 12 – reduktor ciśnienia, 13 – zawór, 14 – zawór regulujący, 15, 16 – kopiały do automatycznej regulacji siły naciągu odkuwki, 17 – pompa, 18 – kopiał [65]

Obrót rolek roboczych zapewniono wykorzystując wspólny silnik elektryczny, a następnie przekładnię mechaniczną oraz wały przegubowe łączące czoły napędowe z narzędziami roboczymi lub też poprzez zastosowanie indywidualnych silników do każdej rolki stożkowej wraz z obwodem sterującym zapewniającym synchronizację obrotów.

Walcowanie realizowano z wykorzystaniem dwóch rodzajów rolek stożkowych. Narzędzia robocze drugiego rodzaju (rys. 2.22b) umożliwiają kształtowanie wyrobów ze stopniem gniotu δ powyżej 1,5, rozszerzając gamę wytwarzanych wyrobów o minimalnych wymiarach walcowanych średnic odkuwek do 6 mm. Narzędzia te redukują również kilkukrotnie moment obrotowy i zmniejszają możliwość wystąpienia poślizgu pomiędzy rolkami a wsadem. Komplikują jednakże projektowanie części konstrukcyjnej służącej do przekazywania obrotów rolek wraz z ich ustawieniem skośnym oraz obwodu zasilającego, służącego do regulacji prędkości obrotowej narzędzi, która jest

wymagana do tego by liczba obrotów wsadu przy różnych stopniach gniotu była w przybliżeniu stała.

Drugi rodzaj rolek stożkowych (rys. 2.22a) stosowano do walcowania wsadów o redukcji przekroju poprzecznego charakteryzowanym stopniem gniotu δ mniejszym niż 1,5. Zastosowanie ich upraszcza konstrukcję klatki walcowniczej oraz obwód sterowania napędem elektrycznym, ale wymaga silników o zwiększonej mocy znamionowej. Rolki ograniczają proces do walcowania wyrobów o podobnych rozmiarach, głównie o znacznej długości bez dużych redukcji przekrojów poprzecznych kolejnych stopni odkuwki.

Rolki robocze charakteryzowane są przez kąt kształtujący α o wartości $\alpha = 20^\circ \div 30^\circ$ (przy stopniach gniotu 1,3). Część kalibracyjna narzędzi musi mieć długość spełniającą poniższą nierówność:

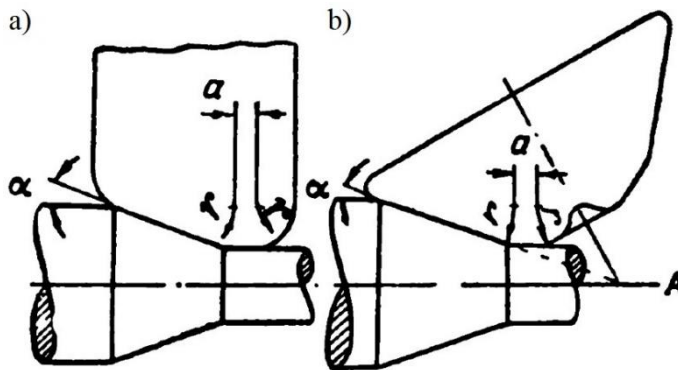
$$a > \frac{V}{3n}, \quad (1.1)$$

gdzie:

a – długość odcinka kalibracyjnego [mm],

n – liczba obrotów walcowanego wyrobu na sekundę [1/s],

V – prędkość osiowa przemieszczania wsadu [mm/s].

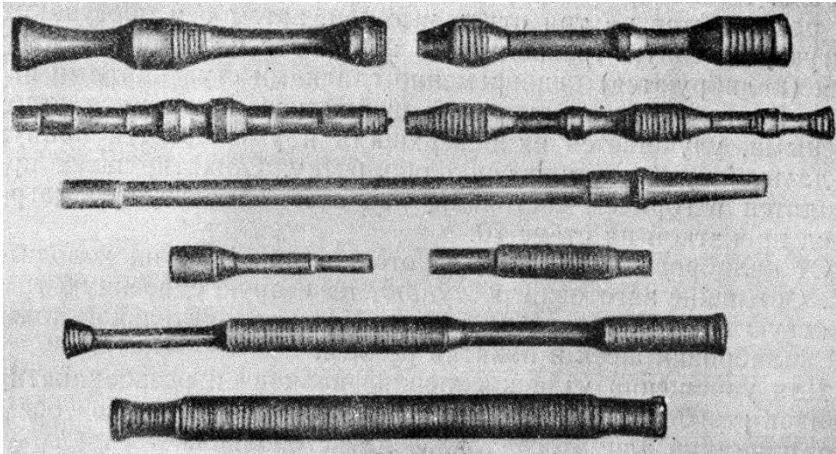


Rys. 2.24. Parametry geometryczne rolek: a) stożkowych z częścią walcową (typ I),
b) stożkowych (typ II) [65]

W innym przypadku na powierzchni walcowanego wyrobu może powstawać rowek nawinięty na jego obwodzie. Zalecane promienie zaokrągleń r rolek nie powinny być mniejsze niż 4–6 mm. Ponadto rolki robocze powinny mieć możliwość regulacji kąta zukosowania do osi walcowania w zakresie $0^\circ \div 10^\circ$.

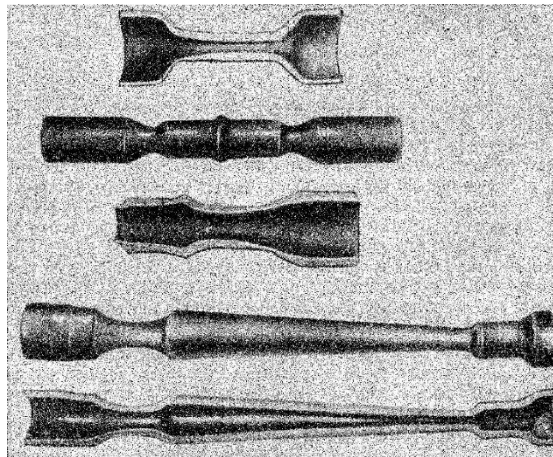
Walcowanie skośne za pomocą trzech rolek stożkowych umożliwia kształtowanie odkuwek o różnych kształtach oraz zmiennych redukcjach średnic wzdłuż ich długości przy pomocy uniwersalnego zestawu narzędzi roboczych. Walcowane wyroby w przedsiębiorstwie Vniimetmash to odkuwki, takie jak: półosie samochodowe, wałki skrzyni biegów, wały silników elektrycznych, ale również przedkuwki, w tym korbowodów z przeznaczeniem do dalszych

procesów kucia, w celu uzyskania wyrobów o nieokrągłym przekroju poprzecznym (rys. 2.25).



Rys. 2.25. Wyroby pełne uzyskane w walcierce skośnej z trzema rolkami stożkowymi [65]

Walcowano także części drążone, korzystając z rur stalowych, które stanowiły materiał wsadowy. Dla obu rodzajów kształtowanych elementów, wsad do walcowania skośnego musiał mieć średnicę, która nie mogła być mniejsza od średnicy maksymalnej gotowego wyrobu (rys. 2.26).



Rys. 2.26. Wyroby drążone uzyskane w walcierce skośnej z trzema rolkami stożkowymi [65]

Tolerancja współosiowości odkuwek walcowanych omawianą metodą wynosi 0,5%. Przykładowo dla walcowanej półosi montowanej w samochodzie marki Moskwicz wartość ta jest równa 0,4–0,5 mm, podczas gdy po procesie kucia

wynosi 3–4 mm. Odchylenie wymiarów odwalcowanych wyrobów na średnicy wynosi 1%. Pozwala to na zmniejszenie dodatkowych operacji wykańczających.

Omawiany proces w porównaniu do walcowania wzdłużnego długich wyrobów, charakteryzuje się brakiem występowania zawalcowań, wysoką jakością wymiarową oraz osiowością odkuwek. Ponadto podczas walcowania skośnego reorganizacja pracy walcarki dla zmiany kształtowanego wyrobu następuje znacznie szybciej, ponieważ zazwyczaj nie wymagana jest wymiana rolek roboczych a jedynie profilu z zarysem kształtu walcowanej odkuwki. Dodatkowo proces walcowania skośnego zapewnia uzyskiwanie wyrobów o zmiennych redukcjach przekrojów poprzecznych poprzez zastosowanie nieskomplikowanych geometrycznie narzędzi kształtujących.

Metoda walcowania skośnego wykazuje techniczne oraz ekonomiczne aspekty umożliwiające konkurowanie ze stosowanymi technologiami wytwarzania. Stosowanie tego procesu do kształtowania wyrobów osiowosymetrycznych o zmiennych przekrojach poprzecznych do różnych obszarów przemysłu, w tym motoryzacyjnego, maszyn transportowych i elektrycznych doprowadziłoby do poprawy technologii produkcyjnej. Zastosowaniem mogłyby być wyroby o stosunkowo dużych długościach i małych średnicach. Prezentowano przykład wytwarzania półosi do samochodów, m. in. Moskwicz oraz ZIM, które dotychczasowo kształtowano poprzez kucie na prasach bądź młotach wymagających stosowania dużych sił nacisku. Walcowanie skośne zapewniałoby poprawienie jakości oraz zmniejszenie zużycia materiału przy produkcji tych części. Ponadto wykluczone zostałyby dodatkowe procesy, jak przygotowanie przedkuwki, niezbędnej do procesu kucia, która wymagała ponownego dogrzewania przed końcowym kształtowaniem, jak również okrawania wykonanej odkuwki [65].

2.2. Przegląd w zakresie konstrukcji walcarek kuźniczych

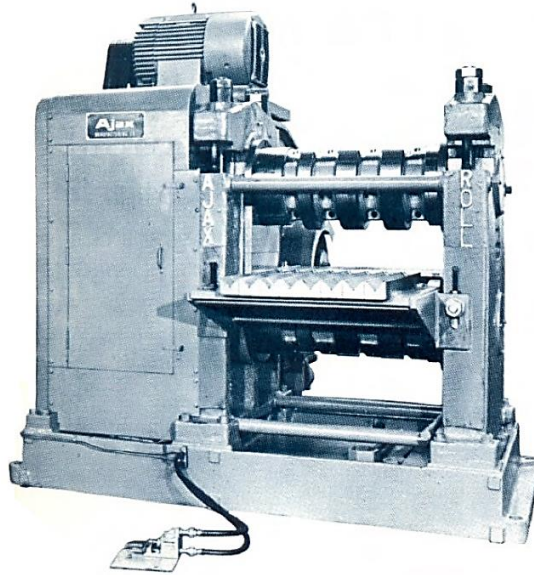
2.2.1. Walcarki kuźnicze wzdłużne

Najliczniejszą grupę maszyn o obrotowym ruchu narzędzi stanowią kuźnicze walcarki wzdłużne mające zastosowanie głównie w produkcji przedkuwek oraz odkuwek. Podziału tych maszyn można dokonać pod względem konstrukcyjnym, a w szczególności ze względu na sposób podparcia walców głównych. Wyróżnić można cztery rodzaje walcarek:

- ramowe,
- konsolowe,
- ramowo-konsolowe,
- wieloklatkowe automaty walcownicze.

Walcarki kuźnicze ramowe posiadają zwartą konstrukcję klatki roboczej składającej się z dwóch stojaków umieszczonych po obu stronach beczki walca. Stojaki budowane są w postaci jednolitej, sztywnej ramy (tzw. zamknięte) bądź

z dwóch części, tj. podstawy z łapami do mocowania do płyt fundamentowanych i pokrywy, łączonej za pomocą śrub do podstawy. Stojaki otwarte cechują się łatwiejszym dostępem do walców podczas ich wymiany, jednakże mają mniejszą sztywność niż zamknięte. Przykładem takiej konstrukcji jest walcarka ramowa wyprodukowana przez firmę The Ajax Manufacturing Co., zaprezentowana na rysunku 2.27.



Rys. 2.27. Walcarka ramowa wyprodukowana przez The Ajax Manufacturing Co. [74]

Stojaki ze zdejmowalną pokrywą stosowane są w produkcji, gdzie nie jest wymagana duża dokładność wykonywanych wyrobów. Każda klatka robocza walcarki ramowej posiada dwustronne podparcie wałów, na których mocowane są narzędzia, zwiększając ich sztywność i tym samym pozwalając na ich wydłużenie. Umożliwia to zwiększenie liczby wykrojów kształtujących wyroby z możliwością stosowania dużych stopni gniotu podczas walcowania [75, 78, 85].

Kolejnym przykładem jest walcarka kuźnicza RCW oferowana przez przedsiębiorstwo LASCO Umformtechnik GmbH, którą zaprezentowano na rysunku 2.28. Posiada ona korpus zbudowany z cienkościennych profili konstrukcyjnych, którego sztywność została uzyskana poprzez wstępne sprężenie za pomocą stalowych ściągaczy. Wały łożyskowane są obustronnie w dwóch stojakach, które wyposażono w dwa układy napędowe w postaci silników prądu stałego synchronizujące prędkości obrotowe górnego i dolnego walca. Parametry techniczne trzech wybranych walcarek kuźniczych Lasco RCW zaprezentowano w tabeli 2.1.



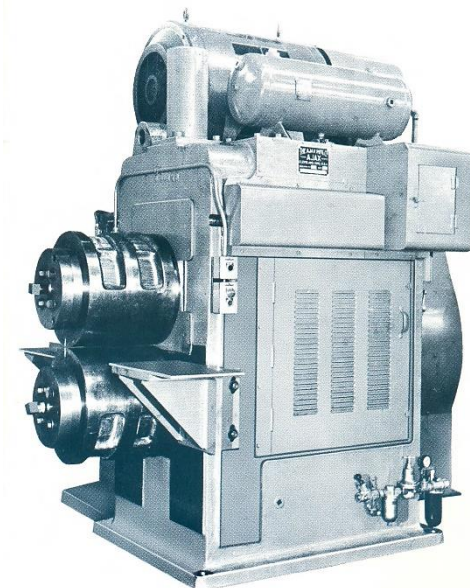
Rys. 2.28. Walcarka ramowa Lasco RCW wraz z manipulatorem przemysłowym [93]

Tabela 2.1. Parametry techniczne walcarek kuźniczych Lasco RCW [18]

Walcarka serii RCW		460	560	930
Średnica walców	[mm]	460	560	930
Długość walców	[mm]	560	700	1120
Maks. średnica wsadu	[mm]	63	80	125
Maks. długość wsadu	[mm]	315	400	630
Zakres regulacji walców	[mm]	20	25	30
Moc znamionowa silnika	[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

Walcarki konsolowe charakteryzują się mniejszą sztywnością niż walcarki ramowe. Posiadają wyłącznie jednostronne łożyskowanie wałów, na których czopach (znajdujących się na zewnętrznym boku walcarki) montowane są narzędzia (rys. 2.29). Średnica segmentów roboczych wynosi od 200 mm

do 500 mm, a ich zakres wymiarowy jest znacznie mniejszy niż w walcarkach ramowych, w których walce segmentowe konstruowane są o średnicach w zakresie od 200 mm do 900 mm.



Rys. 2.29. Walcarka konsolowa wyprodukowana przez The Ajax Manufacturing Co. [74]

Walcarki konsolowe umożliwiają kształtowanie wyrobów przy stosowaniu mniejszych, jednorazowych gniotów niż w walcarkach ramowych. Ze względu na otwartą przestrzeń roboczą, walcarki te cechuje łatwiejszy dostęp do prac konserwacyjnych, w tym do wymiany segmentów roboczych.

Kolejnym rodzajem są walcarki ramowo-konsolowe posiadające walce kombinowane. Szeroko stosowane w kuźniach matrycowych do walcowania odkuwek lub w operacjach pośrednich do kształtowania przedkuwek. Łączą one ze sobą walce normalne, dwustronnie łożyskowane, umieszczone w układzie ramowym pomiędzy stojakami oraz walce wysięgowe umieszczone po zewnętrznej stronie korpusu (rys. 2.30).



Rys. 2.30. Walcarka ramowo-konsolowa Lasco RCW wraz z manipulatorem przemysłowym [19]

Wielokłatkowe automaty walcownicze posiadają oddzielne klatki walcownicze z wyodrębnionym wykojeniem dla każdej z nich. W zależności od ich ustawień, wyróżnia się automaty liniowe, w których materiał przemieszczany jest w linii prostej pomiędzy klatkami walcowniczymi oraz promieniowe, gdzie materiał prowadzony jest do poszczególnych przepustów po okręgu [75, 78].

2.2.2. Walcarki kuźnicze poprzeczne

Walcarki poprzeczno-klinowe umożliwiają kształtowanie wyrobów osiowosymetrycznych w wyniku oddziaływania narzędzi w kształcie klinów. Wykorzystywane są w tym celu dwie grupy narzędzi. Pierwsze z nich to walce z nawiniętymi na ich obwodzie klinami, wykonującymi ruch obrotowy w tym samym kierunku i z tą samą prędkością, umożliwiając w ten sposób kształtowanie wyrobu. Druga grupa to zestaw narzędzi płaskich w postaci płyt klinowych, przemieszczanych ruchem postępowym w przeciwnych kierunkach. W zależności od konstrukcji walcarki, segmenty klinowe montowane są w położeniu poziomym lub pionowym.

Dwuwalcowa walcarka poprzeczno-klinowa zaprezentowana na rysunku 2.31, oferowana jest przez przedsiębiorstwo LASCO Umformtechnik GmbH. Konstrukcja wykonana jest z cienkościennych profili, które połączone są spawami. W celu nadania odpowiedniej sztywności dokonuje się wstępnego sprężenia konstrukcji za pomocą specjalnych ściązaczy.



Rys. 2.31. Walcarka poprzeczno-klinowa Lasco QKW [19]

Regulacja prędkości obrotowej odbywa się indywidualnie dla każdego silnika elektrycznego prądu stałego z wykorzystaniem pętli sprzężenia zwrotnego dla pomiaru kąta położenia każdego z wałów za pomocą enkoderów. Rozstaw wałców jest regulowany wraz z ciągłym jego pomiarem i automatyczną kompensacją podczas procesu walcowania. System mocowania narzędzi następuje poprzez siłowniki hydrauliczne umieszczone w czopach wałów, które osiowo zaciskają walce pomiędzy dwiema tarczami z krzyżowymi występami pod wpusty do precyzyjnego ich ułożenia. Do wymiany narzędzi stosowany jest zintegrowany podnośnik zamontowany na korpusie walcarki. Ponadto, wspomniany układ siłowników kompensuje zmiany długości wałców podczas ich nagrzewania oraz chłodzenia w trakcie procesu. Temperatura wałców może być dodatkowo regulowana poprzez zastosowanie zamkniętego układu obiegu oleju bądź wewnętrzne grzałki elektryczne. Nagrzewane wsady wyjściowe podawane są poprzez przenośnik łańcuchowy, na którym znajduje się obszar kontrolny, w którym dokonywany jest pomiar temperatury materiału. Umieszczanie wsadu w kotlinie walcowniczej odbywa się w wyniku jego przesuwu tłocznikiem siłownika elektromechanicznego. Materiał wyjściowy podczas walcowania utrzymywany jest w odpowiedniej pozycji pomiędzy narzędziami klinowymi przez dwie prowadnice. Wyposażone są one w zestaw czujników do pomiarów ewentualnych przeciążeń podczas procesu wraz z możliwością wysunięcia wsadu, zabezpieczając maszynę przed uszkodzeniem [18, 19, 75]. Parametry techniczne walcarek, typu QKW zaprezentowano w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Parametry techniczne walcarek kuźniczych Lasco QKW [18]

Walcarka serii QKW		500	700	1000
Średnica walców	[mm]	500	700	1000
Długość walców	[mm]	500	700	1000
Maks. średnica wsadu	[mm]	50	70	110
Maks. długość wsadu	[mm]	300	400	560
Zakres regulacji walców	[mm]	40	60	80
Moc znamionowa silnika	[kW]	22	55	90
Długość walcarki	[mm]	3000	5500	6200
Wysokość walcarki	[mm]	2000	3300	4700
Szerokość walcarki	[mm]	1500	2400	3600
Masa walcarki	[kg]	15000	25000	50000

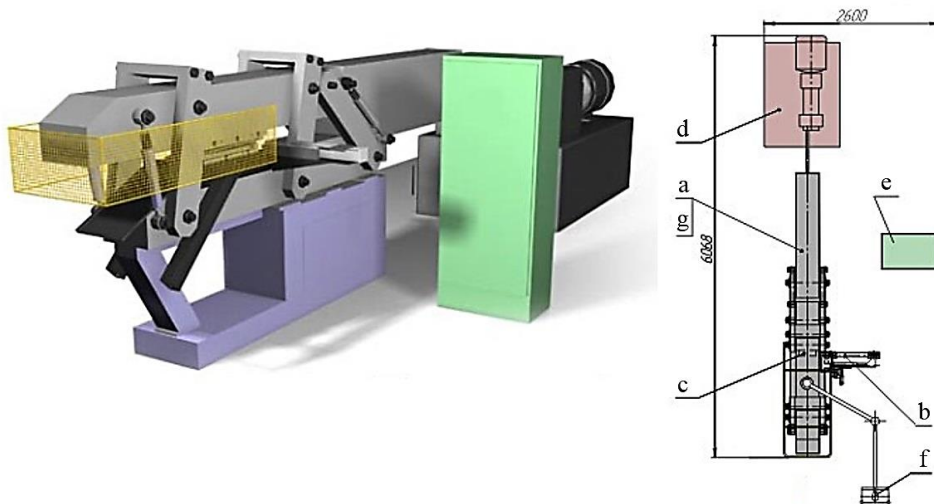
Dwuwałcowa walcarka, jednakże z odmiennym rozwiązaniem konstrukcyjnym korpusu, wykonana została przez przedsiębiorstwo Zibo Hong Jie Automation Equipment Co. Ltd, (rys. 2.32). Wały robocze łożyskowane dwustronnie umieszczono w ramie zbudowanej z płyt stalowych, połączonych ze sobą słupami. Ruch obrotowy walców klinowych realizowany jest przez silnik elektryczny sprzężony z przekładniami pasową i zębatą. Regulacja rozstawu ich położenia jest dokonywana za pomocą silników umieszczonych w górnej części korpusu. Zastosowanie dodatkowych układów elektronicznych pozwala również na zmianę prędkości obrotowej narzędzi roboczych. Oferowane walcarki umożliwiają kształtowanie wsadów o wymiarach poprzecznych w zakresie od Ø32 mm do Ø150 mm. W zależności o typu walcarki możliwy jest montaż walców o nominalnej średnicy od 320 mm (typ D46-300) do 1400 mm (typ D46-1400) [75, 90].



Rys. 2.32. Walcarka poprzeczno-klinowa Zibo Hong Jie Automation Equipment Co. Ltd [90]

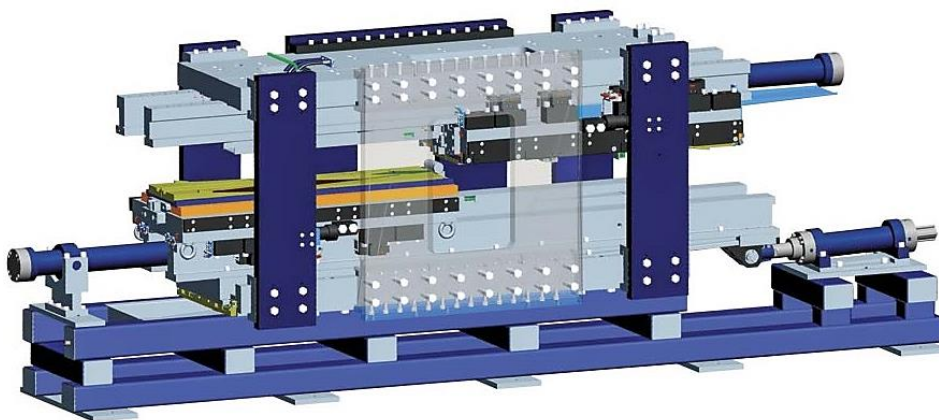
Walcarki płaskoklinowe charakteryzują się prostszą konstrukcją narzędzi w postaci płaskich płyt klinowych oraz niższymi kosztami ich produkcji w stosunku do walców klinowych. Ponadto, wyeliminowane są tu dodatkowe prowadnice utrzymujące kształtowany wsad pomiędzy narzędziami. Wadami tych walcarek są znacznie większe ich wymiary zewnętrzne, na co ma również wpływ gabaryt płyt klinowych oraz występowanie ruchu jałowego narzędzi po każdym odwalcowanym wyrobie.

Przykładem walcarki płaskoklinowej jest zaprezentowany na rysunku 2.33, typ SP1250-1, oferowany przez białoruskie przedsiębiorstwo Beltehnologia & M JSC. Korpusy górny i dolny połączone zostały za pomocą słupów i łączników. Narzędzie górne połączone jest przegubowo z tłoczyskiem siłownika hydraulicznego, za pomocą którego wprawiane jest w ruch postępowo zwrotny po prowadnicach, których konstrukcja zapewnia odpowiednią sztywność oraz zabezpiecza części trące przed zgorzeliną. Dolne narzędzie klinowe jest nieruchome i przymocowane do dolnej części korpusu. Walcarki umożliwiają kształtowanie wyrobów osiowosymetrycznych o średnicach w zakresie od 12 mm do 150 mm o maksymalnej ich długości do 800 mm [89].



Rys. 2.33. Walcarka płaskoklinowa SP-1250-1: a) walcarka poprzeczno-klinowa, b) mechanizm podawania wsadu, c) napęd pneumatyczny, d) napęd hydrauliczny, e) szafa sterownicza, f) pulpit sterowniczy, g) zestaw ustawiania narzędzi [89]

Walcarka płaskoklinowa o odmienniej kinematyce ruchu narzędzi, w której oba segmenty narzędziowe przemieszczają się przeciwnie względem siebie oferowana jest przez przedsiębiorstwo AMTEngineering Ltd (rys. 2.34).

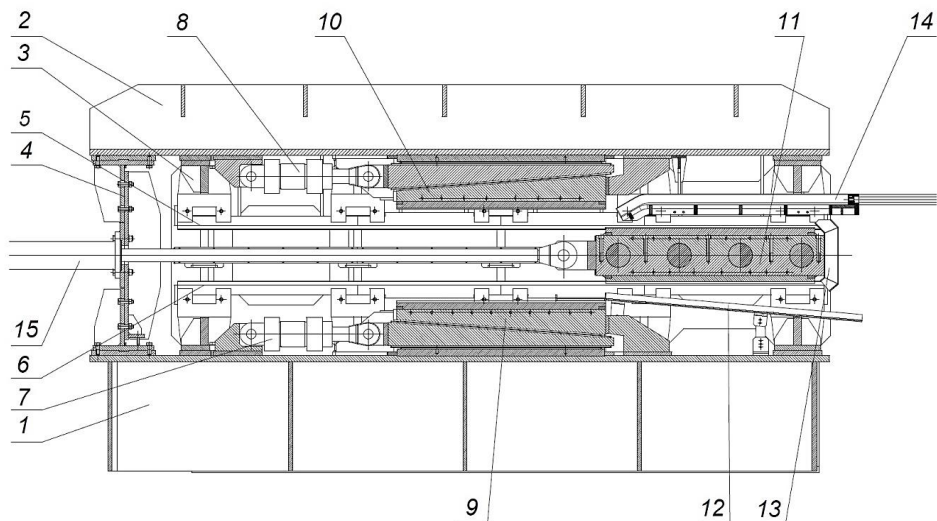


Rys. 2.34. Walcarka płaskoklinowa WRL TS [88]

Dolna część korpusu wykonana została z cienkościennych profili konstrukcyjnych, która wraz z górną połączona została płytami poprzez skręcanie, tworząc sztywną ramę. Narzędzia klinowe zamontowano na płytach pośrednich łączących się z torami jezdnymi poprzez łożyska toczne minimalizujące siły tarcia oraz luzu podczas nagrzewania narzędzi w trakcie walcowania. Dwa główne

siłowniki odpowiadają za wprawienie w ruch postępowo-zwrotny narzędzi a dodatkowy trzeci, zamocowany w dolnej części korpusu służy do regulacji ich rozstawu. Walcarki typu WRL TS umożliwiają kształtowanie wsadów o maksymalnej średnicy 100 mm z wykorzystaniem narzędzi o długości 2500 mm [17, 88].

Walcarka płaskoklinowa eliminująca ruch jałowy narzędzi przy powrocie do pozycji wyjściowej skonstruowana została w Politechnice Lubelskiej (rys. 2.35) [53].

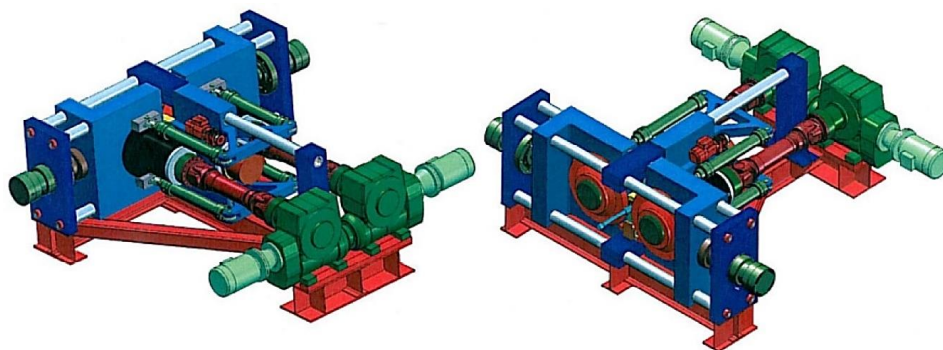


Rys. 2.35. Schemat walcarki płaskoklinowej-nawrotnej: 1) korpus dolny, 2) korpus górny, 3) rama łącząca, 4) wspornik siłownika, 5, 6) tory jezdne, 7, 8) siłowniki ustawcze, 9) dolny zestaw narzędziowy, 10) górny zestaw narzędziowy, 11) suwak, 12) rynna, 13) prowadnica pośrodkowa, 14) podajnik wsadów, 15) siłownik główny [53]

Przeznaczona jest do walcowania odkuwek kul z główek złomowanych szyn [44]. Składa się korpusów dolnego i górnego, które połączono za pomocą ramy łączącej składającej się z płyt wspornikowych. Narzędzia stałe zamontowano w dolnej podstawie oraz w górnej uźebrowanej części walcarki. Pomiedzy nimi znajduje się suwak, do którego części czołowej połączono główny siłownik hydrauliczny. Przeszczany jest on na czterech parach rolek oporowych po torach jezdnych osadzonych w ramie łączącej. Po obu stronach suwaka, tj. górnej i dolnej przymocowano również narzędzia. Tym samym wyrób kształtowany jest wstępnie w górnym zestawie płyt płaskolinowych i następnie samoczynnie przemieszczany jest do dolnych narzędzi, gdzie następuje walcowanie przy ruchu powrotnym suwaka. Rozstaw zarówno dolnych jak i górnych narzędzi realizowany jest przez dwa siłowniki z zamontowanymi, przesuwными płytami klinowymi. Zakres ich regulacji to 8 mm, przy czym odległość między płytami narzędziowymi wynosi 130 mm. Omawiana walcarka charakteryzuje się

maksymalną siłą pchającą suwak równą 280 kN i siłą ciągnącą o wartości 180 kN. Największa możliwa długość narzędzi płaskoklinowych używanych do procesów walcowania wynosi 1250 mm a szerokość 410 mm.

Walcarkę poprzeczną wykorzystującą ruch obrotowy narzędzi, jednakże bez klinowych występów na ich obwodzie przedstawiono na rysunku 2.36. Wykonana ona została przez Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology Chemnitz IWU we współpracy z LASCO Umformtechnik GmbH.



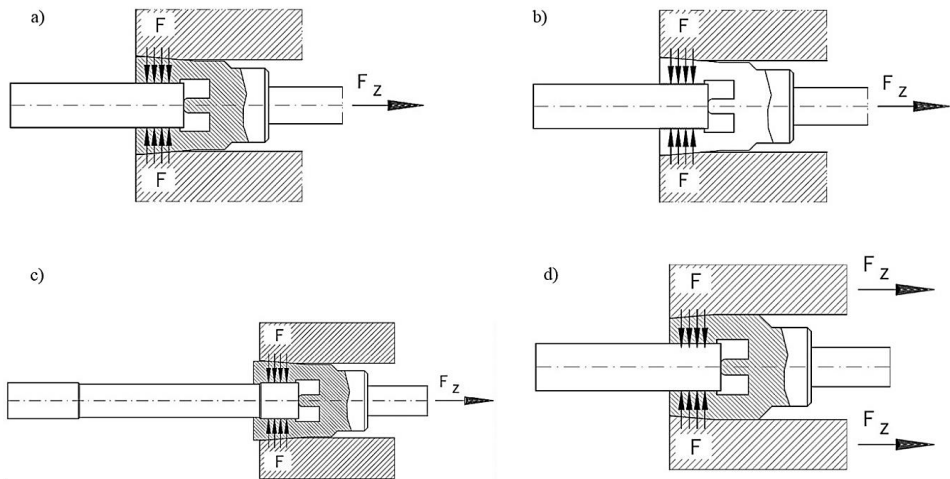
Rys. 2.36. Walcarka poprzeczna z osiowym przemieszczaniem wsadu [27]

Kształtowanie wyrobów odbywa się za pomocą dwóch rolek stożkowych, które przemieszczane są w kierunku osi wyrobu za pomocą siłowników hydraulicznych połączonych przewodami sztywnymi z układem zasilającym. Rolki obracające się w tym samym kierunku i z tą samą prędkością napędzane są dwoma, niezależnymi silnikami elektrycznymi, trójfazowymi posiadającymi możliwość regulacji obrotów za pomocą przemiennika częstotliwości. Układy napędowe połączone za pomocą przekładni kątowych oraz wałów przegubowych. Osiowe przemieszczanie wsadu odbywa się za pomocą siłowników servo-hydraulicznych przymocowanych za pomocą wspornika do części uchwyty oraz do płyty czołowej walcarki. Takie rozwiązanie spowodowało minimalizację przewodów pomiędzy podzespołami oraz zmniejszenie wymiarów agregatu hydraulicznego. Przeszczanie korpusów z umieszczonymi w nich rolkami roboczymi oraz uchwyty odbywa się na słupach prowadzących. Posuwy osiowe oraz promieniowe poszczególnych siłowników wraz z ich prędkościami uzależnione są od założonej geometrii kształtowanego wyrobu. Sterowane są za pomocą wydajnego sterownika PLC z rozszerzeniami dla kontroli poszczególnych osi [8, 27, 63]. Wybrane parametry techniczne omawianej walcarki przedstawiono w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Parametry techniczne walcarki AVQ (niem. Axial Vorschub Querwalzen) [27]

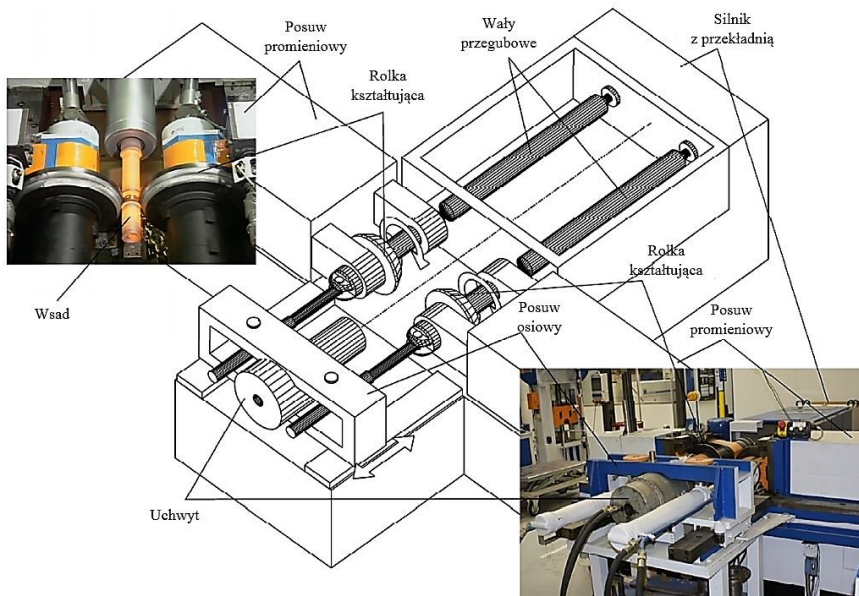
Walcarka AVQ 630			
Średnica wsadu	[mm]	30 ÷ 60	
Prędkość obwodowa rolek	[mm/s]	300 ÷ 1000	
Prędkość promieniowa	[mm/s]	maks. 50	
Prędkość osiowa	[mm/s]	maks. 50	
Maks. moment obrotowy	[kNm]	7,7	
Maks. prędkość obrotowa	[obr/min]	21,2 (dla rolek Ø 630 mm)	
Maks. siły działające na rolkę	[kN]	styczna	24,4
		osiowa	175
		promieniowa	330
Długość mocowania wsadu		maks. średnica wsadu	
Regulacja położenia wsadu pomiędzy rolkami		mechaniczna	

Mocowanie wsadu w uchwycie na etapie prac prototypowych walcarki realizowano dla różnych koncepcji konstrukcyjnych. Materiał wyjściowy umieszczano w tulei zaciskowej dociśniętej przez siłownik hydrauliczny (rys. 2.37a), jednakże w trakcie procesu powoli wysuwał się z mocowania, czego konsekwencją była konieczność wykonywania większej ilości przejść podczas walcowania w celu uzyskania pożądanej średnicy wyrobu. W celu uzyskania większego gniotu zastosowano tuleję z zaciskami, na których nacięto rowki (2.37b) nadające chropowatość na ich powierzchni, co pozwoliło utrzymać materiał podczas walcowania, jednakże miało to negatywny wpływ na powierzchnię zewnętrzną wsadu. Kolejną z alternatywnych metod mocowania było wykonanie podtoczenia na wsadzie (rys. 2.37c) co pozwoliło zaciskom z podebraniem utrzymać materiał w tulei zaciskowej. Jednym z następnych rozwiązań konstrukcyjnych była zmiana pochyłeń w korpusie uchwytu (rys. 2.37d) oraz jego bezpośrednie przemieszczanie, a nie w wyniku posuwu tulei zaciskowej, jak to przedstawiono w trzech pierwszych przypadkach.



Rys. 2.37. Mocowanie wsadu materiałowego w uchwycie walcarki [27]

Prace koncepcyjne wraz z rozwiązaniem technicznym walcarki poprzecznej z osiowym przemieszczaniem wsadu (AVQ) zaprezentował również Uniwersytet Techniczny w Dreźnie (rys. 2.38). Wykonane zostało wyłącznie stanowisko badawcze wyposażone w czujniki sił i momentu obrotowego, lecz nie podjęto dalszych prac konstruktorskich nad przygotowaniem wersji produkcyjnej maszyny [5, 9, 12, 27].



Rys. 2.38. Stanowisko badawcze do walcowania poprzecznego z osiowym przemieszczaniem wsadu [9]

Obrót rolek kształtujących realizowany jest przez układ napędowy składający się z wałów przegubowych Cardana, przekładni mechanicznej połączonej z silnikiem elektrycznym. Układ hydrauliczny stanowiska zasilany jest przez zewnętrzny zasilacz, umożliwiający przesuw promieniowy rolek w wyniku działania siłowników bocznych oraz osiowy uchwytu poprzez zsynchronizowane przemieszczanie dwóch siłowników hydraulicznych. Ponadto zasilanie hydrauliczne wykorzystywane jest w uchwycie do zaciskania w nim wsadu. Walcowanie realizowane jest poniżej osi narzędzi i dodatkowo zastosowana jest rolka podtrzymująca kształtowany wyrób. Walcarka umożliwia kształtowanie stopniowanych wałów o średnicach w zakresie od 20 mm do 80 mm i długościach do 600 mm.

2.2.3. Walcarki kuźnicze skośne

Kształtowanie osiowosymetrycznych wyrobów realizowane jest również w walcarkach o skośnym ułożeniu osi dwóch bądź trzech walców. Wsad w trakcie walcowania obraca się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu narzędzi i wykonuje jednocześnie ruch postępowy wymuszony skośnym ustawieniem walców.

Walcarki skośne o dwóch walcach posiadają wykroje utworzone przez klinowe występy na ich powierzchni, tworzące linię śrubową. Podczas kształtowania materiału wyjściowego utrzymywanie go w kotlinie walcowniczej odbywa się za pomocą dwóch prowadnic z możliwością regulacji ich położenia. Skomplikowany kształt narzędzi jest niewątpliwie główną wadą walcowania skośnego. Zaletą walcowania skośnego jest jednak duża wydajność procesu, gdzie podczas jednego obrotu walców zostaje ukształtowana, co najmniej jedna odkuwka. Dodatkowo stosowany wsad w postaci pręta jest wielokrotnie dłuższy niż otrzymywane po walcowaniu poszczególne wyroby. Konstruowane walcarki skośne dwuwalcowe służą głównie do walcowania kul [10, 32, 42, 79] lub drobnych elementów osiowosymetrycznych [3, 52, 80].

Przedsiębiorstwo rosyjskie Vniimetmash zajmuje się produkcją seryjną walcarek o skośnym ułożeniu dwóch walców, służących do kształtowania kul stalowych oraz krótkich wyrobów osiowosymetrycznych (rys. 2.39).



Rys. 2.39. Kuźnicza walcarka skośna Vniimetmash SHPS (ros. *IIIIC*) [95]

Klatkę walcowniczą zbudowano w postaci korpusu otwartego z płyt usztywnionych za pomocą słupów, pomiędzy którymi umieszczono narzędzia. Regulacji kąta pochylenia walców dokonuje się poprzez układ kół zębatach oraz silników elektrycznych. Dodatkowo istnieje możliwość ustawiania odległości pomiędzy walcami w płaszczyźnie poziomej w zależności od średnicy kształtowanych odkuwek. Do utrzymywania wsadu pomiędzy narzędziami podczas walcowania również stosowane są prowadnice o mechanicznym regulowaniu ich położenia. Obrót walców realizowany jest przez układ napędowy składający się z wałów przegubowych, przekładni redukcyjnej oraz silnika elektrycznego. Walcarka stanowi jedną z części całej linii technologicznej do produkcji kul stalowych. W jej skład wchodzi również piece lub nagrzewnice indukcyjne do nagrzewania wsadów do temperatury w zakresie 1050–1100 °C, które dalej umieszczane są w przestrzeni roboczej walcarki za pomocą popychacza. Uzyskane kule stalowe po walcowaniu, za pomocą przenośników dostarczane są do zbiorników wypełnionych wodą, co umożliwia ich zahartowanie. Ostatnimi elementami linii technologicznej są kontenery, w których magazynowe są odkuwki kul stalowych, gdzie ostatecznie następuje całkowite ich wystudzenie [75, 95]. W tabeli 2.4 przedstawiono parametry techniczne czterech walcarek skośnych oferowanych przez Vniimetmash.

Tabela 2.4. Parametry techniczne walcarek Vniimetmash SHPS [95]

Walcarka serii SHPS		20-40	20-60	40-100	60-120
Średnica walcowanej kuli	[mm]	16 ÷ 40	20 ÷ 60	40 ÷ 100	60 ÷ 120
Długość prętów (wsadów)	[m]	2,5 ÷ 3,0	3,5 ÷ 5,0	4,0 ÷ 6,0	4,0 ÷ 6,0
Temperatura walcowania	[°C]	950 ÷ 1050	950 ÷ 1050	950 ÷ 1050	950 ÷ 1050
Średnica walców	[mm]	240	350	560	690
Moc znamionowa silnika	[kW]	90	200	630	900
Zakres średnic walcowanych odkuwek	[mm]	18 – 120			
Wymiary walcarki	[m]	1,5 x 3,7	2,7 x 15,5	4,0 x 21	5,4 x 25
Maksymalna wydajność procesu walcowania kul	[szt./ min]	Ø16 mm – 880 Ø20 mm – 800 Ø25 mm – 600 Ø30 mm – 350 Ø35 mm – 180 Ø40 mm – 155	Ø20 mm – 880 Ø25 mm – 800 Ø30 mm – 600 Ø35 mm – 350 Ø40 mm – 340 Ø50 mm – 155 Ø60 mm – 120	Ø40 mm – 400 Ø50 mm – 270 Ø60 mm – 170 Ø70 mm – 90 Ø80 mm – 85 Ø90 mm – 80 Ø100 mm – 75	Ø60 mm – 270 Ø70 mm – 180 Ø80 mm – 180 Ø90 mm – 90 Ø100 mm – 80 Ø110 mm – 70 Ø120 mm – 60

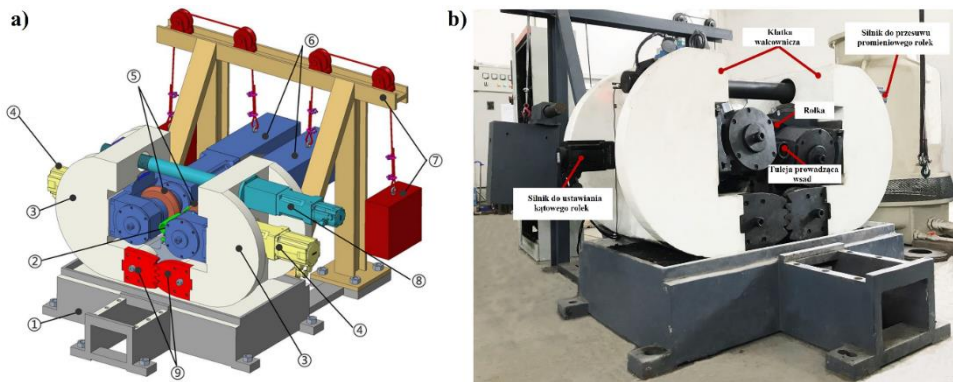
Kolejny przykład kuźniczej walcarki skośnej przedstawiono na rysunku 2.40. Została ona zaprojektowana oraz wykonana w Politechnice Lubelskiej [50]. Wykorzystywana jest do prowadzenia prac badawczych w zakresie walcowania skośnego kul stalowych, w tym ze złomowanych główek szyn oraz do wytwarzania krótkich odkuwek osiowosymetrycznych [3, 10, 32, 52, 79, 80].



Rys. 2.40. Walcarka skośna skonstruowana w Politechnice Lubelskiej

Układ napędowy składający się z silnika elektrycznego, dwubiegunowego zwiększającego wydajność walcowania w przypadku kształtowania drobnych wyrobów połączono z przekładnią zębatą za pomocą przekładni pasowej. Przeniesienie momentu obrotowego na walce robocze odbywa się poprzez wały przegubowe połączone z czopami napędowymi przekładni. W zależności od ustawień prędkość obrotowa narzędzi roboczych wynosi 15 obr/min lub 30 obr/min. Płytkowa konstrukcja klatki walcowniczej umożliwia montaż walców o nominalnej ich średnicy równej 320 mm oraz długości roboczej beczki wynoszącej 400 mm, jak również dwóch prowadnic utrzymujących wsad podczas walcowania w przestrzeni roboczej maszyny. Mechaniczna regulacja kąta zukosowania narzędzi daje możliwość ich ustawienia w zakresie $\pm 12^\circ$. Walcarkę wyposażono w aparaturę pomiarową w postaci czujnika momentu obrotowego o maksymalnym zakresie do 20 kNm oraz dwóch czujników tensometrycznych o zakresach do 50 kN służących do pomiarów sił nacisku działających na narzędzia podczas walcowania.

Następny przykład walcarki skośnej opracowany przez chińskich naukowców z Uniwersytetu Nauki i Technologii (Pekin) o parametrach technicznych opisanych w tabeli 2.5 zaprezentowano na rysunku 2.41. Narzędzia robocze wykonano w kształcie rolek stożkowych, charakteryzujących się trzema strefami, w tym wejściową o zadanym kącie kształtującym α , kalibrującą o długości a oraz wyjściowej. Cechują się znacznie prostszą geometrią kształtu niż walce o wykrojach śrubowych stosowanych do walcowania kul lub krótkich wyrobów osiowosymetrycznych. Omawiana walcarka w porównaniu do poprzednio opisywanych urządzeń nie posiada dwóch prowadnic utrzymujących materiał wsadowy w kotlinie walcowniczej. Zastosowano w niej dwie tuleje prowadzące umieszczone w osi walcowania po obu stronach narzędzi.



Rys. 2.41. Uniwersalna walcarka skośna: a) model przestrzenny walcarki (1 – rama, 2 – tuleja prowadząca wsad, 3 – klatka walcownicza, 4 – zespół ustawiania kątownego rolek, 5 – narzędzia robocze, 6 – zespół napędów, 7 – układy balansujące, 8 – zespół przesuwu promieniowego rolek, 9 – zespół synchronizacji ustawienia promieniowego), b) stanowisko laboratoryjne [21, 98]

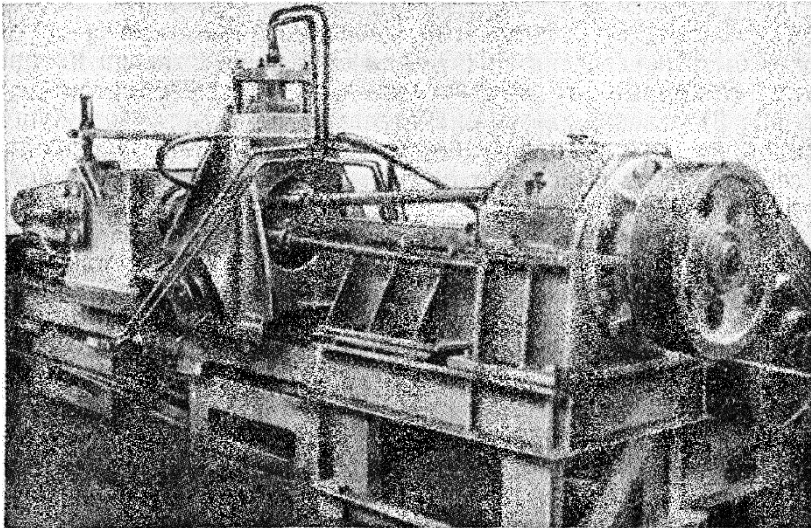
Tabela 2.5. Parametry techniczne walcarki FSR (ang. *Flexible Skew Rolling*) [21]

Walcarka FSR		
Moc znamionowa silników	[kW]	2 x 30
Zakres prędkości obrotowej narzędzi	[obr/min]	0 ÷ 43
Moc znamionowa silnika do przesuwu promieniowego	[kW]	3
Zakres prędkości promieniowej	[mm/s]	1 ÷ 5
Moc znamionowa silników do ustawiania kąтового rolek	[kW]	2 x 2,3
Zakres prędkości ustawienia kąтового	[°/s]	1 ÷ 10
Ustawienie kątowne rolek względem osi walcowania	[°]	± 12
Maksymalna średnica rolki	[mm]	350
Maksymalna średnica wsadu	[mm/s]	80
Wymiary gabarytowe	[m]	1,8 x 1,7 x 1,6
Masa	[kg]	5000

Klatkę walcowniczą zabudowano w postaci korpusu otwartego spiętego w górnej części słupem, służącym jednocześnie do regulacji rozstawu narzędzi roboczych umożliwiając zmianę redukcji przekroju poprzecznego wsadu. W celu zapewnienia pełnej synchronizacji przesuwu promieniowego narzędzi w klatce roboczej dokonano również połączenia mechanicznego w dolnej części korpusu poprzez wycinek przekładni zębatej. Przed rozpoczęciem procesu dokonywane jest skośne ustawienie rolek w zakresie $\pm 12^\circ$ względem osi materiału wsadowego za pomocą dwóch silników servo o mocy każdego z nich równej 2,3 kW. Narzędzia robocze o maksymalnej średnicy wynoszącej 340 mm przemieszczane się przez zespół przesuwu promieniowego w postaci silnika servo o mocy wynoszącej 3 kW, co umożliwia zmianę przekroju poprzecznego materiału podczas walcowania. Dodatkowo w trakcie kształtowania wyrobu każda z rolek obracana jest w tym samym kierunku z tą samą prędkością (o maksymalnej wartości 43 obr/min). Ze względu na złożoność procesu, sekwencje ruchów poszczególnych zespołów, tj. ustawienia kąтового narzędzi oraz ich przesuwu promieniowego realizowane są w oparciu o system sterowania numerycznego. Na podstawie zadanej geometrii docelowego wyrobu umożliwia uzyskanie osiowosymetrycznych wyrobów w postaci stopniowanych wałów [21, 98].

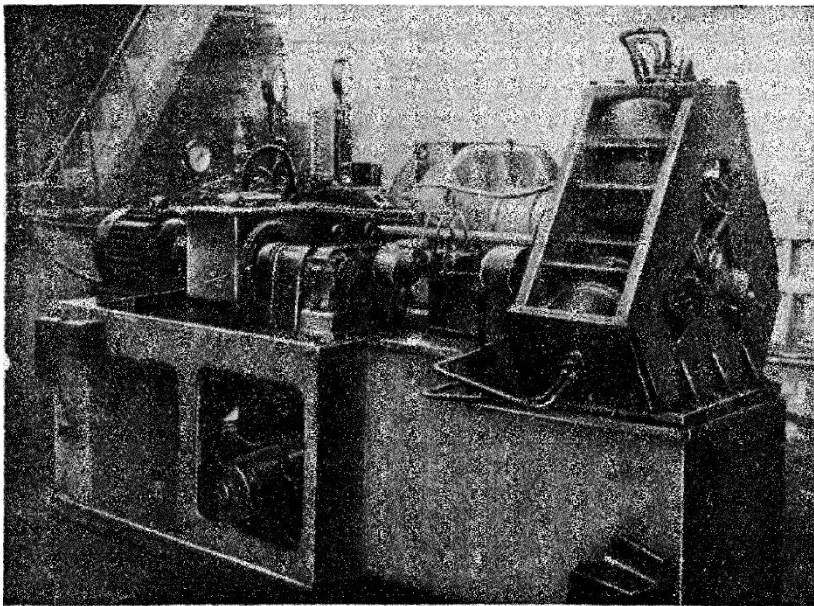
Walcarki skośne o trzech narzędziach kształtujących ustawionych skośnie względem osi walcowania skonstruowało przedsiębiorstwo Vniimetmash. Przykładem jest walcarka CKBMM-9 (ros. ЦКБММ-9) zaprezentowana na

rysunku 2.42. Charakteryzuje się ona segmentową budową. Ramę nośną wykonano, jako spawaną konstrukcję z kształowników hutniczych. Umieszczono na niej układ napędowy, w skład którego wchodzi silnik elektryczny o mocy znamionowej 50 kW, przekazujący moment obrotowy poprzez koła pasowe do przekładni zębatej, w której następuje jego podział na trzy rolki kształtujące połączone za pomocą wałów przegubowych do czopów napędowych przekładni. Narzędzia kształtujące umieszczone są co 120° na obwodzie wsadu, dostarczanego do przestrzeni roboczej poprzez specjalny otwór prowadzący. Jeden z jego końców wsuwany jest do uchwyty zaciskowego umocowanego w przemieszczanej obudowie i umieszczany jest pomiędzy rolkami. Położenie rolek roboczych, a tym samym ukształtowanie profilu wyrobu określone jest poprzez kopiał. Przemieszczany jest on wraz z ruchomą obudową uchwyty oddziałując na mechanizmy sterownicze, w tym zawory siłowników hydraulicznych, które tłoczkami połączone z korpusami, gdzie zamontowano w nich rolki kształtujące materiał. Wymiary opisywanej walcarki skośnej (o masie 8 ton) wynoszą: długość – 7 m, szerokość – 1,5 m, wysokość – 2,1 m. Do zasilania siłowników realizujących posuw narzędzi roboczych oraz obudowy uchwyty zastosowano pompę hydrauliczną o wydajności 100 l/min. Walcarka umożliwia kształtowanie wyrobów pełnych o średnicy od 18 mm do 55 mm i o długości do 1000 mm oraz drążonych o średnicy do 100 mm i długości do 1000 mm. Maksymalna redukcja średnicy osiąga 60%, co odpowiada maksymalnemu stopniowi gniotu o wartości 2,5. Dla walcowania różnych zarysów kształtowanych wyrobów należy dokonać wymiany wzornika, która to operacja, szacunkowo trwa 5–10 minut [65].



Rys. 2.42. Walcarka skośna trójrolkowa Vniimetmash CKBMM-9 [65]

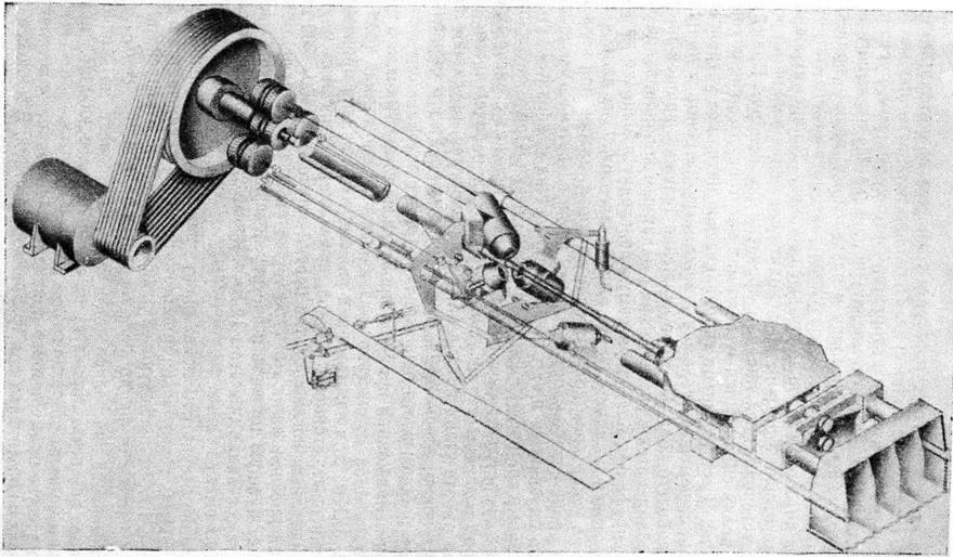
Kolejny model walcarki CKBMM-10 (rys. 2.43) wykorzystywano do walcowania odkuwek o długości do 700 mm oraz o średnicach o wymiarze minimalnym, co najmniej 5 mm oraz maksymalnym wynoszącym 15 mm. Prędkość liniową przemieszczanego osiowo wsadu ustalono na wartość 2 m/min (33,3 mm/s). Ruch obrotowy rolek zrealizowano poprzez silnik elektryczny trójfazowy AO-52 o mocy 9,5 kW, który połączono z bezstopniową przekładnią cierną. Siłowniki hydrauliczne do przemieszczania promieniowego rolek kształtujących wykorzystują kopiały. Sygnał napięciowy generowany na podstawie jednego z nich odpowiada za rozstaw rolek, natomiast drugi za regulację prędkości oraz przepływ oleju hydraulicznego do posuwu poszczególnych tłoczków, tym samym powodując zmianę ciśnienia roboczego siłowników. Proces walcowania rozpoczyna się od nagrzewania wsadu w nagrzewnicy indukcyjnej, skąd za pomocą siłownika pneumatycznego jest on wypychany przez nowo wprowadzany materiał, powodując umieszczenie w uchwycie nagrzanego wsadu. Odwalcowany wyrób opusza rolki i przemieszcza się z obudową uchwytu aż do ogranicznika, gdzie jest zwalniany z mocowania i wrzucany na przenośnik.



Rys. 2.43. Walcarka skośna trójrolkowa Vniimetmash CKBMM-10 [65]

Walcarkę Vniimetmash typu 70 (rys. 2.44) przeznaczono do kształtowania wyrobów o średnicach od 20 mm do 70 mm i o długościach do 2500 mm, z maksymalnym stopniem gniotu o wartości 2,1. Masa całej konstrukcji wynosi 25 ton. Silnik prądu stałego PN-550 o mocy 50 kW, połączono poprzez przekładnię pasową z przekładnią zębatą, przekazującą moment obrotowy

poprzez wały przegubowe na trzy rolki kształtujące umieszczone w płytowej klatce walcowniczej. Mechanizm synchronizacji zsuwania i rozsuwania narzędzi połączony jest z kopiałem. Przemieszczanie osiowe wyrobu odbywa się za pomocą tłoków przesuwających ruchomy korpus z zabudowanym w nim uchwytem. Walcarka współpracuje z pozostałymi urządzeniami pomocniczymi, w tym nagrzewnicą indukcyjną o mocy 250 kW ustawioną w osi walcowania do przygotowania wsadów o średnicy w zakresie 30–70 mm i długościach od 900 mm do 1500 mm. Dodatkowy pirometr służy jako urządzenie kontrolujące temperaturę, co umożliwia oszacowanie czasu potrzebnego do poprawnego nagrzania wsadu. Popychacz umieszcza w nagrzewnicy materiał wyjściowy, powodując wysunięcie poprzednio nagrzanego, gdzie za pomocą przenośnika umieszczony jest w specjalnej rynnie i docelowo w uchwycie, w którym zaciskany jest przez szczęki. Następuje posuw osiowy korpusu, w którym znajduje się uchwyt i zgodnie z zarysem kopiała wykonywane są przemieszczenia siłowników promieniowych wraz z obracającymi się rolkami. Po odwalcowaniu materiał jest przetransportowany przenośnikiem do miejsca składowania.



Rys. 2.44. Walcarka skośna trójrolkowa Vniimetmash 70 [65]

Zaprojektowano również walcarkę przemysłową Vniimetmash typu 120, dla kształtowania odkuwek o średnicach od 20 mm do 120 mm, z zastosowaniem stopnia gniotu o wartości do 2,5 z wykorzystaniem jej w przemyśle motoryzacyjnym. Walcowanie różnych odkuwek możliwe jest przez zastosowanie nowych kopiałów dostosowanych do geometrii kształtu poszczególnych wyrobów. Sposób przemieszczania poszczególnych siłowników

jest realizowany w identyczny sposób, co w poprzednio opisanych walcarkach typu 70 oraz CKBMM.

Wykonano również największą walcarkę typu Vniimetmash 250 o trzech skośnie ustawionych rolkach. Wsadem materiałowym mogą być pręty o średnicy 250 mm oraz długość 1750 mm, które kierowane są do specjalnej rynny, z której siłownik pneumatyczny umieszcza wsad w uchwycie. Gdy wsad zostaje umieszczony pomiędzy rolkami wtedy następuje ich zaciśnięcie i rozpoczęcie walcowania, podczas którego prędkość osiowa materiału wynosi 4 m/min (66,6 mm/s). Skonstruowana walcarka ruch obrotowy narzędzi kształtujących realizuje poprzez zamontowany silnik elektryczny o mocy 1100 kW, będący częścią układu napędowego. Bez dodatkowej aparatury pomocniczej długość walcarki to 19 m, szerokość – 5 m, a wysokość – 3,5 m. Łączna masa całego zestawu wliczając niezbędne urządzenia realizujące proces walcowania wynosi 800 ton.

2.3. Podsumowanie przeglądu literatury

Wytwarzanie wyrobów wydłużonych osiowosymetrycznych metodami obróbki plastycznej realizowane jest głównie poprzez kucie oraz walcowanie. W zaprezentowanym przeglądzie literatury przedstawiono wybrane procesy obróbki plastycznej umożliwiające ich kształtowanie. W przeważającej części skupiono się na procesach walcowania oraz maszynach kuźniczych w tym celu stosowanych.

Jedną z wymienianych metod jest walcowanie skośne za pomocą trzech narzędzi roboczych umożliwiających kształtowanie wydłużonych i stopniowanych odkuwek, w postaci osi i wałów oraz wielkogabarytowych przedkuwek. Zaprezentowane wyroby zarówno pełne jak i drażone otrzymywano tą technologią w latach 60-tych XX wieku, wykorzystując mechaniczne systemy pozycjonowania narzędzi. Jednakże w wyniku niewystarczających opracowań literaturowych brak jest dostatecznej ilości informacji o parametrach ustawczych i ich wpływie na proces.

Ciągły rozwój przemysłu w zakresie automatyzacji, głównie dotyczącej układów sterowania numerycznego umożliwia podjęcie dalszych prac badawczych, pozwalających rozwijać tę metodę walcowania. Znacznie upraszcza sposób regulowania położeniem i prędkością posuwu narzędzi jak i uchwytu utrzymującego walcowany wsad.

Podsumowując, uzasadnione jest przeprowadzenie analizy walcowania skośnego, umożliwiając określenie wpływu parametrów technologicznych na przebieg procesu, w tym geometrii i jakości wytwarzanych wyrobów oraz parametrów siłowych, jak również poddając weryfikacji użyteczność tego procesu w warunkach produkcyjnych.

3. Model numeryczny procesu walcowania skośnego

3.1. Zastosowana metoda obliczeń oraz jej zakres

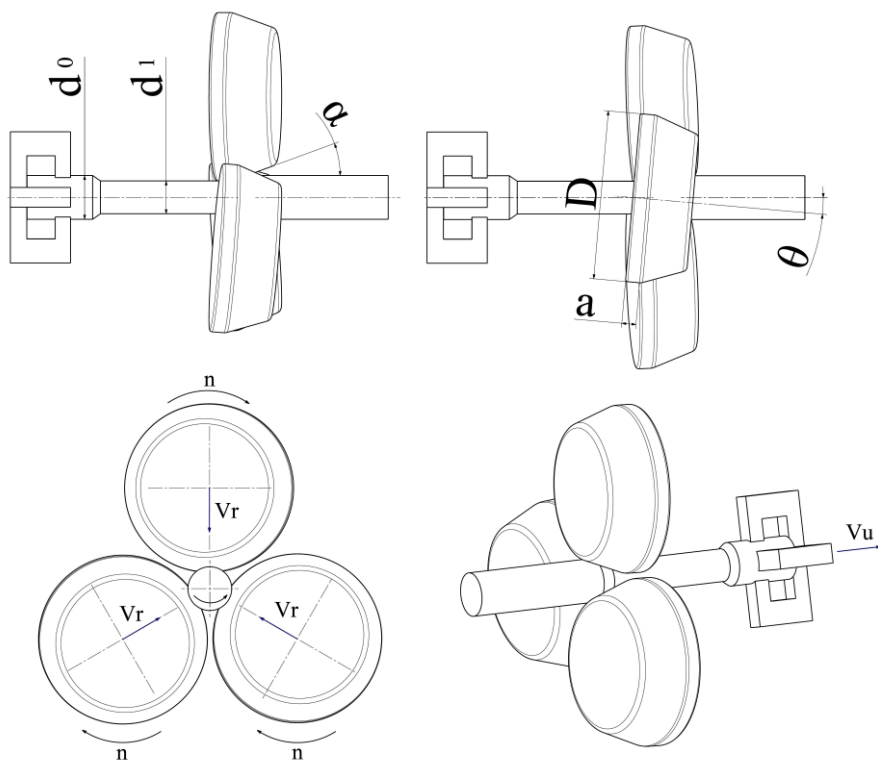
Proces walcowania skośnego trzema rolkami stożkowymi poddano analizie numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). W zakresie modelowania procesów obróbki plastycznej umożliwia ona aproksymację obiektu rzeczywistego o nieskończonej liczbie stopni swobody modelem dyskretnym posiadającym skończoną liczbę elementów w kształcie prostych brył geometrycznych łączących się w tzw. węzłach. Ich przemieszczenia powodują powstanie sił oddziaływania w poszczególnych elementach. Na podstawie zaistniałych zmian w węzłach obliczane są odkształcenia a następnie naprężenia we wszystkich punktach modelu. Końcowy rezultat jest wynikiem rozwiązania układu równań definiujących poszczególne elementy, uzupełniony o przyjęte warunki brzegowe oraz uwzględniający kryteria plastyczności.

MES jest szeroko stosowany przy analizie wytrzymałości konstrukcji, dynamiki, zjawisk termicznych, przepływów cieczy, jak również oddziaływań elektromechanicznych. Metoda ta umożliwia weryfikację przyjętych założeń dla danego procesu oraz poprawności funkcjonowania wyrobu, co przekłada się na optymalizację przyjętych parametrów lub zmiany wybranych cech produktu. W konsekwencji doprowadza to do skrócenia czasu wytwarzania wyrobu lub jego modyfikacji, zmniejszenia kosztów produkcyjnych bądź szybszego wdrażania nowej metody wytwórczej.

Do symulacji numerycznych procesu walcowania zastosowano oprogramowanie Simufact Forming (wersja 15). Przygotowano modele geometryczne (rys. 3.1) zawierające zestaw trzech rolek stożkowych (o kącie kształtującym α oraz kącie θ określającym skośne położenie rolek względem osi wsadu) oraz uchwyt czteroszczękowy, w którym umieszczano wsad stalowy w gatunku C60 o wymiarach początkowych $d_0 = 52$ mm i $l_0 = 330$ mm. Kształtowanie materiału następowało w wyniku jednoczesnego przemieszczania promieniowego rolek o średnicy $D = 150$ mm (obracających się ze stałą prędkością obrotową n równą 60 obr/min) oraz osiowego uchwytu, wg zadanej trajektorii ich ruchu.

Przeprowadzone obliczenia dokonano w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia. Przyjęto sztywny model materiału narzędzi eliminując ich odkształcanie podczas walcowania. W trakcie przeprowadzonej symulacji numerycznej warunki brzegowe były zmienne, co pozwoliło na przeprowadzenie wstępnej analizy ich wpływu na przebieg walcowania skośnego. Wykorzystano rolki stożkowe o trzech zmiennych kątach kształtujących $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$. Dla każdego zestawu narzędzi ustawiano ich kąt zukosowania względem osi wsadu o wartości $\theta = 5^\circ$. Dodatkowo przy danym ustawieniu kątowym rolek

przemieszczano materiał wsadowy z prędkością osiową V_u uchwytu równą 20 mm/s.



Rys. 3.1. Schemat procesu walcowania skośnego trzema rolkami stożkowymi z zaznaczonymi głównymi parametrami

Wprowadzono tabelarycznie do oprogramowania Simufact.Forming wartości prędkości posuwu dla narzędzi roboczych oraz uchwytu szczękowego zgodne z przyjętym układem współrzędnych w analizie numerycznej procesu (rys. 3.2). Celem tego działania jest otrzymanie zadanej geometrii wyrobu, której możliwość uzyskania zostanie również potwierdzona w drodze doświadczalnych prób walcowania.

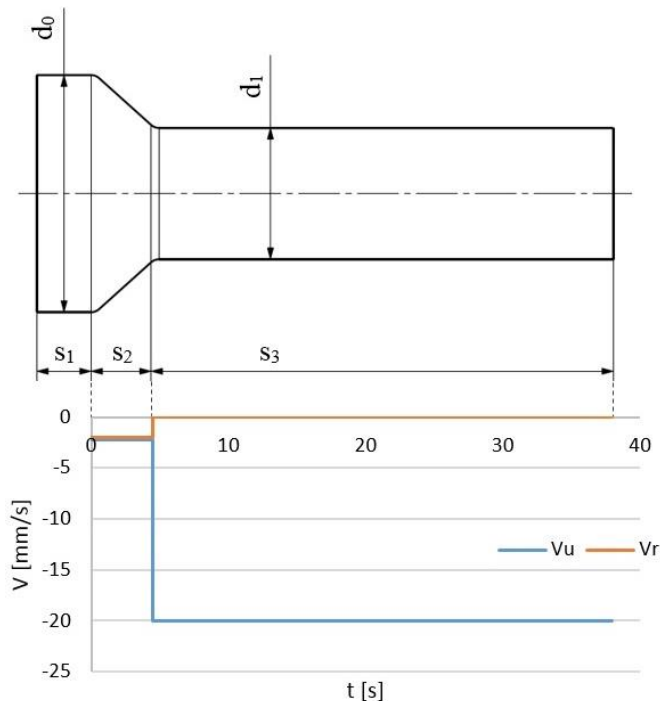
Dla każdego ze wspomnianych wariantów ustawczych ustalono przerób plastyczny materiału R_p o wartościach 22%, 41%, 57%, wg:

$$R_p = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

gdzie:

S_0 – pole przekroju poprzecznego wsadu,

S – pole przekroju poprzecznego walcowanego stopnia.



Rys. 3.2. Rozkład prędkości w kierunku osiowym (V_u) oraz w kierunku promieniowym (V_r) wraz z oznaczeniem obszarów na odkuwce: s_1 – odsadzenie skośnie ustawionych rolek stożkowych od uchwytu, s_2 – obszar zsynchronizowanego przemieszczenia narzędzi roboczych oraz uchwytu, s_3 – przemieszczanie uchwytu ze stałą prędkością bez zmiany położenia rolek stożkowych.

3.2. Model materiałowy stosowany w obliczeniach numerycznych

Analizę numeryczną procesu walcowania skośnego prętów stalowych w gatunku C60 realizowano z uwzględnieniem zjawisk termomechanicznych, zachodzących podczas kształtowania. Przyjęto współczynnik wymiany ciepła między materiałem wsadowym a narzędziami o wartości $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ oraz pomiędzy wsadem a otoczeniem o wartości $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ustalono temperaturę początkową pręta stalowego równą $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ i temperaturę narzędzi równą $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

W obliczeniach MES wykorzystano model materiałowy pobrany z bazy oprogramowania Simufact.Forming (wersja 15) opisany poniższym równaniem:

$$\sigma_p = c_1 \cdot e^{(c_2 \cdot T)} \cdot \varphi^{(n_1 \cdot T + n_2)} \cdot e^{\left(\frac{l_1 \cdot T + l_2}{\varphi}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_1 \cdot T + m_2)}, \quad (3.2)$$

gdzie:

σ_p – naprężenie uplastyczniające [MPa],

φ – intensywność odkształcenia,

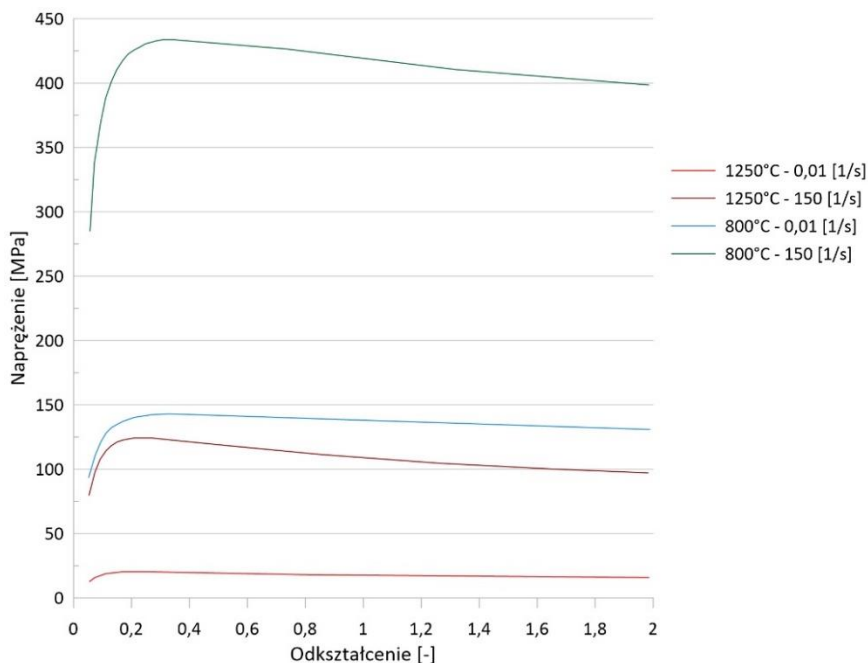
$\dot{\varphi}$ – prędkość odkształcenia [1/s],

T – temperatura [°C].

Ostateczną postać równania konstytutywnego opisującego matematycznie model rzeczywisty materiału stali w gatunku C60 przedstawiono poniżej:

$$\sigma_p = 4857,09 \cdot e^{(-0,0037405 \cdot T)} \cdot \varphi^{(-0,000221788 \cdot T + 0,0790807)} \cdot e^{\left(\frac{-2,58044 \cdot 10^{-5} \cdot T - 0,014919}{\varphi}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(0,000156113 \cdot T - 0,00965534)}. \quad (3.3)$$

Na rysunku 3.3 przedstawiono wybrane krzywe płynięcia stali w gatunku C60 wyznaczone na podstawie tego modelu.



Rys. 3.3. Wykres krzywych płynięcia stali w gatunku C60 zastosowanych w obliczeniach MES

Wybrany model stali niestopowej prawidłowo oddaje zachowanie tego gatunku materiału w procesach walcowania na gorąco, co przedstawiono w opracowaniach naukowych weryfikujących obliczenia numeryczne z wynikami badań doświadczalnych [46, 47, 52, 80].

Materiał wsadowy opisano, jako obiekt sztywno-plastyczny, który modelowano elementami heksagonalnymi o wielkości 2,1 mm. Dobrane parametry w zakresie przebudowy siatki (remeshing) zostały dobrane arbitralnie, kierując się przy tym kompromisem pomiędzy dokładnością obliczeniową a czasem obliczeń.

3.3. Model tarcia

W przeprowadzonej analizie numerycznej procesu walcowania skośnego trzema rolkami stożkowymi zastosowano model tarcia stałego. W obliczeniach opartych na metodzie elementów skończonych wykorzystano model przyjmujący poniższą postać:

$$\tau = m \cdot k, \quad (3.4)$$

gdzie:

τ – naprężenie styczne,

m – czynnik tarcia z przedziału $\langle 0, 1 \rangle$,

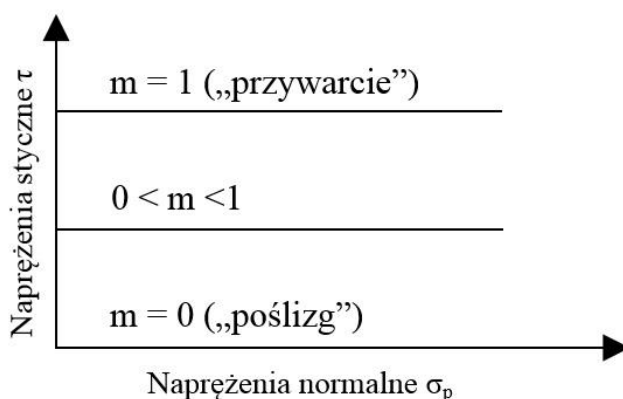
k – wytrzymałość na czyste ścinanie bardziej miękkiego materiału.

Model ten wykorzystywany jest przy analizach procesów obróbki plastycznej na gorąco w warunkach dużego obciążenia siłami normalnymi na powierzchni styku narzędzi i materiału odkształcanego, gdzie zachodzi silne połączenie metaliczne (szczepienie, zrost).

W przypadku, gdy połączenie w miejscu kontaktu pary trącej jest słabe, wtedy ściecie nastąpi na powierzchni utworzonego styku. Przy mocnym połączeniu, ściecie wystąpi w materiale odkształcanym (wtedy na narzędziu powstaje narost) bądź w materiale narzędzia, powodując jego zużycie. Zniszczenie mocnego, metalicznego połączenia wiąże się z pokonaniem wytrzymałości na ścinanie, uzyskując poniższą postać równania:

$$\tau = k. \quad (3.5)$$

Przyjmuje się, że z chwilą przywarcia materiałów współpracujących tarciowo wartość czynnika m reprezentująca jakość połączenia tarciowego będzie wynosić 1 (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Wykres przedstawiający model tarcia stałego [68]

Wartość k zależna jest od własności plastycznych materiału. Zgodnie z hipotezą Hubera–Misesa (rys. 3.5) k wynosi:

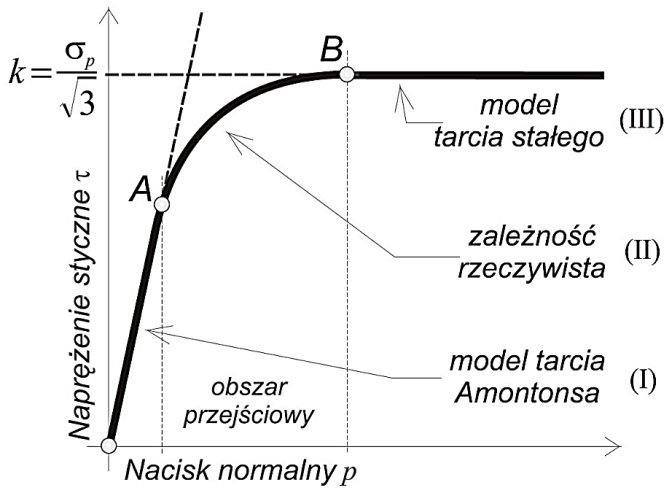
$$k = \frac{\sigma_p}{\sqrt{3}}. \quad (3.6)$$

Dla małych wartości nacisków normalnych p , naprężenia styczne na powierzchni narzędzi są proporcjonalne do nich (obszar I) i zgodnie z prawem Amontons'a wynoszą:

$$\tau = \mu \cdot p, \quad (3.7)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia.



Rys. 3.5. Zależność naprężenia stycznego τ od nacisku normalnego p [39]

Dla bardzo dużych nacisków, naprężenie styczne osiąga wartość równą $\sigma_p / \sqrt{3}$. Odpowiada maksymalnym naprężeniom stycznym jakie mogą powstawać w materiale poddanym ścinaniu w płaszczyźnie styku z narzędziem. Dotyczy to warunków, przy których następuje pełne przywarcie kształtowanego materiału do narzędzia roboczego (obszar III).

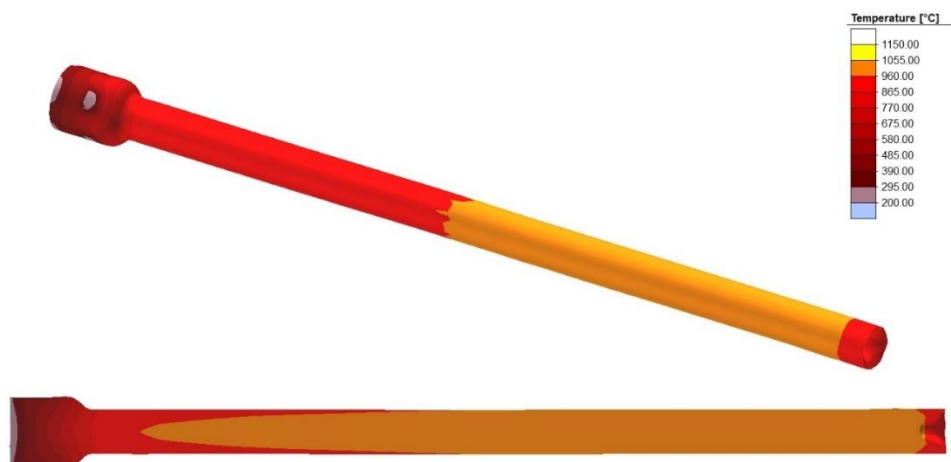
Przyjęty czynnik tarcia do analizy numerycznej MES na powierzchni styku pary trącej o wartości $m = 0,95$, określa o ile wartość naprężenia τ różni się od granicy plastyczności przy czystym ścinaniu k . Parametr ten został dobrany na podstawie przeprowadzonych weryfikacji obliczeń numerycznych procesu walcowania, opisanych w literaturze specjalistycznej [44–47, 52, 80].

3.4. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych

Na podstawie wykonanych symulacji numerycznych walcowania skośnego przeanalizowano wpływ poszczególnych parametrów ustawczych na przebieg procesu. Otrzymane wyniki z analiz MES, głównie dotyczące parametrów siłowych pozwoliły także na prawidłowe przygotowanie stanowiska laboratoryjnego poprzez dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych oraz wstępne oszacowanie przekrojów poszczególnych podzespołów, jak również wyspecyfikowanie zakresów pracy dla aparatury kontrolno-pomiarowej.

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki z symulacji procesu walcowania skośnego za pomocą rolek stożkowych o kącie kształtującym $\alpha = 20^\circ$ i kącie zukosowania narzędzi względem osi wsadu o wartości $\theta = 5^\circ$.

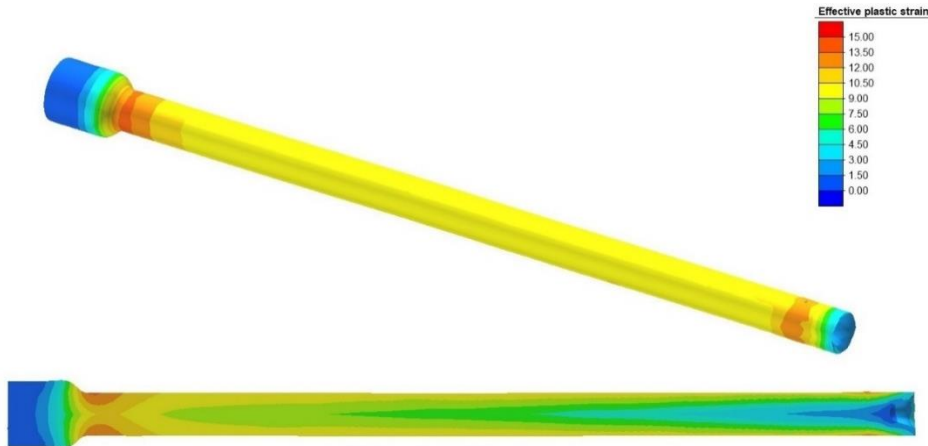
Proces walcowania odkuwki, podczas którego kształtowano jeden stopień według zadanej trajektorii ruchu rolek stożkowych oraz uchwytu szczękowego wyniósł 38 sekund. Występujący spadek temperatury walcowanego wyrobu, uzyskuje największą wartość w miejscu styku materiału wsadowego ze szczękami uchwytu (rys. 3.6). Temperatura w obszarze osiowym jest wyższa i utrzymuje się na względnie stałym poziomie, ponieważ zgromadzone ciepło nie jest bezpośrednio odprowadzane do otoczenia. Ciągły kontakt narzędzi roboczych z materiałem następuje w sposób miejscowy, powodując obniżenie temperatury kształtowanego detalu przy powierzchni zewnętrznej materiału. Straty te jednak są rekompensowane przez ciepło generowane w wyniku zmian pracy tarcia występującego pomiędzy zestawem rolek stożkowych a wsadem.



Rys. 3.6. Rozkład temperatury (w °C) w odkuwce otrzymanej w procesie walcowania skośnego

Rozkład intensywności odkształcenia w walcowanej odkuwce zaprezentowano na rysunku 3.7. Analizowany przypadek prezentuje powierzchniowe kształtowanie materiału. Dlatego też w przekroju osiowym uzyskanego wyrobu, widoczne są wyższe wyniki odkształcenia przy jego

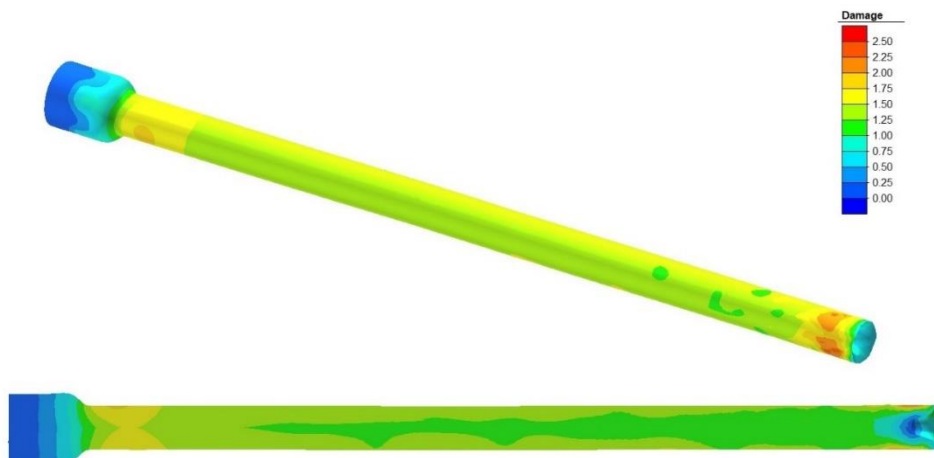
powierzchni, a ich zmniejszenie następuje wraz ze zbliżaniem się do osi. Maksymalne wartości odkształcenia otrzymano w obszarze, w którym następuje zsunięcie się rolek stożkowych do zadanej redukcji przekroju poprzecznego wsadu i rozpoczęcie kształtowania części walcowej odkuwki. Zwiększone odkształcenia występują też w końcowym etapie obróbki, gdzie dodatkowo powstaje lej czołowy charakterystyczny dla procesów walcowania skośnego i poprzeczno-klinowego.



Rys. 3.7. Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwce otrzymanej w procesie walcowania skośnego

Przyczyną tej deformacji materiału jest powierzchniowe płynięcie materiału, przy jednoczesnym niewielkim jego przemieszczeniu w osi wsadu. Powoduje to straty materiału i konieczność uwzględnienia naddatku, podczas przygotowania materiału wsadowego, który po ukształtowaniu odkuwki zostanie odcięty, jako odpad końcowy. Ponadto przy doborze wsadu należy uwzględnić, tzw. kleszczowinę, której długość a zarazem objętość zależy od głębokości umieszczenia materiału w uchwycie szczękowym, a także odsadzenia od niego zukosowanych rolek stożkowych (rys. 3.2).

Zjawiskiem ograniczającym procesy walcowania jest występowanie wewnętrznych pęknięć w otrzymywanych wyrobach, nazywane również efektem Mannesmana. Powstające w strefie osiowej szczeliny w przypadku kształtowania metodą dwunarzędziową mają kształt wzdłużny, natomiast przy walcowaniu zestawem trzech narzędzi pęknięcia charakteryzują się kształtem pierścieniowym, występując w pewnej odległości od osi odkuwki.



Rys. 3.8. Rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta–Lathama) w odkuwce otrzymanej w procesie walcowania skośnego

W celu określenia skłonności do tworzenia pęknięć wewnętrznych w odkuwkach wykonywanych metodą walcowania skośnego analizowano zmiany całki zgodnie ze znormalizowanym kryterium energetycznym Cockrofta–Lathama, określonym równaniem:

$$\int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon = C, \quad (3.8)$$

gdzie:

σ_1 – maksymalne naprężenie główne [MPa],

σ_i – naprężenie zastępcze [MPa],

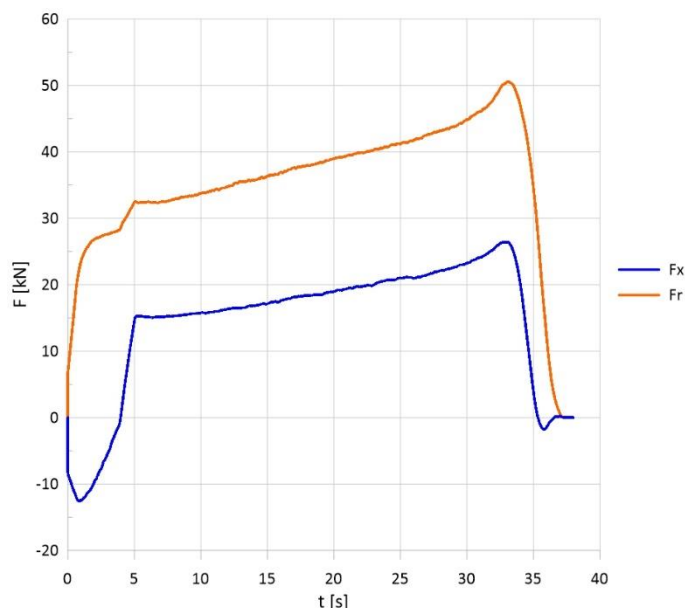
ε – odkształcenie plastyczne materiału [-],

C – wartość funkcji zniszczenia [-].

Według zastosowanego kryterium pęknięcie materiału nastąpi, gdy praca wykonana przez największe naprężenie rozciągające osiąga wartość krytyczną C – stałą dla danego gatunku materiału. W zaprezentowanym rozkładzie (rys. 3.8) całka osiąga znacznie większe wartości w dwóch miejscach, tj. przy rozpoczęciu kształtowania części walcowej odkuwki i przy jej zakończeniu, gdzie występuje już wspomniany lej czołowy. Oznacza to, że większa skłonność do tworzenia pęknięć wewnętrznych występuje właśnie w tych miejscach. Jednakże w zaprezentowanym przypadku walcowania wsadu o ustalonym przerobie plastycznym materiału o wartości $R_p = 57\%$ nie stwierdzono pęknięcia materiału.

Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła na określenie parametrów siłowych występujących podczas procesu walcowania odkuwek, w oparciu o które przyjęto założenia do prac konstrukcyjnych związanych z wykonaniem laboratoryjnej walcarki skośnej. Obliczone przebiegi siły osiowej w uchwycie

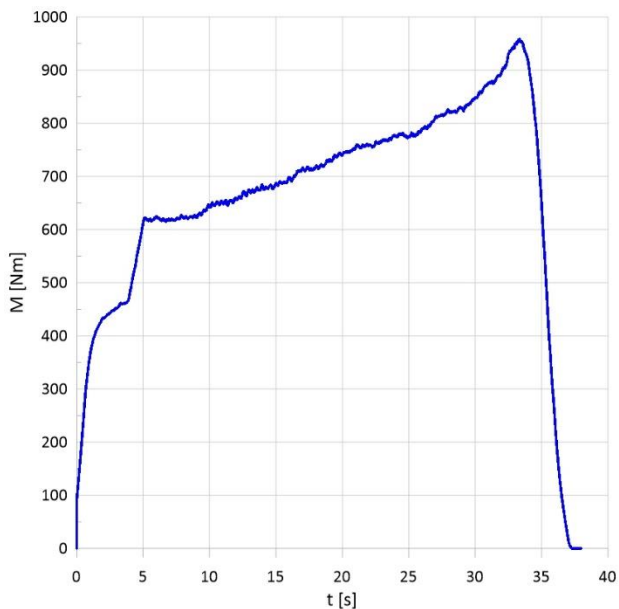
szczękowym, promieniowej na rolce stożkowej, jak również momentu obrotowego przedstawiono na rysunkach 3.9 oraz 3.10.



Rys. 3.9. Przebiegi zmian siły osiowej F_x i promieniowej F_r w procesie walcowania otrzymane z analizy MES

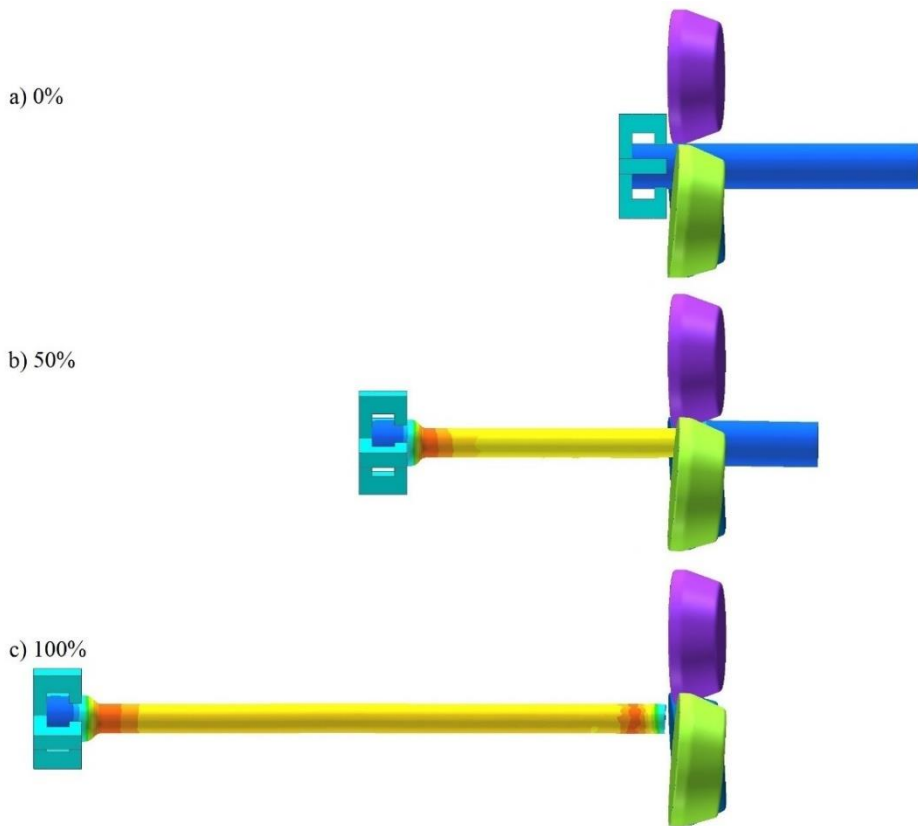
Podczas zagłębiania narzędzi roboczych w materiał następuje gwałtowny wzrost siły promieniowej oraz momentu obrotowego. W dalszym etapie przy walcowaniu stopnia odkuwki o stałej średnicy wspomniane parametry stabilizują się. Jednakże widoczny jest stopniowy wzrost ich wartości, co wynika z obniżania temperatury wsadu wraz z postępowaniem procesu kształtowania. W przypadku siły osiowej, tj. ciągnącej materiał, początkowy przebieg wykresu, gdzie następuje zagłębianie się rolek stożkowych w materiał charakteryzuje się ujemnymi wartościami siły. Oznacza to, że występuje wypychanie materiału przez rolki stożkowe w kierunku uchwytu szczękowego. Zjawisko to spowodowane jest skośnym ustawieniem narzędzi roboczych względem osi walcowanego wsadu (w analizowanym przypadku kąt zukosowania wynosi $\theta = 5^\circ$), co powoduje osiowe przemieszczanie materiału podczas jego kształtowania. W dalszym etapie walcowania przy ustalonej, stałej wartości stopnia gniotu siła osiowa w uchwycie stabilizuje się, wykazując jednak tendencję wzrostową osiąganych wartości, co spowodowane jest spadkiem temperatury materiału w wyniku odprowadzenia jego ciepła do otoczenia. Największe wartości parametrów siłowych uzyskano w końcowych etapach walcowania odkuwki, co w konsekwencji wpływa na moc układu napędowego laboratoryjnej walcarki skośnej oraz wielkość podzespołów klatki walcowniczej. Należałoby dodać, że maksymalna siła promieniowa

działająca na rolkę stożkową wynosiła 50,5 kN, natomiast siła osiowa w uchwycie, w którym mocowano wsad uzyskała wartość 26,4 kN. Odnotowany maksymalny moment obrotowy podczas walcowania na skrajnym stopniu odkuwki wynosi 958 Nm.



Rys. 3.10. Przebieg zmian momentu obrotowego w procesie walcowania otrzymany z analizy MES

Podczas obliczeń numerycznych analizowano progresję kształtu walcowanej odkuwki. Zmiany kształtu wraz z podziałem procentowym zaawansowania procesu zaprezentowano na rysunku 3.11. W przeprowadzonej symulacji numerycznej jeden z końców pręta utwierdzono w przesuwym uchwycie. Natomiast drugi przemieszczany jest swobodnie, co przyczynia się do występowania w tej części niewielkiego wyginania wsadu. Jego ograniczeniu można zapobiec, stosując tuleję prowadzącą materiał wsadowy, którą umieścić trzeba byłoby przed narzędziami roboczymi.

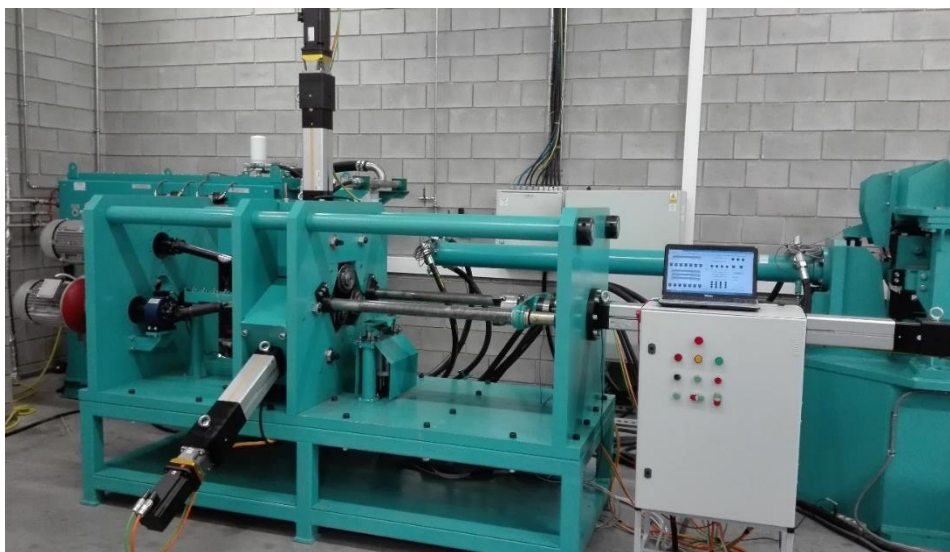


Rys. 3.11. Etapy walcowania skośnego odkuwki wraz z oznaczeniem progresji procesu: a) wsad umieszczony pomiędzy obracającymi się narzędziami, b) walcowanie wsadu, c) odkuwka wysunięta z przestrzeni roboczej rolek stożkowych

4. Stanowisko badawcze

4.1. Konstrukcja mechaniczna

Badania doświadczalne realizowano wykorzystując walcarką skośną z trzema rolkami stożkowymi (rys. 4.1) znajdującą się w laboratorium Nowych Technologii Plastycznego Kształtowania Metali, należącym do Katedry Obróbki Plastycznej Metali.

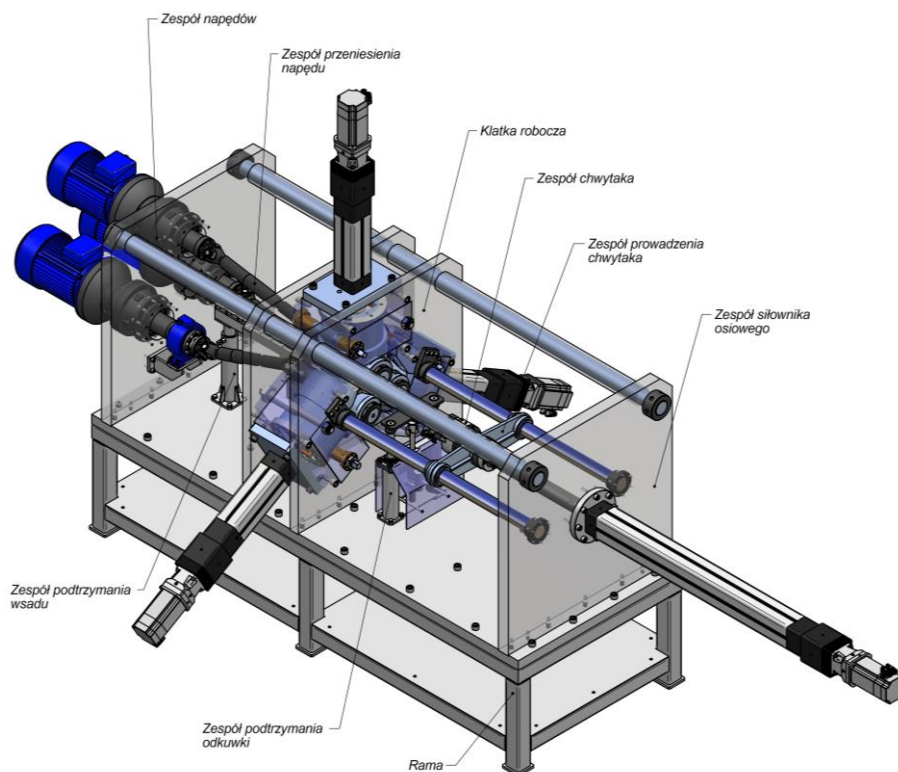


Rys. 4.1. Laboratoryjna walcarka skośna z trzema rolkami kształtującymi

Stanowisko badawcze zaprojektowano i zbudowano na potrzeby realizacji badań doświadczalnych w zakresie kształtowania wydłużonych osiowosymetrycznych odkuwek, typu osie i wały [81, 82]. Maszyna charakteryzuje się dużą uniwersalnością ze względu na możliwości kształtowania różnych odkuwek za pomocą jednego zestawu narzędzi roboczych. Zastosowano w niej układ sterowania numerycznego umożliwiający walcowanie różnych kształtów odkuwek, w wyniku sekwencyjnego przemieszczania narzędzi na podstawie zadanej trajektorii ich ruchu.

Walcarka skośna, której podstawowe parametry techniczne przedstawiono w tabeli 4.1 charakteryzuje się segmentową strukturą budowy, składającą się z dziewięciu podstawowych zespołów (rys. 4.2): ramy nośnej, klatki narzędzi roboczych, zespołu napędowego, układu przeniesienia napędu, zespołów podtrzymania wsadu i odkuwki, zespołu chwytaka oraz jego prowadzenia, a także zespołu siłownika osiowego. Dodatkowo walcarka wyposażona jest w układ elektryczny zasilający i sterujący poszczególnymi podzespołami oraz pomiarowy

do akwizycji danych w postaci momentu obrotowego oraz parametrów siłowych, w tym siły osiowej chwytaka oraz promieniowej rolki.



Rys. 4.2. Model przestrzenny walcarki skośnej z trzema rolkami kształtującymi

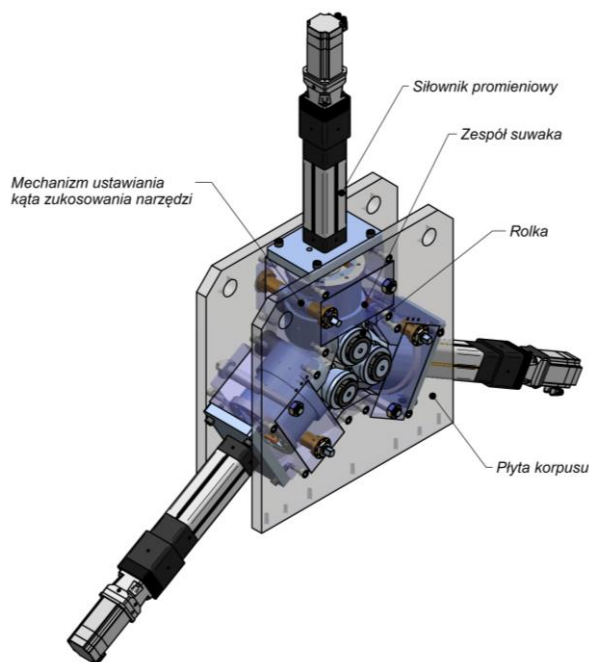
Walcowanie materiału wyjściowego w postaci pręta o maksymalnej średnicy 55 mm rozpoczyna się od umieszczenia go w zespole podtrzymania wsadu, gdzie następnie jeden z jego końców jest mocowany w zespole czteroszczękowego, obrotowego chwytaka. Trzy niezależne motoreduktory w postaci silników elektrycznych trójfazowych o mocy znamionowej 7,5 kW każdy i zębatych przekładni planetarnych, poprzez układ trzech wałów przegubowych o maksymalnym momencie obrotowym każdego z nich 1200 Nm, wprawiają w ruch obrotowy z prędkością 60 obr/min trzy wały narzędziowe z zamontowanymi na ich czopach rolkami kształtującymi. Każda z rolek obracając się w tym samym kierunku powoduje również ruch obrotowy wsadu mocowanego w uchwycie. Rolki stożkowe rozmieszczone co 120° na obwodzie wsadu, przemieszczane są do osi walcowanego pręta za pomocą promieniowych, elektrośrubowych siłowników typu Parker ETH 100. Powierzchnie czołowe siłowników przymocowano do zespołów suwaków stanowiących część klatki

walcowniczej (rys. 4.3), w której następuje proces kształtowania odkuwek. Promieniowe przemieszczanie narzędzi roboczych zsynchronizowane jest z osiowo przemieszczanym uchwytem szczękowym. Przyjęta trajektoria ich ruchu odpowiada zarysowi obwiedni kształtowanego elementu.

Walcowanie poszczególnych stopni odkuwki powodowane jest przez zagłębianie obracających się rolek stożkowych w materiale wsadowym przy jednoczesnym jego przemieszczaniu poprzez uchwyt czteroszczękowy. Mocowany jest poprzez tarczę umieszczoną na gwintowanym czopie trzpienia, osadzonego wewnątrz tulei w dwóch łożyskach stożkowych w środkowej części korpusu w wykonanym przelotowym otworze. Z drugiej strony tulei przymocowany jest czujnik tensometryczny pomiaru siły, w którego otworze zamocowano gwintowany obustronnie adapter do połączenia z wrzecionem siłownika elektrośrubowego, typu Parker ETH 100, który umieszczono w wykonanym otworze w płycie stojakowej za pomocą płyty pośredniej. W dwóch skrajnych ramionach płyty korpusu umieszczono tuleje ślizgowe osadzone w słupach prowadzących, umożliwiając osiowe przemieszczanie zespołu prowadzenia chwytaka (rys. 4.2).

Tabela 4.1. Parametry techniczne laboratoryjnej walcarki skośnej z trzema rolkami kształtującymi

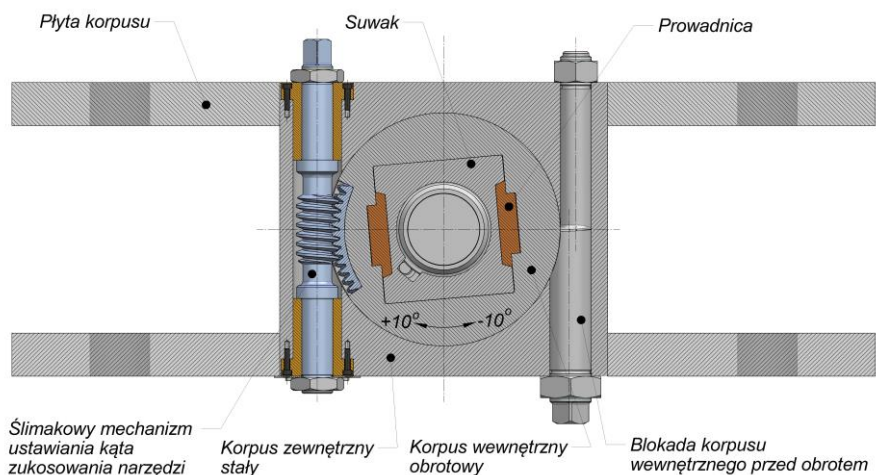
Walcarka laboratoryjna skośna		
Moc znamionowa silników	[kW]	3 x 7,5
Prędkość obrotowa narzędzi	[obr/min]	60
Maksymalny moment obrotowy	[Nm]	1200
Maks. siła siłownika osiowego	[kN]	50
Maks. siła nacisku narzędzi	[kN]	50
Maks. prędkość siłownika osiowego	[mm/s]	50
Maks. prędkość siłownika promieniowego	[mm/s]	50
Zakres regulacji kąta skręcenia narzędzi	[°]	± 10
Maks. wymiary wsadu	[mm]	Ø55 x 600
Minimalna średnica odkuwki	[mm]	25
Maksymalna długość odkuwki	[mm]	1000
Wymiary gabarytowe	[m]	5 x 2,5 x 2,5
Masa	[kg]	5000



Rys. 4.3. Klatka robocza walcarki skośnej z trzema rolkami kształtującymi

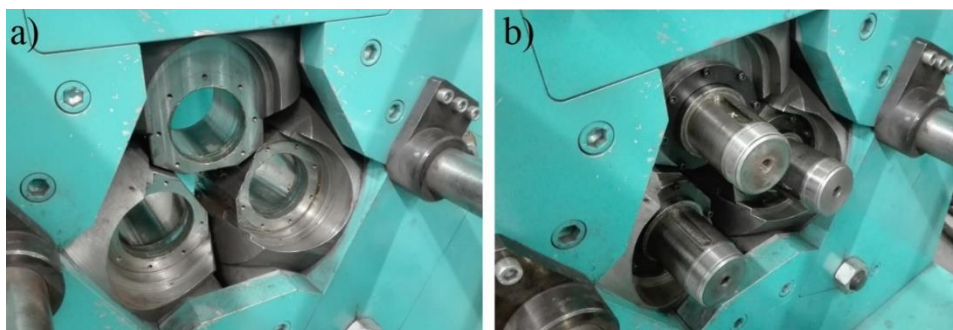
Podczas końcowego etapu walcowania zespół podtrzymania odkuwki przemieszcza się do osi walcowania zabezpieczając element obrabiany przed ewentualnym wyginaniem. Składa się on z zespołu głowicy podtrzymującej wyrób, tzw. stolika wykonanego z tulei i dwóch płyt, w których wykonano skrajne gniazda z osadzonymi w nich tulejami i umieszczonymi słupami prowadzącymi. Pod tuleją przymocowano tarczę pośredniczącą do połączenia z wrzecionem siłownika elektrycznego prądu stałego 24V DC, umożliwiając przesuw zespołu do podtrzymywania wyrobu w końcowym etapie walcowania. Dodatkowo dwa słupy umieszczono w tulejach prowadzących osadzonych w korpusie, który przymocowano do płyty podstawowej walcarki za pomocą dwóch słupów rurowych.

Proces kształtowania odkuwki następuje w klatce roboczej (rys. 4.3). Umieszczona jest ona w płycie podstawowej poprzez zestaw kołków oraz śrub mocowanych do ramy nośnej. Składa się z dwóch płyt stojakowych z symetrycznie zamontowanymi w ich centralnej części, co 120° względem osi wsadu trzema zespołami suwaków roboczych. Zbudowane są z korpusu zewnętrznego osadzonego w płytach klatki roboczej, wewnątrz którego w otworze cylindrycznym umieszczono obrotowy korpus wewnętrzny z wykonanym otworem o przekroju prostokątnym, w którym umieszczono suwak (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Mechanizm ustawczy do położenia kąтового rolki kształtującej

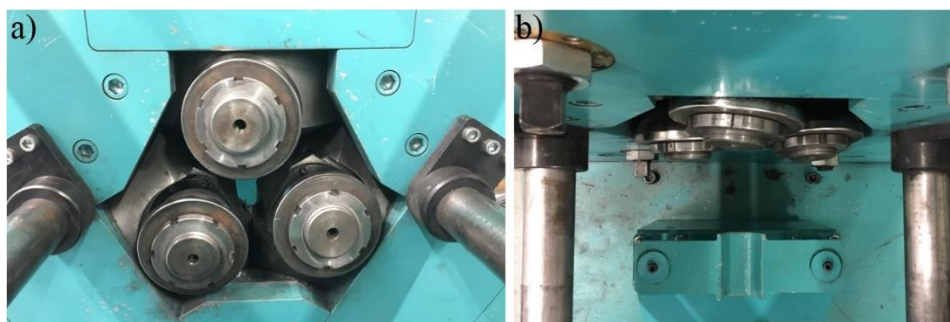
W górnej części suwaka znajduje się centralny otwór, w którym osadzono tensometryczny czujnik siły nacisku, a dalej do czujnika przymocowano obrotową, łożyskową głowicę. Do niej natomiast mocowany jest gwintowany trzpień wrzeciona promieniowego siłownika elektrośrubowego, który za pośrednictwem płyty mocującej zamontowany jest do korpusu zewnętrznego. Przeszczanie suwaka poprzez ruch siłownika do osi walcowania odbywa się za pomocą dwóch trapezowych prowadnic ślizgowych. W dolnej części trzech suwaków znajdują się przelotowe otwory położone prostopadłe do ich osi, w których osadzono wały narzędziowe w zespołach łożyskowych (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Przestrzeń robocza klatki walcowniczej: a) suwaki z otworami przelotowymi, b) suwaki z zamontowanymi wałami roboczymi

Na wysięgowych czopach wałów zamontowano rolki stożkowe unieruchomione poprzez wpusty przyzmatyczne i przymocowano za pomocą nakrętek dociskowych. Natomiast z drugiej strony wału narzędziowego na jego

skrajnym czopie osadzona jest tuleja kołnierzowa, do której mocowany jest wał przegubowy. Kątowe położenie rolek stożkowych względem osi walcowanego wsadu realizowane jest przez mechanizm ustawczy (rys. 4.4). Korpus wewnętrzny z zamontowanym suwakiem z osadzonymi wałami narzędziowymi obraca się poprzez wycinek ślimacznicy zamocowany na jego obwodzie, który zażębia się ze ślimakiem ustawczym, umieszczonym w jednym z dwóch wykonanych cylindrycznych otworów w korpusie zewnętrznym. Czopy ślimaka osadzono w tulejach ślizgowych i zabezpieczono przed przesuwem osiowym za pomocą dwóch nakrętek. Umożliwia to ustawienie położenia kątowego rolek stożkowych w zakresie $\pm 10^\circ$ (rys. 4.6). Ponadto w znajdującym się symetrycznie drugim cylindrycznym otworze osadzono trzpień mimośrodowy, służący do dodatkowego zabezpieczenia przed samoczynnym obrotem korpusu wewnętrznego, na którym na skrajnych gwintowanych czopach zamontowano nakrętki.



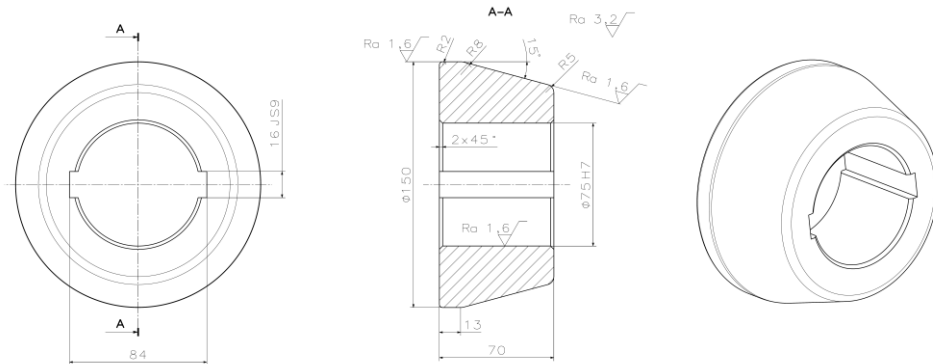
Rys. 4.6. Widok skośnego ustawienia rolek stożkowych: a) od uchwytu szczękowego, b) z góry

Kształtowanie wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych odbywa się poprzez zestaw trzech rolek stożkowych. Przygotowano trzy komplety różniące się kątem kształtującym, tj. $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ (rys. 4.7). Narzędzia wykonano ze stali narzędziowej w gatunku WCLV przeznaczonej do pracy na gorąco. Poddane zostały obróbce cieplnej, co umożliwiło osiągnięcie twardości o wartości w przedziale 48–50 HRC. W rolkach stożkowych można wyróżnić dwie strefy: kształtowania i kalibracyjną. W pierwszej z nich narzędzie o określonym kącie α zagłębia się w materiał na zadaną głębokość Δr , powodując redukcję średnicy wsadu d_0 do zakładanej średnicy odkuwki d_1 . W drugiej strefie charakteryzującej się powierzchnią walcową o określonej długości odcinka kalibracyjnego a następuje usuwanie powstałych w poprzedniej fazie procesu walcowania nieregularności kształtu wyrobu. Odbywa się to poprzez obciskanie obrotowe materiału na całej długości tej strefy, która dla każdego z narzędzi ma stałą wartość wynoszącą 13 mm (rys. 4.8). Ponadto zastosowano pierścienie dystansowe, które pełnią funkcje zarówno przekładki izolacyjnej minimalizującej nagrzewanie się wałów roboczych od rolek stożkowych odbierających ciepło

podczas kształtowania wsadu, jak również podkładki dystansowej umożliwiającej poprawne zamontowanie narzędzi na czopach wałów.



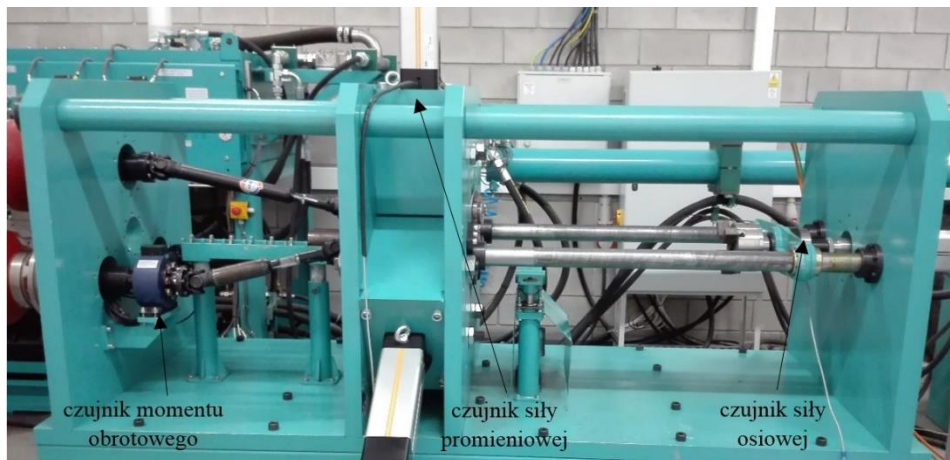
Rys. 4.7. Zestaw rolek stożkowych wraz z pierścieniami dystansowymi: a) $\alpha = 25^\circ$, b) $\alpha = 20^\circ$, c) $\alpha = 15^\circ$



Rys. 4.8. Przykładowe wymiary geometryczne rolki stożkowej ($\alpha = 15^\circ$)

Podczas procesu walcowania rejestrowana jest wartość momentu obrotowego za pomocą częstotliwościowego czujnika momentu obrotowego, typu BCM 1816, który przymocowano z jednej strony do tulei, którą osadzono na czopie motoreduktora, a z drugiej do wału przegubowego poprzez dedykowaną tarczę redukcyjną. Czujnik dodatkowo umieszczono na wsporniku, który przykręcono do wewnętrznej części płyty stojakowej. Ponadto rejestrowana jest siła ciągnąca uchwytu szętkowego za pomocą tensometrycznego czujnika siły typu ZEPWN CL 16U, osadzonego na wrzecionie siłownika elektrośrubowego. Dodatkowo

zastosowano czujnik siły typu ZEPWN CL16tm w jednym z suwaków w korpusie obrotowym, znajdującym się w klatce roboczej, który służy do pomiaru siły nacisku rolki narzędziowej podczas kształtowania materiału wsadowego (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Zestaw czujników zamontowanych w stanowisku badawczym

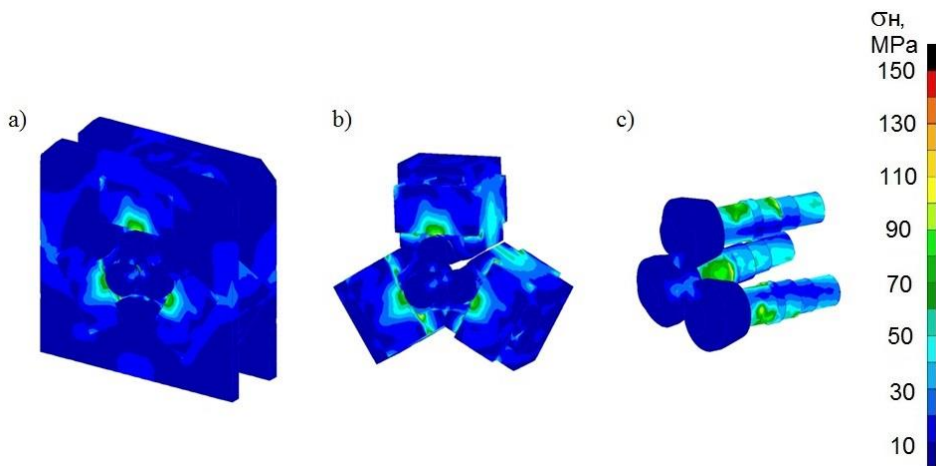
4.1.1. Analiza numeryczna walcarki skośnej z trzema rolkami kształtującymi

Przeprowadzono analizę numeryczną opracowanej konstrukcji pod względem warunków wytrzymałościowych oraz jej sztywności. Obliczenia wykonano dla zakresu liniowej charakterystyki wytrzymałości materiału w oprogramowaniu NX Nastran wykorzystującego metodę elementów skończonych. Po przeprowadzonej analizie wyników, stwierdzono, że najbardziej obciążonym zespołem jest klatka robocza walcarki. Jej sztywność i wytrzymałość mechaniczna ma bezpośredni wpływ na jakość kształtowanych wyrobów w postaci wydłużonych odkuwek, jak również na niezawodność pracy całej walcarki. Dlatego też w poniższej części pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej dla wspomnianego zespołu walcarki. Do obliczeń MES przyjęto, że poszczególne elementy klatki roboczej cechują się następującymi parametrami materiałowymi: liczba Poisson'a $\nu = 0,3$, moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa. Warunki brzegowe pomiędzy płytami stojakowymi klatki, elementami składowymi suwaków oraz siłownikami elektrośrubowymi opisano jako funkcję połączeń śrubowych, co odpowiada rzeczywistym połączeniom tych podzespołów. Pozostałe połączenia określono jako kontakt liniowy z zerowym przenikaniem i odstępem. Klatkę roboczą walcarki modelowano elementami czterowęzłowymi o wymiarach 2 mm. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla maksymalnych wartości obciążeń, przykładając siły skupione w kierunku promieniowym o wartości 50 kN do trzech rolek stożkowych zamocowanych na wysięgowych czopach wałów roboczych, zgodnie z kierunkiem przemieszczania się suwaków.

Siły przyłożono do powierzchni kalibrujących rolek, gdzie ich zwrot odpowiadał występującej sile oporu kształtowanego materiału podczas procesu. Ponadto do powierzchni stożkowych rolek przyłożono skupione siły osiowe zgodne z kierunkiem walcowania o wartościach 16,5 kN. Wartości poszczególnych sił działających na narzędzia określono na podstawie przeprowadzonych wstępnych obliczeń numerycznych procesu walcowania skośnego w oprogramowaniu Simufact Forming (wersja 15).

Na podstawie wykonanej analizy MES klatki roboczej wyznaczono rozkłady naprężeń zredukowanych, wg hipotezy Hubera–Misesa oraz rozkłady przemieszczeń jej poszczególnych podzespołów pod wpływem oddziaływania sił zewnętrznych. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 4.10 oraz 4.11.

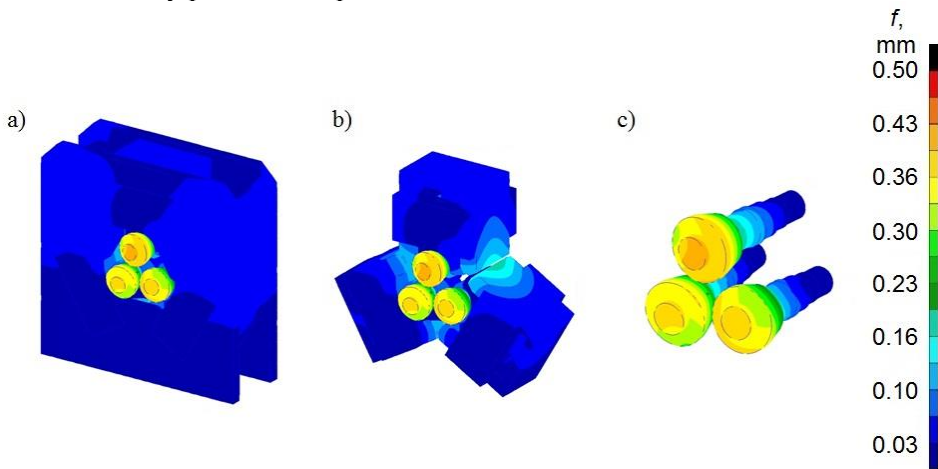
W wyniku otrzymanych wartości naprężeń zredukowanych przeanalizowano stopień wyczerpania materiału poszczególnych podzespołów oraz określono potencjalne możliwości przekroczenia granicy plastyczności elementów klatki roboczej. Najbardziej obciążone elementy konstrukcyjne to wały robocze, gdzie na czopach osadzono rolki stożkowe kształtujące materiał wyjściowy. Naprężenia zredukowane w obszarze podparcia uzyskują wartość 100 MPa. Materiał zastosowany do wykonania wałów to stal w gatunku 42CrMo4, której granica plastyczności wynosi $R_e = 900$ MPa. Tym samym oddziaływanie sił zewnętrznych podczas walcowania nie spowoduje trwałych odkształceń w tych podzespołach. Pozostałe zespoły klatki roboczej, tj. suwaki, korpusy wewnętrzne i zewnętrzne oraz płyty stojakowe obciążone są w znacznie mniejszym stopniu.



Rys. 4.10. Rozkłady naprężeń zredukowanych: a) klatka robocza, b) korpusy bez płyt stojakowych, c) wały robocze

Uzyskane dane z rozkładów przemieszczeń całkowitych podzespołów pozwalają na określenie sztywności klatki roboczej, która przekłada się na dokładność walcowanych odkuwek. Wysięgowe czopy wałów roboczych,

na których montowane są narzędzia kształtujące przemieszczają się o około 0,3 mm. Przedstawione odkształcenia sprężyste na podstawie obliczeń MES to sumaryczne wartości przemieszczeń stojaków, suwaków, korpusów oraz wałów. Uzyskana wartość ugięcia mieści się w obszarze tolerancji wykonania odkuwek na gorąco i nie wpływa znacząco na wykonanie końcowe wyrobu, ewentualnie spowoduje zwiększenie nadmiaru materiałowego na obróbkę skrawaniem. Ugięcie sprężyste czopów wałów wynika z przyjętej konstrukcji jednostronnego podparcia wałów i wysięgowego mocowania narzędzi roboczych. Przedstawione rozwiązanie pomimo zmniejszenia sztywności klatki roboczej, powoduje zwiększenie funkcjonalności walcarki w warunkach laboratoryjnych, ułatwiając częstą wymianę narzędzi przy przeprowadzanych próbach doświadczalnych w zakresie kształtowania zmiennych geometrii odkuwek, jak również analizy parametrów procesu.

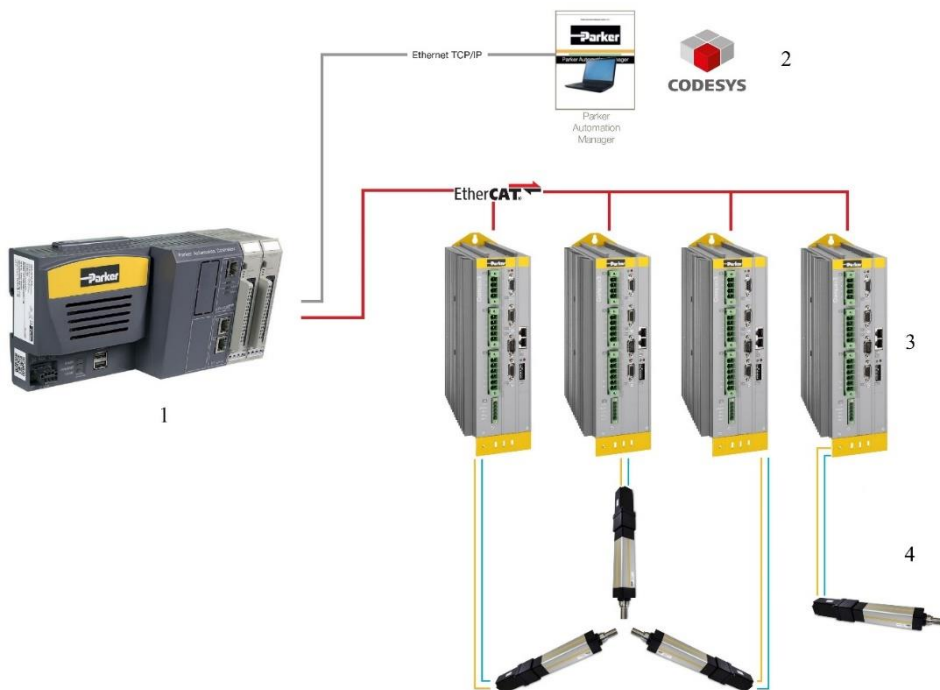


Rys. 4.11. Rozkłady przemieszczeń całkowitych: a) klatka robocza, b) korpusy bez płyt stojakowych, c) wały robocze

4.2. Sterowanie numeryczne

Kształtowanie odkuwek w laboratoryjnej walcierce skośnej z trzema rolkami stożkowymi dokonywane jest poprzez założoną sekwencję ruchów elektrośrubowych siłowników promieniowych oraz osiowego sterowanych poprzez nadrzędny, programowalny sterownik PAC (ang. *Parker Automation Controller*), wg schematu przedstawionego na rys. 4.12.

Wspomniany sterownik o wbudowanym procesorze Intel N2600 Dual Core wyposażony jest w zintegrowane środowisko programistyczne IDE (ang. *Integrated Development Environment*) o nazwie Parker Automation Manager (PAM) oparte na środowisku Codesys służącego do tworzenia aplikacji sterującej oraz wizualizacji zmian parametrów walcarki podczas kształtowania wyrobu [13].

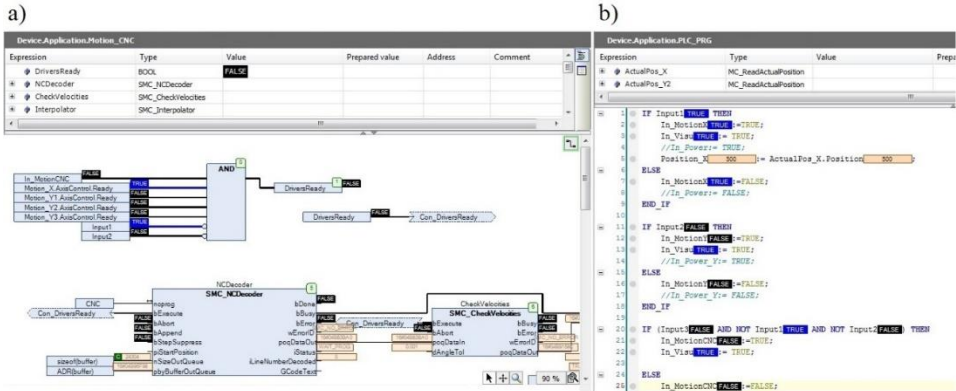


Rys. 4.12. Schemat sterowania numerycznego walcarką skośną: 1) sterownik PAC, 2) środowisko programistyczne PAM, 3) sterowniki osi (driver) Compax3S, 4) siłowniki elektrośrubowe ETH 100

Umożliwia ono wykorzystanie języków programowania, wg standardu IEC 61131-3, w tym tekstowych:

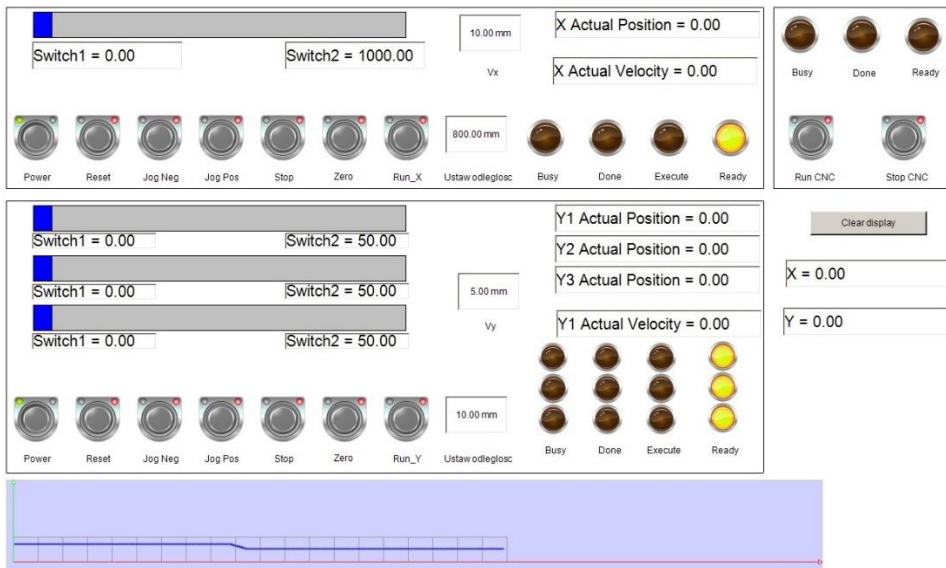
- IL – lista instrukcji (ang. *Instruction List*),
 - ST – tekst strukturalny (ang. *Structured Text*),
- oraz graficznych:
- LD – język drabinkowy (ang. *Ladder Diagram*),
 - FBD – język funkcjonalnych schematów blokowych (ang. *Function Block Diagram*),
 - SFC – sekwencyjny język graficzny (ang. *Sequential Function Chart*),
 - CFC – język bloków funkcyjnych (ang. *Continuous Function Chart*).

Sterownik PAC poprzez protokół komunikacyjny Ethernet TCP/ IP wymienia informację ze środowiskiem programistycznym PAM zainstalowanym w komputerze mobilnym (rys. 4.12). Aplikację sterującą ruchem siłowników elektrośrubowych wykonano w oparciu o język CFC oraz ST (rys. 4.13).



Rys. 4.13. Przykładowe fragmenty programów: a) język CFC, b) język ST

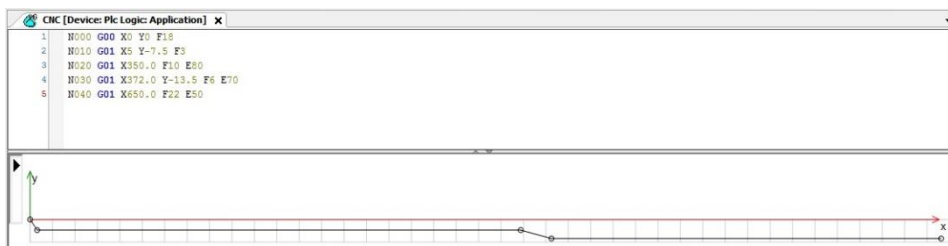
Podzielono go na kilka podprogramów, które ustawiono, wg hierarchizacji ich wykonywalności. Wstępnie program wykonawczy odczytuje sygnały wejściowe z poszczególnych przycisków dostępnych w aplikacji sterującej (rys. 4.14) inicjalizując uruchomienie poszczególnych sterowników osi, tzw. driverów Compax3S (rys. 4.12).



Rys. 4.14. Aplikacja do sterowania i kontroli walcarką skośną

Zwizualizowano również dane o aktualnej prędkości, pozycji tłoczyska siłownika, jak również stanie pracy poszczególnych driverów (*Busy* – wystąpienie komunikatu o błędzie sterowania, *Done* – osiągnięcie zadanej pozycji,

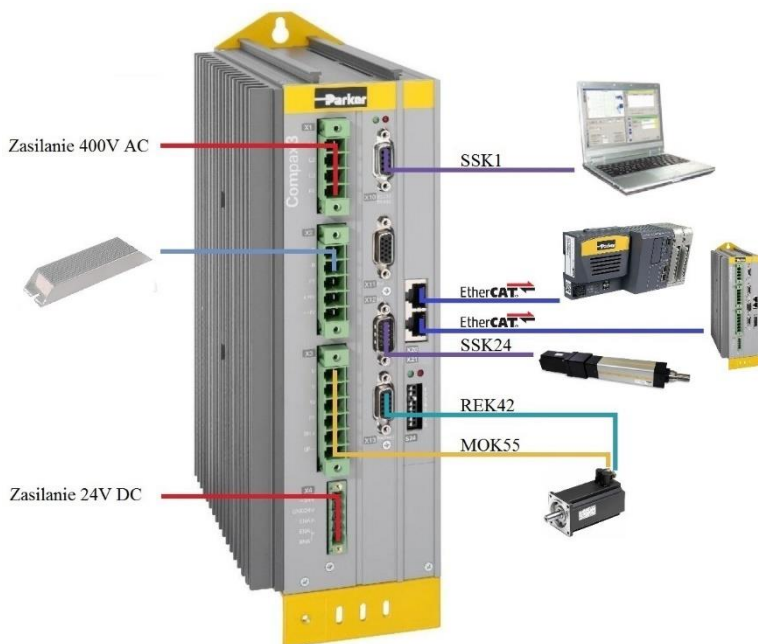
Execute – zrealizowanie przesunięcia siłownika, *Ready* – tryb oczekiwania po załączeniu zasilania dla Compax3S). W aplikacji dokonano podziału na sterowanie ręczne, w którym jest dostępne ustawianie parametrów, tj. przemieszczenia, prędkości posuwu dla siłowników elektrośrubowych, jak również pracę w trybie automatycznym realizującą założoną sekwencję posuwów siłowników bez ingerencji użytkownika. Tryb pracy ręcznej umożliwia wykonywanie niezależnych posuwów siłowników promieniowych umieszczonych w klatce roboczej oraz siłownika osiowego, w celu ustawienia ich pozycji początkowej do przeprowadzenia procesu walcowania oraz pozycji krańcowych umożliwiając przebrojenie wałów roboczych w inny zestaw rolek stożkowych. Pozycjonowanie siłowników odbywa się z wykorzystaniem przycisków mono i bistabilnych, w tym: *Power* – włączenie zasilania dla Compax3S, *Reset* – usuwanie komunikatów o błędach sterowania, *Jog Neg/ Jog Pos* – jednorazowe przemieszczenie siłownika o wartość -0,5 mm/ +0,5 mm, *Stop* – zatrzymanie pracy Compax3S, *Run_X/ Run_Y* – uruchomienie siłowników i ich przemieszczenie do zadanej pozycji. Cykl zautomatyzowanej pracy to ostatni podprogram odpowiedzialny za realizację zmiany położenia wszystkich siłowników na podstawie wygenerowanego wiersza poleceń w postaci G-code (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Przykładowy wiersz poleceń (G-code) w trybie pracy automatycznej

Po ustawieniu pozycji początkowej, uruchomienie pracy automatycznej odbywa się za pomocą przycisku *Run CNC*, powodując realizację poszczególnych linii kodu. W dowolnym momencie można przerwać pracę podzespołów poprzez przycisk *Stop CNC*. W aplikacji na bieżąco podczas walcowania następuje rysowanie przebytej ścieżki bazującej na pobieranych liniach poleceń G-code, nakreślając uzyskaną obwiednię kształtowanego detalu a jednocześnie przedstawiając postęp procesu. W przypadku stosowania dużych gniotów istnieje możliwość wykonania w jednym mocowaniu, co najmniej dwóch przejść umożliwiających zredukowanie przekroju poprzecznego do założonej wartości.

Komunikacja sterownika PAC z poszczególnymi driverami odbywa się za pomocą protokołu EtherCat, umożliwiając synchronizację pozycjonowania siłowników z dokładnością do 1µs. Każdy ze sterowników osi, tzw. driver (rys. 4.16) zasilany jest napięciem przemiennym o wartości 400V.



Rys. 4.16. Driver Compax3S z podłączeniami do portów

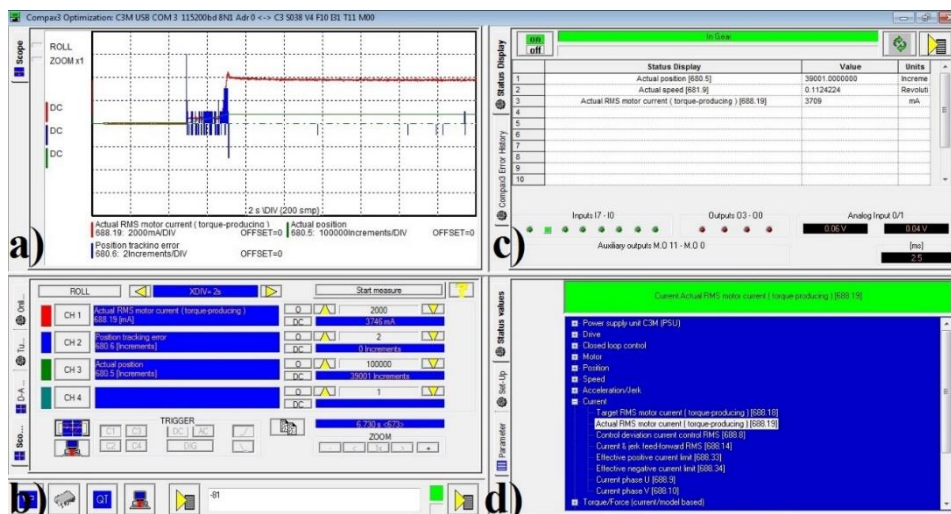
Poprzez przewód, typu MOK55 wspomniane zasilanie elektryczne przekazywane jest również do silnika servo w celu jego uruchomienia. Dodatkowo do driverów podłączane jest napięcie stałe o wartości 24V. Wykorzystywane jest do zasilania portów łączących się z modułami wejściowymi i wyjściowymi w postaci tranzystorowych czujników krańcowych PNP poprzez przewód typu SSK24 oraz układ sprzężenia zwrotnego, tj. resolverem będącym analogowym czujnikiem kąta obrotu wału silnika servo wykorzystując przewód typu REK42.

Sterownik osi, który odpowiada za posuw siłownika osiowego został dodatkowo wyposażony w rezystor hamowania, zaprezentowany na rysunku 5.16. W wyniku dynamicznej pracy, tj. przy szybkich zmianach przyspieszeń i hamowań silnika servo następuje wzrost napięcia w układzie prądu stałego, co w następstwie powoduje pojawienie się komunikatu z błędem o przekroczeniu dopuszczalnej wartości tego napięcia i wyłączenie drivera z użytkowania. Zadaniem wspomnianego rezystora hamowania jest rozproszenie powstałej dodatkowej energii z układu śrubowego siłownika zamieniając ją w ciepło. Nadmierny wzrost energii mechanicznej występuje najczęściej w przypadku, gdy prędkość osiowa walcowanego materiału wzrasta w stosunku do zaprogramowanego posuwu uchwytu zamontowanego na tłoczysku siłownika.

Każdy ze sterowników osi posiada konfigurowalne oprogramowanie sprzętowe (ang. *firmaware*) o nazwie C3 ServoManager2. Odczytu danych

dokonuje się za jego pomocą poprzez konwerter USB-RS232 i przewód typu SSK1. Konwerter umożliwia pobieranie danych z drivera, wykorzystującego łącze szeregowe typu RS232 i emulowanie tego sygnału poprzez chipset FTDI do portu USB w komputerze przenośnym. Umożliwia ono poprawne skonfigurowanie całego zestawu urządzeń, w tym drivera Compax3S oraz siłownika elektrośrubowego ETH poprzez odpowiednie ustawienie parametrów, m. in. maksymalną prędkość obrotową wału silnika servo oraz zastosowany jego rodzaj, maksymalną wartość natężenia prądu sterownika osi, dopuszczalny błąd pozycjonowania tłoczyska oraz czas jego trwania, reakcja układu na pojawiające się błędy przesterowania [94].

Do analizy poprawności działania Compax3S oraz wprowadzania zmian parametrów w czasie rzeczywistym służy jeden z modułów wspomnianego oprogramowania, tj. „Compax3 Optimization”, którego wygląd przedstawiono na rysunku 4.17.

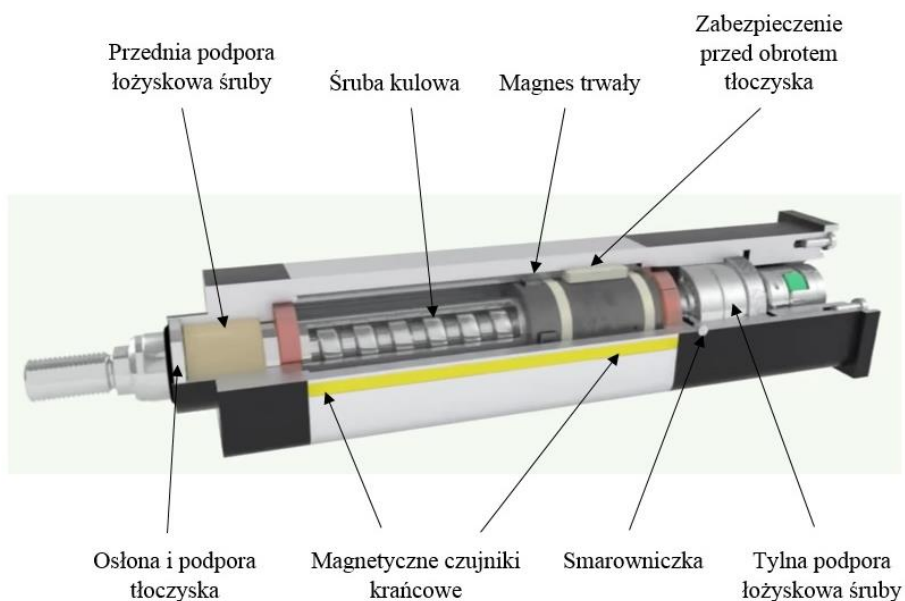


Rys. 4.17. Oprogramowanie sprzętowe dla Compax3S

Okno programu podzielone jest na cztery moduły, w których w jednym z nich (rys. 4.17a) można wyróżnić oscyloskop odpowiadający za wizualizację poszczególnych parametrów. Poniżej (rys. 4.17b), znajduje się moduł z możliwością wyboru parametrów dla danego kanału pomiarowego, np. wartość skuteczna prądu silnika, aktualna pozycja, błąd pozycjonowania. Dodatkowo ustawieniom podlega czas próbkowania sygnałów oraz przelicznika działek danego kanału na ekranie oscyloskopu na wartość mierzonej jednostki. Ponadto moduł ten umożliwia ustawienie parametrów, m. in. feed-forward, damping, stiffness, które poprzez bezpośrednią regulację pracy silnika servo wpływają na jakość posuwu tłoczyska. Jedno z kolejnych okien (rys. 4.17d) odpowiada za

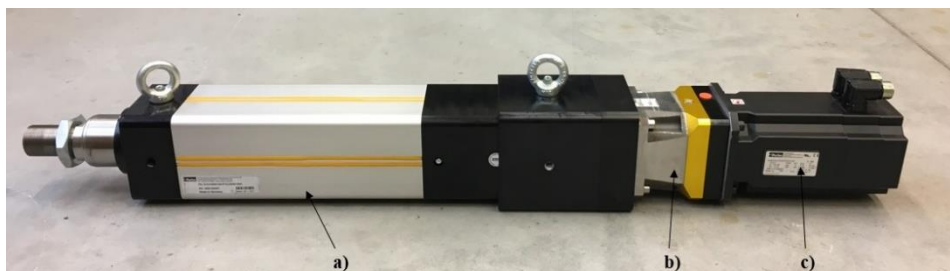
włączanie silnika servo z opcją wyboru kierunku i prędkości obrotu. Umożliwia ono również wybór konkretnych parametrów opisujących pracę silnika, których wartości wyświetlane są w ostatnim module (rys. 4.17c). W nim również przedstawiane są komunikaty o zaistniałych błędach w wyniku przesterowania układu napędowego.

Zadaną sekwencję pracy przez sterownik PAC realizuje się poprzez zastosowane siłowniki elektrośrubowe o nazwie Parker ETH 100, których skok w przypadku siłowników promieniowych wynosi 150 mm, a osiowego 1000 mm (rys. 4.18). Posuw wzdłużny tłoczyska odbywa się w wyniku ruchu obrotowego śruby, która przemieszcza kulki stalowe umieszczone w nakrętce po specjalnie przygotowanych bieżniach. Dodatkowo zastosowany mechanizm umożliwia przekierowanie kulek z końca nakrętki na początek bieżni. Korpus siłowników wykonano z wyciskanego profilu aluminiowego posiadającego specjalnie przygotowane kanały, wewnątrz których umieszczono magnetyczne, tranzystorowe czujniki krańcowe, typu PNP NO oraz PNP NC. Podczas przemieszczania nakrętki po śrubie pociągowej następuje również posuw magnesu trwałego, który powoduje wzbudzenie czujników, umożliwiając określenie pozycji krańcowych tłoczyska.



Rys. 4.18. Przekrój siłownika elektrośrubowego Parker ETH

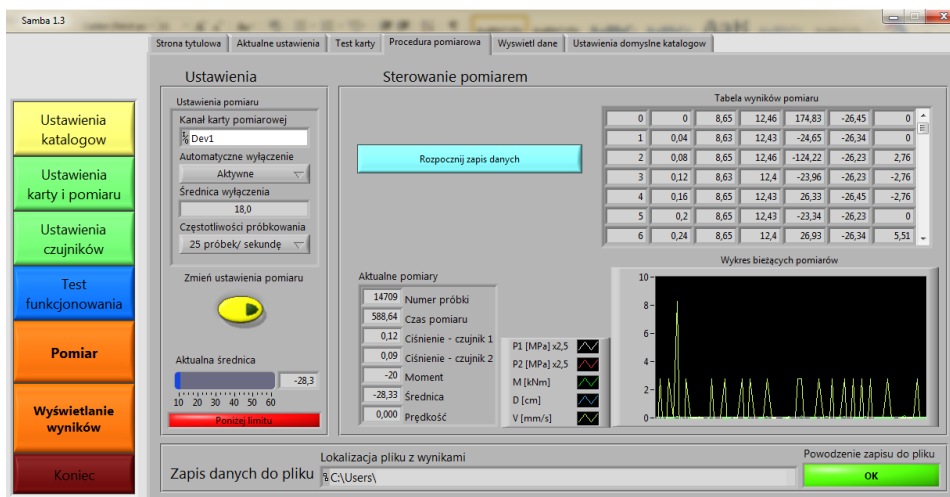
Ruch obrotowy śruby kulowej jest wynikiem pracy bezszczotkowego silnika servo, typu SMH 115 oraz przekładni planetarnej, typu PS 115. Połączenie szeregowe wymienionych podzespołów (rys. 4.19) umożliwia uzyskanie siły pchającej i ciągnącej o wartości maksymalnej 52,4 kN.



Rys. 4.19. Połączenie komponentów: a) siłownik elektrośrubowy, b) przekładnia planetarna, c) bezszczotkowy silnik servo

Silnik servo zasilany napięciem przemiennym 400 V obraca wałem z maksymalną prędkością kątową ω wynoszącą 314 rad/s. Poprzez przekładnię o przełożeniu 10:1 i sprzęgło kłowe z łącznikiem gumowym przenoszą moment obrotowy na siłownik elektrośrubowy o wartości 92,3 Nm.

Poza układem sterującym pracą walcarki, stanowisko badawcze wyposażono w układ pomiarowy oparty o graficzne środowisko programistyczne LabVIEW (rys. 4.20).



Rys. 4.20. Interfejs aplikacji Samba 1.3 sterującej układem pomiarowym

Celem była rejestracja parametrów siłowych poprzez czujniki siły nacisku znajdujące się w jednym z suwaków klatki walcowniczej oraz pomiędzy uchwytem mocującym wsad a tłoczyskiem siłownika osiowego oraz czujnik momentu obrotowego zamontowany na jednym z wałów wyjściowych z motoreduktora generujący ruch obrotowy narzędzi roboczych. Rejestracja wyników odbywała się poprzez zastosowanie graficznego interfejsu,

umożliwiając zapisywanie wyników z prac doświadczalnych do pliku edytowalnego, typu *csv*.

Część sprzętową układu oparto o moduł akwizycji National Instruments USB-6008, który połączono do przenośnego komputera za pomocą interfejsu USB (rys. 4.21).



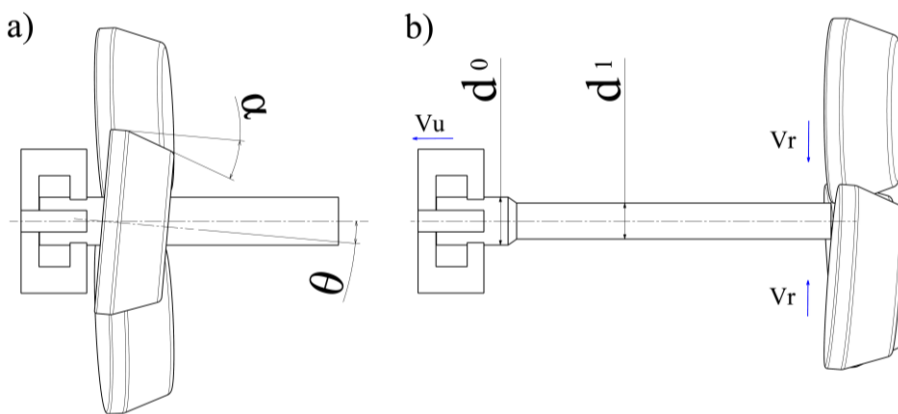
Rys. 4.21. Układ pomiarowy stanowiska badawczego – część sprzętowa

Do pomiarów siły osiowej oraz promieniowej wykorzystano dwa wejścia analogowe umożliwiające podłączenie tensometrycznych czujników siły, typu ZEPWN CL16U oraz ZEPWN CL 16tm o maksymalnych zakresach pracy do 50 kN, zasilanych napięciem stałym 10V. Dodatkowo zastosowano wzmacniacze pomiarowe, których zadaniem jest zwiększenie wartości sygnałów wychodzących bezpośrednio z czujników charakteryzujących się małą czułością, umożliwiając selektywne wzmocnienie sygnału użytkowego pomijając szumy i zakłócenia i tym samym przygotowanie do wejść analogowych modułu akwizycji NI USB-6008. Oba wykorzystane wejścia analogowe modułu pracują niezależnie w trybie niesymetrycznym RSE względem zacisku masy GND. Pomiar napięcia z czujników dokonywany jest poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy ADC o rozdzielczości 12 bitów z maksymalną szybkością próbkowania do 10 kS/s (zmniejsza się proporcjonalnie do liczby uaktywnionych kanałów wejściowych). Pomiar momentu obrotowego dokonano poprzez bezkontaktowy, częstotliwościowy czujnik, typu BCM 1816 o maksymalnym zakresie pracy do 1000 Nm zasilany napięciem stałym 15V. Sygnał wyjściowy w postaci impulsów prostokątnych o wartości $\pm 6V$ i częstotliwości od 5 do 15 kHz w zależności od momentu obrotowego rejestrowano poprzez wejście cyfrowe PFI (ang. *Programmable Function Interface*) dołączone do mikrokontrolera sterującego pracą modułu, zliczające impulsy dla licznika o pojemności 32 bitów.

5. Badania doświadczalne

5.1. Zakres prac badawczych

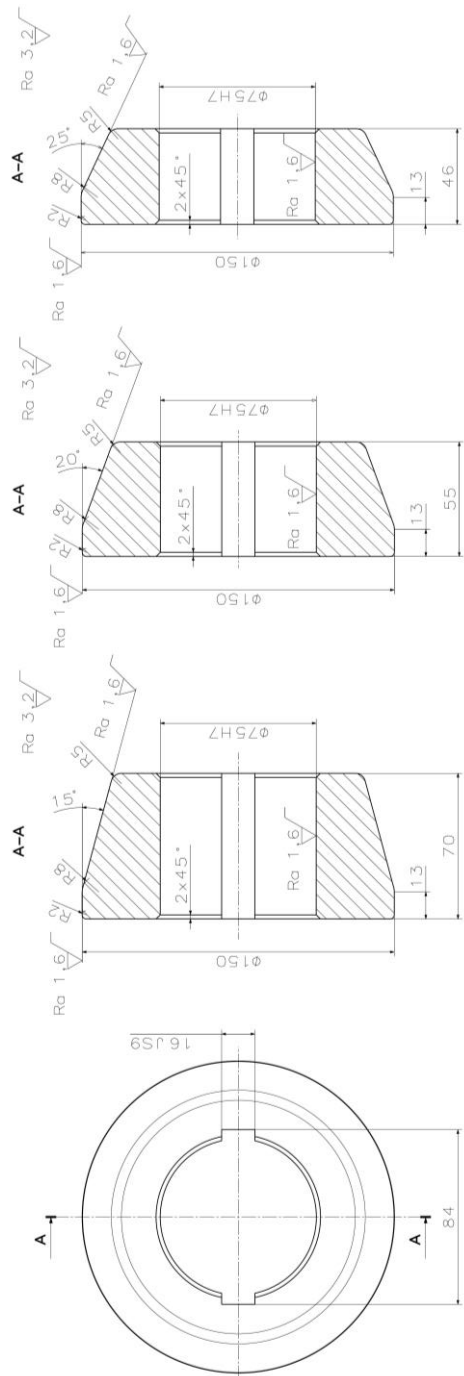
Prace badawcze w zakresie walcowania skośnego, którego schemat procesu przedstawiono na rysunku 5.1 realizowano z wykorzystaniem trzech zestawów rolek stożkowych. Celem prac doświadczalnych było określenie wpływu zmian parametrów walcowania na jakość otrzymywanych odkuwek oraz uzyskiwane parametry siłowe.



Rys. 5.1. Schemat procesu walcowania skośnego rolkami stożkowymi:
a) początek procesu, b) koniec procesu

Każdy komplet narzędzi różni się kątem kształtującym α (15° , 20° , 25°). Podstawowe wymiary rolek przedstawiono na rysunku 5.2. Zestawy charakteryzują się zmienną strefą kształtowania poprzez wspomniany kąt α oraz identyczną częścią kalibracyjną, o stałej długości odcinka walcowego równego 13 mm.

Rolki stożkowe ustawiano pod zmiennym kątem θ ($2,5^\circ$, 5° , $7,5^\circ$) względem osi walcowanego materiału (rys. 5.1). Dla każdego zamocowanego zestawu narzędzi na czopach wałów roboczych o określonym kącie α i ustalonym kącie zukosowania rolek stożkowych θ przeprowadzano proces walcowania, stosując trzy różne prędkości liniowe uchwytu szczękowego V_u , tj. 10 mm/s, 20 mm/s, 40 mm/s.



Rys. 5.2. Wymiary geometryczne rolek stożkowych

Dla każdej zastosowanej prędkości liniowej kształtowano odkuwki, stosując trzy różne wartości stopni gniotów, tj. $\delta = 1,13$, $\delta = 1,3$, $\delta = 1,53$, wg:

$$\delta = \frac{d_0}{d_1}, \quad (5.1)$$

gdzie:

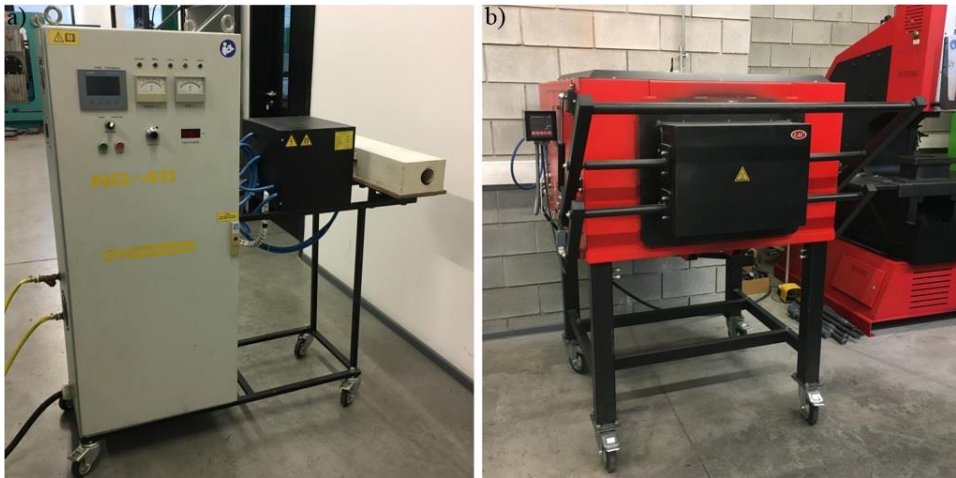
d_0 – średnica wsadu,

d_1 – średnica walcowanego stopnia odkuwki.

Tabela 5.1. Zestawienie ustawień dla prób doświadczalnych walcowania skośnego

α [°]	θ [°]	Prędkość osiowa V_u [mm/s]	Stopień gniotu δ [-]
15 lub 20 lub 25	2,5	10	1,13
			1,3
			1,53
		20	1,13
			1,3
			1,53
		40	1,13
			1,3
			1,53
	5	10	1,13
			1,3
			1,53
		20	1,13
			1,3
			1,53
		40	1,13
			1,3
			1,53
7,5	10	1,13	
		1,3	
		1,53	
	20	1,13	
		1,3	
		1,53	
	40	1,13	
		1,3	
		1,53	

W pracach badawczych, jako materiał wyjściowy podczas walcowania stosowano pręt stalowy w gatunku C60 o średnicy $d_0 = 52$ mm i długości $l_0 = 330$ mm. Próbki badawcze wstępnie nagrzewano w nagrzewnicy indukcyjnej typu NG-40 (rys. 5.3a) o mocy 40 kW, wykorzystującej otwarty układ chłodzenia cieczą wzbudnika, będącego w postaci cewki cylindrycznej. Urządzenie wyposażone w układ sterowania oparty na sterowniku PLC Siemens umożliwia wykrycie temperatury Curie, unikając utraty właściwości magnetycznych pręta stalowego poprzez regulowanie pracą przekładni transformatorów. W związku z ograniczeniami nagrzewnicy powodującymi, że końce prętów nie osiągają zadanej temperatury przeprowadzanie równomiernego wygrzewania próbek badawczych w całej ich objętości w temperaturze $T = 1200^{\circ}\text{C}$ uzyskano wykorzystując piec komorowy, oporowy typu LAC PK55 (rys. 5.3b).



Rys. 5.3. Urządzenia do nagrzewania wsadu: a) nagrzewnica indukcyjna NG-40, b) piec komorowy LAC PK55

5.2. Analiza uzyskanych wyników

Dokonano pomiarów jakości uzyskanej powierzchni odkuwek klasyfikując ją poprzez parametr falistości W_r . Ponadto analizie poddano wymiary geometryczne przekroji poprzecznych próbek badawczych uzyskanych z badań laboratoryjnych i odniesiono do zarysu teoretycznego. Przeanalizowano również parametry siłowe występujące podczas procesu kształtowania, tj. siły osiowe i promieniowe oraz momenty obrotowe dla każdego przyjętego wariantu walcowania.

5.2.1. Struktura geometryczna powierzchni odkuwek

Charakteryzująca warstwę wierzchnią struktura geometryczna powierzchni obejmująca wzniesienia i zagłębienia na tej powierzchni uwzględnia ich kształt, wymiary i rozmieszczenie. Określa budowę powierzchni zewnętrznej odkuwki, w tym m.in. falistość, chropowatość oraz wady, jak rysy, pęknięcia czy wżery. Analizę struktury warstwy wierzchniej poprzez pomiar falistości dokonano na poziomie makroskopowym. Wspomniany parametr wyodrębniono z profilu pierwotnego, opierającego się na wartości stosunku średniej szerokości elementów profilu $X_{s\dot{s}r}$ do ich wysokości $Z_{t\dot{s}r}$ w okresowo powtarzających się nierównościach powierzchniowych (rys. 5.3), wyrażonych wzorem:

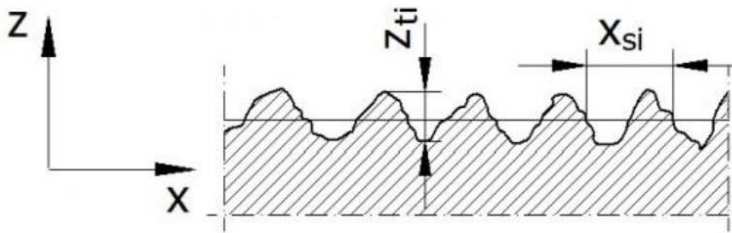
$$X_{s\dot{s}r} = \frac{\sum_{i=1}^m x_{si}}{m}, \quad (5.2)$$

$$Z_{t\dot{s}r} = \frac{\sum_{i=1}^m z_{ti}}{m}, \quad (5.3)$$

gdzie:

- x_{si} – szerokość poszczególnych elementów profilu,
- z_{ti} – wysokość poszczególnych elementów profilu,
- m – liczba elementów profilu.

Wartość tego stosunku dla falistości powierzchni wynosi $40 \leq \frac{X_{s\dot{s}r}}{Z_{t\dot{s}r}} > 1000$, natomiast dla porównania dla chropowatości jest to $\frac{X_{s\dot{s}r}}{Z_{t\dot{s}r}} < 40$.



Rys. 5.3. Profil powierzchni [97]

Parametr profilu, tj. falistość W określa się względem umownie przyjętej linii odniesienia mającej kształt profilu nominalnego przyjmowanej, jako linię średnią odpowiadającą składowym długofalowym profilu, które tłumione są filtrem profilu λ_f . Parametr wyznacza się na długości odcinka elementarnego profilu falistości l_w , który liczbowo jest równy charakterystycznej długości fali filtra λ_f . Ocena profilu powierzchni dokonywana zostaje na odcinku pomiarowym l_n definiowanym, jako długość na osi położonej w kierunku linii średniej zawierającej jeden lub kilka odcinków elementarnych [97].

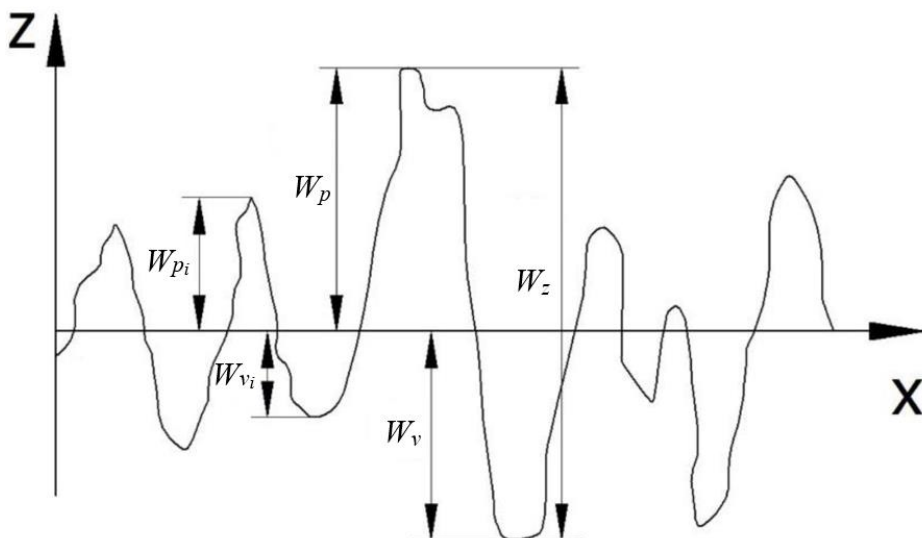
Analizę struktury geometrycznej powierzchni odkuwek oparto o parametry pionowe obejmujące wysokości wzniesień i głębokości wgłębień profilu falistości oznaczone symbolem W (rys. 5.4). Profil opisano poniższymi parametrami, gdzie:

W_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu (odległość od najwyższego położonego punktu najwyższego wzniesienia profilu W_p do linii średniej (osi X) wewnątrz odcinka elementarnego),

W_v – głębokość najniższego wgłębienia profilu (odległość od najniższego położonego punktu najniższego wgłębienia profilu W_v do linii średniej (osi X) wewnątrz odcinka elementarnego),

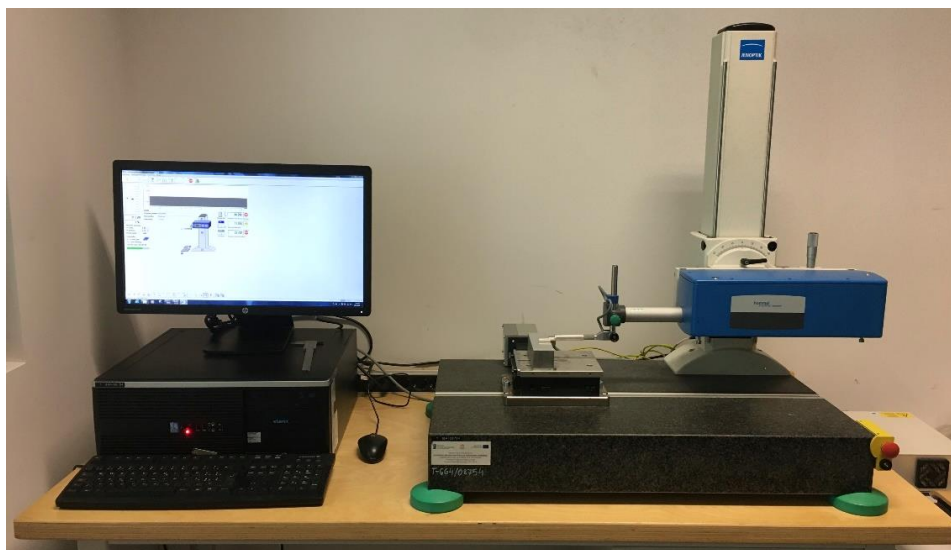
W_z – największa wysokość profilu (suma wysokości najwyższego wzniesienia profilu W_p oraz głębokości najniższego wgłębienia profilu W_v wewnątrz odcinka elementarnego),

W_t – całkowita wysokość profilu (suma wysokości najwyższego wzniesienia profilu W_p i głębokości najniższego wgłębienia profilu W_v wewnątrz odcinka pomiarowego).



Rys. 5.4. Profil falistości powierzchni: W_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu, W_v – głębokość najniższego wgłębienia profilu, W_z – największa wysokość profilu, W_{p_i} – wysokość i -tego wzniesienia, W_{v_i} – głębokość i -tego wgłębienia [97]

Badanie profilu falistości powierzchni odkuwek dokonano metodą stykową, wykorzystując profilografometr Hommel-Etamic 3D T8000 RC120-400 (rys. 5.5).



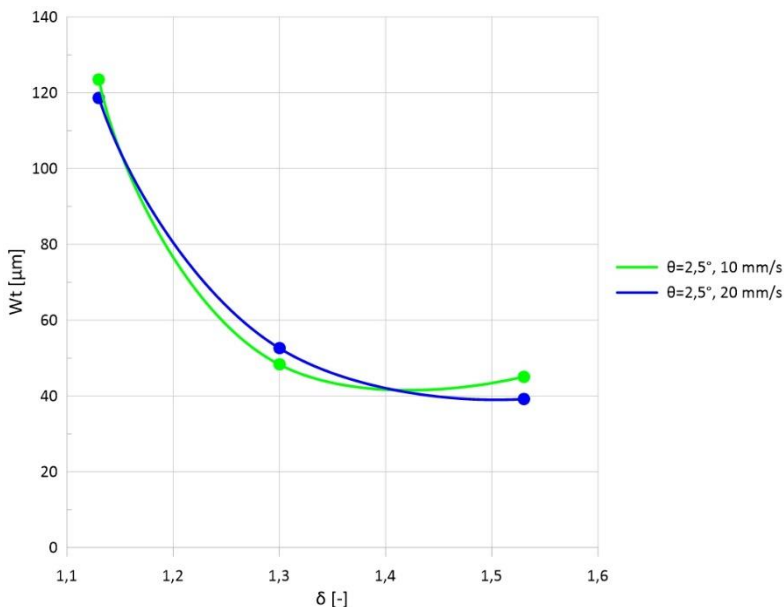
Rys. 5.5. Profilografometr Hommel-Etamic 3D T8000 RC120-400

Urządzenie o budowie modułowej składającej się z głowicy pomiarowej z zespołami napędowymi do posuwu wzdłuż pionowej kolumny (oś Z) i kierunku pomiaru (oś X) oraz przesuwnego stolika, na którym umieszczano poszczególne próbki badawcze do przemieszczania w kierunku prostopadłym do ruchu końcówki pomiarowej (oś Y). Wszystkie ustawienia pozycji, parametrów pomiarowych oraz rejestrowanie wyników wykonywano poprzez wykorzystanie dedykowanego oprogramowania, tj. Hommel-Etamic Turbo Wave v7.55.

Pomiar realizowano końcówką pomiarową typu TKU300 w postaci igły diamentowej, stykającej się bezpośrednio z powierzchnią badanej próbki. Ruch igły w kierunku pionowym przekształcany jest przez przetwornik w sygnał elektryczny a następnie w cyfrowy. Oceny profilu falistości W dokonywano na odcinku pomiarowym l_n równym 48 mm ze stałą prędkością posuwu V_i igły pomiarowej wynoszącą 1 mm/s. Natomiast długości odcinków elementarnych l_w ustalono o wartości 0,8 mm. Dobór poszczególnych parametrów pomiarowych dokonywano zgodnie z normą PN-EN ISO 4287:1999.

Na rysunkach 5.6–5.17 przedstawiono rozkłady wartości parametru falistości W_i dla poszczególnych przerobów plastycznych, tj. $\delta = 1,13$, $\delta = 1,3$ oraz $\delta = 1,53$, jak również wybrane przykłady otrzymanych powierzchni zewnętrznych odwalcowanych próbek badawczych. W celu dokładniejszej wizualizacji zaistniałych zmian zastosowano wykresy punktowe łączone wygładzonymi liniami ze znacznikami.

Najpierw analizie poddano próbki badawcze uzyskane po walcowaniu rollkami stożkowymi o kącie kształtującym α równym 15° .

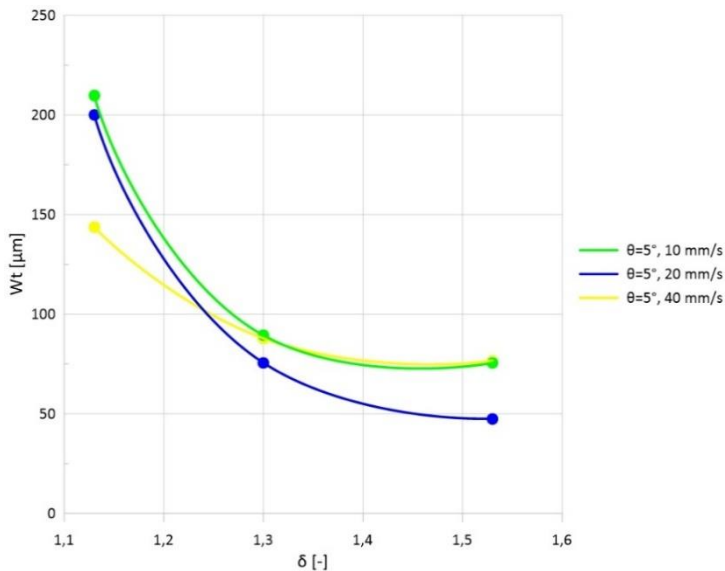


Rys. 5.6. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)

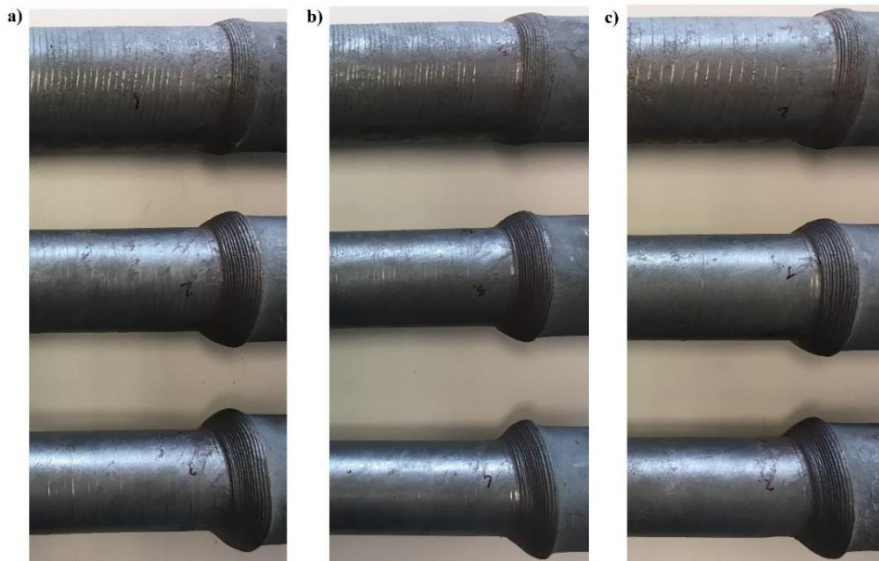
Na rysunku 5.6 przedstawiono wartości falistości powierzchni odkuwek, które walcowano narzędziami zukosowanymi pod kątem $\theta = 2,5^\circ$. Próby badawcze zrealizowano dla trzech prędkości, jednakże przedstawiono wyłącznie wyniki dla $V_u = 10$ mm/s oraz 20 mm/s. W przypadku prędkości uchwytu równej 20 mm/s podczas walcowania materiału przy $\delta = 1,53$ następowało powolne wysuwanie kształtowanego pręta z uchwytu szczękowego. Takiego zjawiska nie zaobserwowano przy mniejszej prędkości $V_u = 10$ mm/s. W przypadku prędkości 40 mm/s przy ustawionym małym kącie zukosowania narzędzi θ , nie było możliwości przeprowadzenia rzetelnych prób doświadczalnych, czego powodem było wysuwanie się pręta stalowego z uchwytu od razu po rozpoczęciu procesu walcowania. Pojawiające się ograniczenie w procesie jest wynikiem występowania różnicy prędkości liniowej walcowanego materiału wynoszącej 20,5 mm/s i prędkości przemieszczania uchwytu ($V_u = 40$ mm/s), w którym mocowany jest pręt.

Widoczna jest również tendencja zmniejszania wartości falistości wraz ze wzrostem stopnia gniotu, co przekłada się na uzyskiwaną powierzchnię odkuwek a konkretnie na poprawę jej jakości. Dla prędkości 10 mm/s wartość ta zmniejszyła się o 64% przy $\delta = 1,53$ w stosunku do falistości przy stopniu gniotu $\delta = 1,13$. Przy prędkości uchwytu 20 mm/s uzyskano podobny rezultat, osiągając wartość niższą o 67%.

Na kolejnym wykresie (rys. 5.7) przedstawiono wyniki wartości falistości przy zukosowaniu rolek stożkowych względem osi walcowania pod kątem $\theta = 5^\circ$, natomiast na rysunku 5.8 powierzchnię zewnętrzną uzyskanych odkuwek.



Rys. 5.7. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)



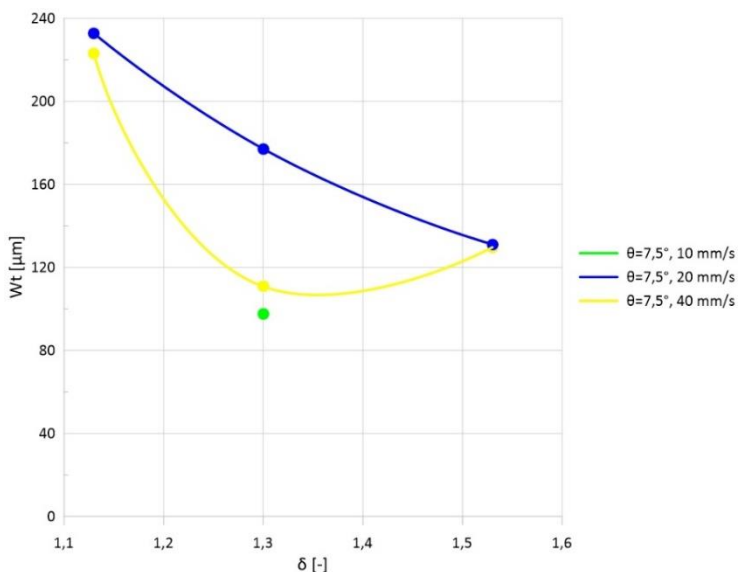
Rys. 5.8. Powierzchnia zewnętrzna próbek badawczych dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 5^\circ$) przy zwiększającym się stopniu gniotu od $\delta = 1,13$ do $\delta = 1,53$ (patrzac od góry):

a) $\alpha = V_u = 10 \text{ mm/s}$, b) $V_u = 20 \text{ mm/s}$, c) $V_u = 40 \text{ mm/s}$

Dla wszystkich prędkości przemieszczania uchwytu przy najmniejszym przerobie plastycznym $\delta = 1,13$ parametr falistości uzyskuje największe wartości. Porównując je do otrzymanych wartości przy kącie zukosowania $\theta = 2,5^\circ$ zauważa się, że wzrosły o 41% zarówno dla prędkości uchwytu równego 10 mm/s jak i 20 mm/s. Zwiększenie redukcji przekroju poprzecznego próbek badawczych powoduje zmniejszenie falistości powierzchni odkuwek o 64% przy $V_u = 10$ mm/s, 76% przy $V_u = 20$ mm/s oraz 47% przy $V_u = 40$ mm/s.

W przypadku walcowania przy kącie zukosowania narzędzi $\theta = 5^\circ$ występuje ograniczenie procesu, w którym przy małej prędkości uchwytu $V_u = 10$ mm/s i dla stopnia gniotu $\delta = 1,13$ oraz 1,3 następuje przepychanie uchwytu szczękowego przez walcowany materiał wsadowy. Przyczyną wywołującą to zjawisko jest zwiększona prędkość liniowa walcowanego materiału wynosząca 41,1 mm/s w stosunku do zadanej prędkości przepychanego uchwytu, tj. 10 mm/s. Przy najmniejszym stopniu gniotu $\delta = 1,13$ podczas walcowania z $V_u = 20$ mm/s pojawiały się również próby przepchnięcia uchwytu szczękowego poprzez zwiększoną prędkość osiową kształtowanego pręta stalowego. Zwiększenie przerobu plastycznego materiału do $\delta = 1,3$ oraz 1,53, jak również prędkości V_u do 40 mm/s powodowało uniknięcie omawianych ograniczeń procesu walcowania.

Otrzymane wartości parametru falistości W_t dla największego kąta zukosowania $\theta = 7,5^\circ$ dla rolek stożkowych o kącie kształtującym α równym 15° przedstawiono na rysunku 5.9.

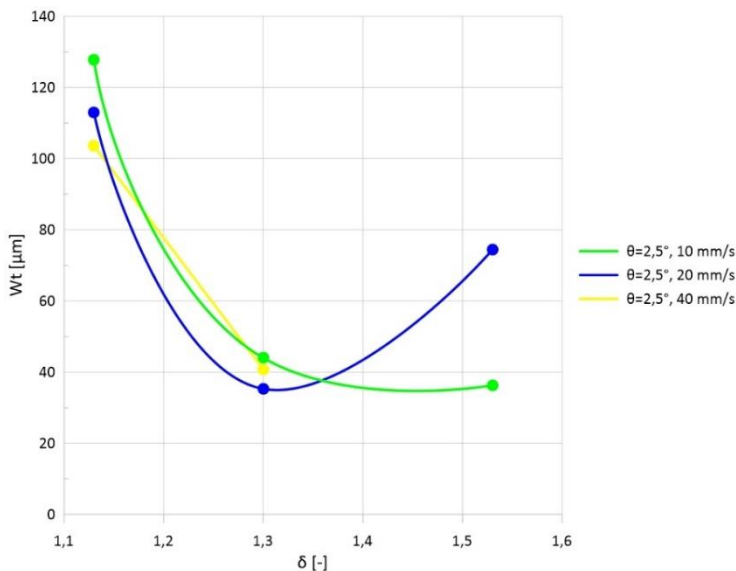


Rys. 5.9. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Uzyskano głównie wyniki dla prędkości $V_u = 20$ mm/s oraz 40 mm/s. Przy zwiększonej redukcji poprzecznej próbek badawczych ze średnicy nominalnej pręta $\varnothing 52$ mm aż do $\varnothing 34$ mm ($\delta = 1,53$) następuje zmniejszenie falistości powierzchni otrzymywanych odkuwek. Przy prędkości przemieszczania uchwytu równej 20 mm/s wartość wspomnianego parametru zmniejszyła się o 44%, natomiast w przypadku $V_u = 40$ mm/s o 42% w stosunku do pomiarów falistości próbek przy pierwszym stopniu gniotu $\delta = 1,13$.

Na rysunku 5.9 przedstawiono tylko jeden pomiar dokonany przy prędkości osiowej równej 10 mm/s dla uchwytu szczękowego, w którym mocowany jest materiał wsadowy. Podobnie jak w przypadku wcześniejszego zukosowania narzędzi ($\theta = 5^\circ$) występuje zjawisko przepchnięcia uchwytu szczękowego przez walcowany materiał wsadowy. Przyczyną ograniczającą walcowanie jest większa prędkość liniowa kształtowanego pręta stalowego wynosząca 61,5 mm/s niż zadana prędkość osiowa uchwytu z przemieszczającym się wsadem. Również przy zadanej prędkości $V_u = 20$ mm/s wystąpiło wspomniane zjawisko ograniczające proces dla realizowanych trzech stopni gniotu.

Kolejny zestaw rolek stożkowych, które wykorzystano podczas prób doświadczalnych miał kąt kształtujący α równy 20° .



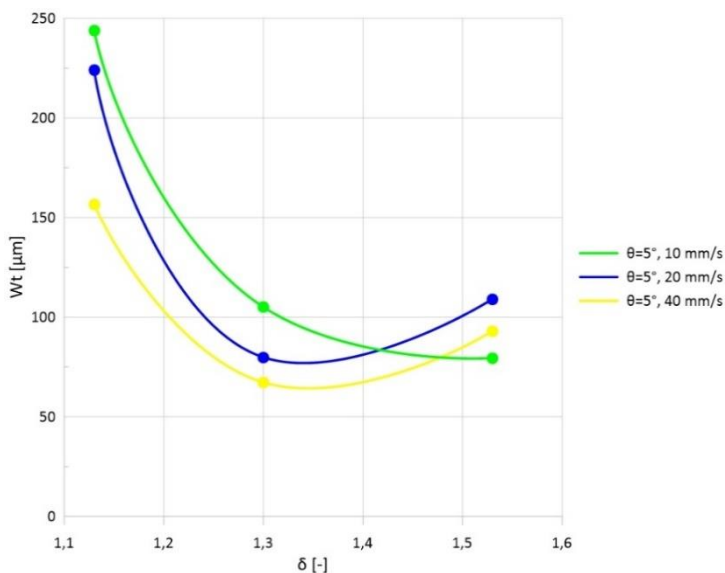
Rys. 5.10. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)

Na rysunku 5.10 zaprezentowano wartości falistości otrzymanych odkuwek po walcowaniu przy zukosowaniu narzędzi pod kątem $\theta = 2,5^\circ$. Zwiększenie stopnia przerobu plastycznego materiału wpływa na obniżenie parametru W_t , co w konsekwencji przekłada się na jakość otrzymywanej powierzchni. Przy

prędkości przemieszczania uchwytu równej 10 mm/s wartości falistości zmniejszyły się o 72% natomiast przy 20 mm/s o 34%.

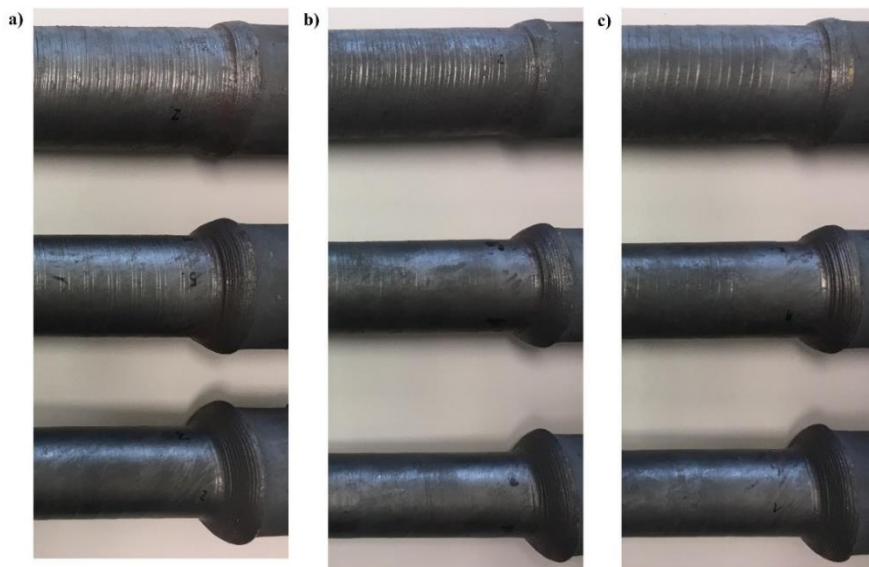
Podczas prób laboratoryjnych z prędkością $V_u = 40$ mm/s następowało wysuwanie pręta stalowego mocowanego w uchwycie szczękowym na początku procesu walcowania przy ustawionym stopniu gniotu $\delta = 1,53$, co uniemożliwiało przeprowadzenie rzetelnej próby badawczej. Przyczyną omówionego ograniczenia (podobnie, jak przy narzędziach $\alpha = 15^\circ$) jest różnica prędkości liniowej walcowanego materiału i przemieszczania uchwytu szczękowego, zadanej poprzez aplikację sterującą walcarką skośną. Dlatego też ostatecznie zaprezentowano wyniki wyłącznie dla próbek kształtowanych przy $\delta = 1,13$ oraz $\delta = 1,3$.

Wyniki falistości powierzchni odkuwek dla zwiększonego kąta zukosowania narzędzi względem osi walcowania o wartości $\theta = 5^\circ$ przedstawiono na rysunku 5.11. Ponadto otrzymane powierzchnie zewnętrzne odwalcowanych próbek badawczych zaprezentowano na rysunku 5.12.



Rys. 5.11. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)

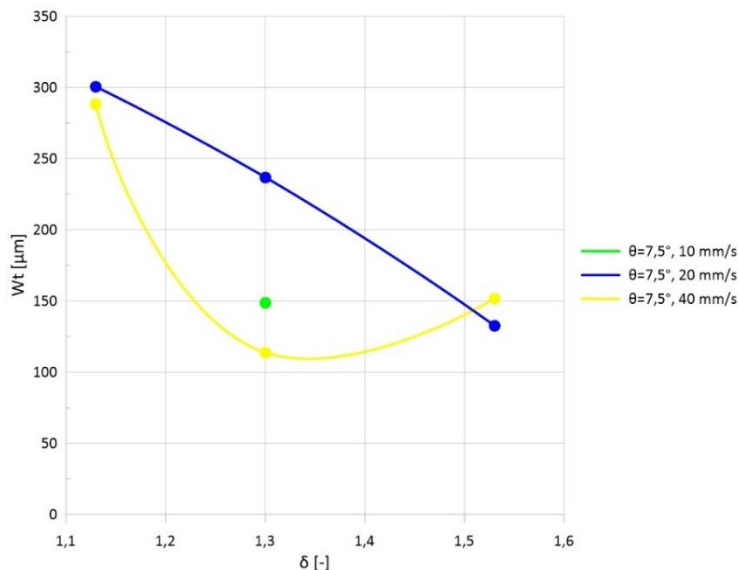
Zwiększenie stopnia przerobu plastycznego materiału podczas walcowania skośnego próbek stalowych wpływa na zmniejszenie wartości parametru W_t . Przy prędkości uchwytu 10 mm/s następuje obniżenie W_t o 67%, 20 mm/s o 51% natomiast przy 40 mm/s o 41%, w zależności od V_u w zakresie stopnia gniotu od $\delta = 1,13$ do $\delta = 1,53$.



Rys. 5.12. Powierzchnia zewnętrzna próbek badawczych dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 5^\circ$) przy zwiększającym się stopniu gniotu od $\delta = 1,13$ do $\delta = 1,53$ (patrzac od góry): a) $V_u = 10$ mm/s, b) $V_u = 20$ mm/s, c) $V_u = 40$ mm/s

Podczas walcowania z prędkością uchwytu równą 10 mm/s przy $\delta = 1,13$ następowało jego przepychanie, czego przyczyną była różnica prędkości liniowej materiału wychodzącego zza rolek stożkowych i ustawionej prędkości V_u . Przy omawianym ustawieniu, niekontrolowany przesuw uchwytu odbywał się dopiero pod koniec walcowania, inaczej niż było to przy rolkach o kącie $\alpha = 15^\circ$, gdzie ograniczenie następowało od początku procesu kształtowania.

Na rysunku 5.13 przedstawiono wartości parametru W_t , które otrzymano po próbach walcowania rolkami stożkowymi ustawionymi pod kątem $\theta = 7,5^\circ$. Prędkość liniowa materiału poddanego kształtowaniu przy zaproponowanym zukosowaniu narzędzi roboczych wynosi 61,5 mm/s. Spowodowało to występowanie ograniczeń walcowania próbek badawczych, które podczas procesu przemieszczały się z mniejszymi prędkościami równymi 10 mm/s i 20 mm/s. Przy najmniejszej prędkości V_u , uchwyt szczękowy został przepchnięty przez walcowany materiał w wyniku większej prędkości osiowej. Ponadto, przy prędkości 20 mm/s przy małym przerobie plastycznym $\delta = 1,13$ oraz $\delta = 1,3$ również następowało niekontrolowane przepchnięcie uchwytu podczas walcowania.

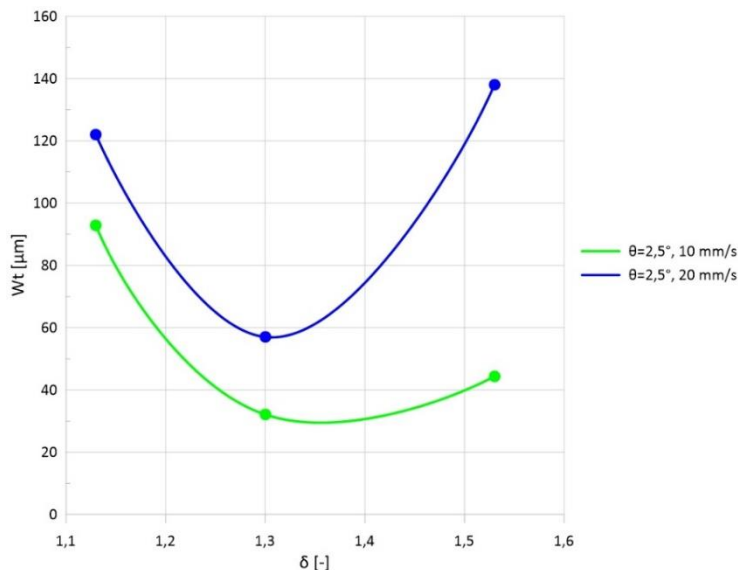


Rys. 5.13. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Wartości falistości powierzchni odkuwek zmniejszają się wraz ze wzrostem stopnia gniotu kształtowanego materiału wsadowego. W przypadku prędkości 20 mm/s jest to o 56% mniej, natomiast przy $V_u = 40$ mm/s o 47%, co wpływa pozytywnie na jakość zewnętrzną uzyskanych próbek badawczych.

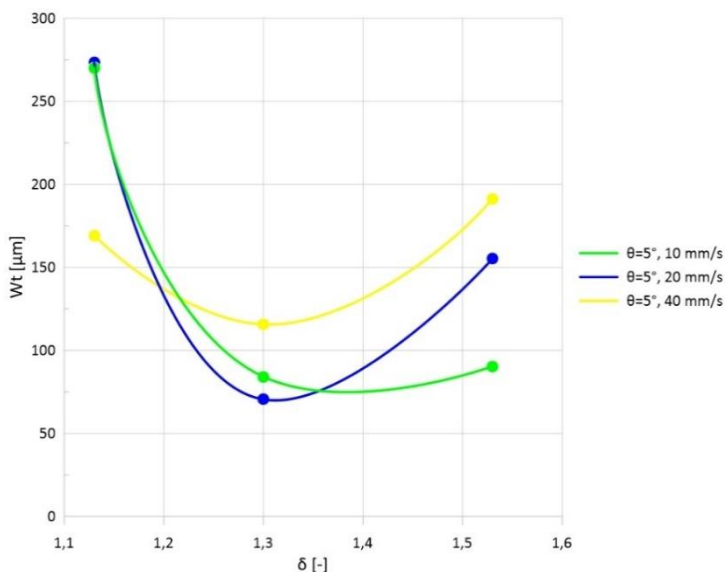
Wyniki z walcowania z wykorzystaniem ostatniego kompletu rolek stożkowych o kącie kształtujący $\alpha = 25^\circ$ przedstawiono na rysunkach 5.14–5.17.

Próby badawcze kształtowania elementów przy kącie $\theta = 2,5^\circ$ zrealizowano dla dwóch prędkości uchwytu, tj. 10 mm/s oraz 20 mm/s (rys. 5.14). W przypadku $V_u = 10$ mm/s wartości parametru falistości zmniejszyły się o 52% wraz ze zwiększaniem stopnia przerobu plastycznego. Przy prędkości równej 20 mm/s nastąpiła odmienna sytuacja, w której nastąpił wzrost parametru W_t przy największym stopniu gniotu $\delta = 1,53$ o 13% w stosunku do $\delta = 1,13$. Przyczyną było wysuwanie się walcowanego pręta z uchwytu szczękowego ($\delta = 1,53$) negatywnie wpływające na jakość powierzchni odkuwek. Prędkość uchwytu równa 40 mm/s nie została uwzględniona w prezentowanych wynikach ze względu na brak możliwości przeprowadzenia próby walcowania. Różnica prędkości liniowej kształtowanego materiału wsadowego i zadanej prędkości V_u była za duża, stąd pręt wysuwał się ze szczęk uchwytu i pozostawał w kotlinie walcowniczej.



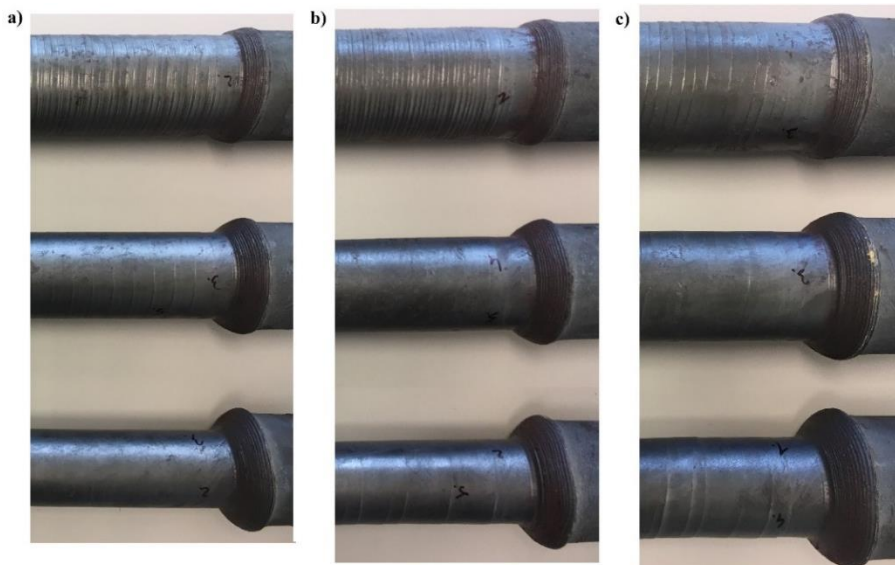
Rys. 5.14. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)

Rozkład wartości falistości odkuwek walcowanych narzędziami roboczymi pod kątem zukosowania $\theta = 5^\circ$ względem osi wyrobu przedstawiono na rysunku 5.15. Dodatkowo uzyskane powierzchnie zewnętrzne próbek badawczych kształtowanych przy wspomnianych ustawieniach kątowych zaprezentowano na rysunku 5.16.



Rys. 5.15. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)

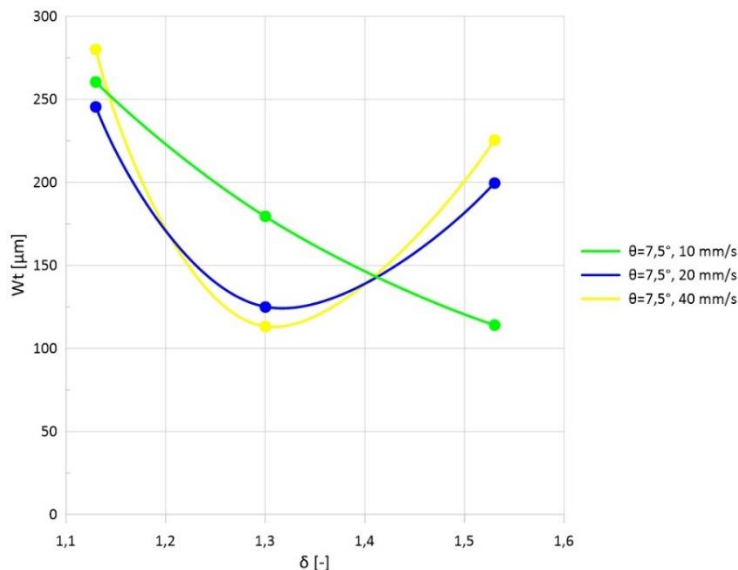
Przy zwiększaniu redukcji przekroju poprzecznego próbek badawczych, uzyskiwano niższe wartości parametru W_t dla końcowego stopnia gniotu $\delta = 1,53$ w stosunku do wyników przy $\delta = 1,13$. Odpowiednio mniejsze o 67% (przy $V_u = 10$ mm/s) i 43% (przy $V_u = 20$ mm/s).



Rys. 5.16. Powierzchnia zewnętrzna próbek badawczych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 5^\circ$) przy zwiększającym się stopniu gniotu od $\delta = 1,13$ do $\delta = 1,53$ (patrząc od góry): a) $V_u = 10$ mm/s, b) $V_u = 20$ mm/s, c) $V_u = 40$ mm/s

Przy prędkości uchwytu 40 mm/s nastąpiło nieznaczne zwiększenie falistości powierzchni odkuwki o 13%, czego wynikiem jest krótki czas odkształcenia materiału w części kalibracyjnej rolki stożkowej, w której następuje wygładzanie powierzchni kształtowanej próbki poprzez obciskanie obrotowe. Podczas walcowania materiału przy prędkości 10 mm/s następowało ograniczenie w postaci wybożenia pręta. Powodem była różnica prędkości materiału wychodzącego ze strefy narzędzi (41,1 mm/s) i wolniejszej prędkości uchwytu, która spowalniała kształtowanie wsadu. Wspomniane ograniczenie występowało również przy prędkości $V_u = 20$ mm/s przy $\delta = 1,13$. Przy zadanej prędkości uchwytu 40 mm/s przewalcowano próbki o stopniach gniotu $\delta = 1,13$ oraz $\delta = 1,3$, natomiast przy zwiększonej wartości do $\delta = 1,53$ podczas kształtowania nastąpiło wysunięcie pręta ze szczęk uchwytu, co negatywnie wpłynęło na uzyskaną jakość powierzchni zewnętrznej.

Na ostatnim rysunku 5.17 przedstawiono parametr W_t dla próbek badawczych, które walcowano pod kątem zukosowania rolek stożkowych $\theta = 7,5^\circ$.



Rys. 5.17. Wartości parametru falistości odkuwek dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Prędkość liniowa walcowanego materiału wynikająca z ustawienia kąтового narzędzi roboczych, powodowała przy przemieszczeniu uchwytu z $V_u = 10$ mm/s (przy $\delta = 1,13$ oraz $\delta = 1,3$) oraz 20 mm/s (przy $\delta = 1,13$) przepchnięcie uchwytu z zamocowaną w nim próbką badawczą w wyniku zwiększonej prędkości osiowej walcowanego materiału w stosunku do przemieszczania uchwytu szczękowego. Przy największym stopniu gniotu $\delta = 1,53$ dla obu wspomnianych prędkości, jak również przy $V_u = 40$ mm/s (dla trzech różnych redukcji przekrojów poprzecznych) przeprowadzono próby walcowania wsadów, podczas których nie zaobserwowano występowania zjawisk ograniczających proces.

Wartości falistości dla trzech prędkości charakteryzują się ich zmniejszaniem wraz ze wzrostem redukcji średnicy próbek badawczych. W przypadku prędkości uchwytu równej 10 mm/s zmniejszenie parametru W_t wynosi 56%, dla $V_u = 20$ mm/s równe jest 19%, natomiast dla największej prędkości 40 mm/s jest to 20%.

Podsumowując badania struktury warstwy wierzchniej określono, że zwiększenie kąta kształtującego α w rolkach stożkowych powoduje wzrost falistości W_t , co w konsekwencji wpływa na pogorszenie jakości powierzchni zewnętrznej wyrobów. Ponadto zwiększenie kąta zukosowania narzędzi roboczych θ względem osi walcowania również przyczynia się do wzrostu falistości próbek. Zmiana prędkości uchwytu szczękowego V_u nie wpływa znacząco na uzyskiwane wartości parametru W_t , jednak głównie dotyczy to rolek stożkowych o kącie $\alpha = 15^\circ$ i 20° . W przypadku $\alpha = 25^\circ$ dla wszystkich ustawień narzędzi pod kątem θ (przy $\delta = 1,53$) zwiększanie prędkości V_u powoduje wzrost parametru falistości W_t . Podczas walcowania narzędziami o kącie $\alpha = 15^\circ$ wraz ze zwiększaniem stopnia gniotu δ następowało zmniejszanie parametru W_t .

przyczyniając się do uzyskiwania wyrobów o lepszej powierzchni zewnętrznej. Dla pozostałych przypadków walcowania, tj. narzędziami o kącie $\alpha = 20^\circ$ i 25° wzrost stopnia przerobu plastycznego również powodował uzyskiwanie mniejszych wartości falistości, jednak tylko do stopnia gniotu δ równego 1,3, gdzie otrzymano najlepsze rezultaty. Dalsze zwiększanie jego wartości prowadziło do ponownego wzrostu parametru W_r objawiającego się pogarszaniem jakości powierzchni wyrobów.

Zjawisko występujące podczas walcowania próbek, tj. wysuwanie materiału z uchwytu szczękowego podczas kształtowania z największą prędkością V_u przy mniejszych kątach zukosowania narzędzi, tj. $\theta = 2,5^\circ$ należy wyeliminować. W tym celu konieczna jest wymiana aktualnego uchwytu, gdzie docisk materiału w szczękach odbywa się mechanicznie na uchwyt hydrauliczny, charakteryzujący się stałą siłą docisku wraz z możliwością jej regulacji. Powinno to również zapobiegać wysuwaniu się wsadów, które w wyniku dłuższego procesu walcowania ulegają wystudzeniu, tym samym kompensacja siły docisku zniveluje powstającą luźną przestrzeń w miejscu chwytania materiału.

5.2.2. Parametry siłowe w procesie walcowania skośnego

Rejestracji parametrów siłowych podczas walcowania próbek badawczych dokonywano poprzez układ pomiarowy sterowany aplikacją przygotowaną w środowisku programistycznym LabVIEW, opartym o moduł akwizycji National Instruments USB-6008, który opisano w rozdziale 4.

Ustawiono optymalną częstotliwość próbkowania sygnału o wartości 25 Hz, powodując dokładną rejestrację przebiegu sygnałów pomiarowych oraz unikając ich zniekształcenia, a jednocześnie nie wpływając negatywnie na szybkość przetwarzania danych dla zastosowanego modułu akwizycji NI USB-6008.

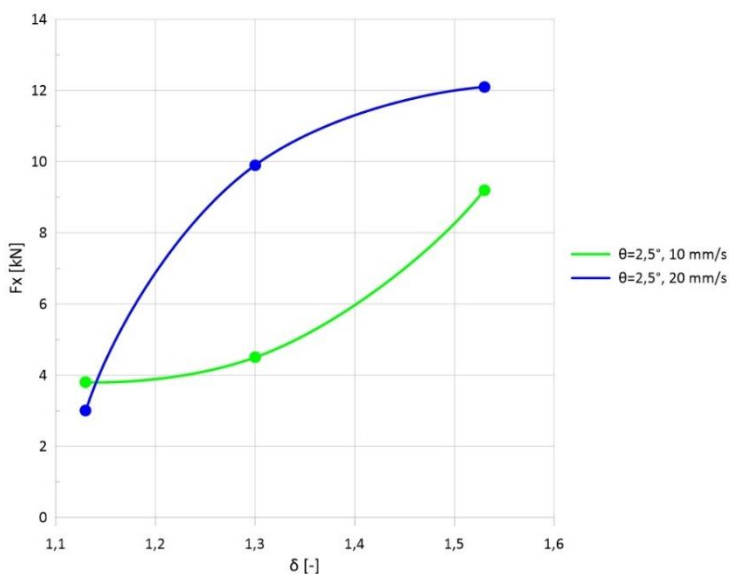
W niniejszym rozdziale przedstawiono uśrednione, maksymalne wartości sił osiowych, promieniowych oraz momentów obrotowych uzyskanych z prób doświadczalnych walcowania próbek stalowych dla konfiguracji ustawień przedstawionych w tabeli 5.1.

Wyniki z prób doświadczalnych uzyskanych po walcowaniu za pomocą rolek stożkowych o kącie $\alpha = 15^\circ$ przedstawiono na rysunkach 5.18–5.26. Rozkłady wartości sił oraz momentu obrotowego przedstawiono dla poszczególnych stopni gniotu, tj. 1,13; 1,3; 1,53. Podczas walcowania przy prędkości $V_u = 20$ mm/s oraz kącie zukosowania narzędzi $\theta = 2,5^\circ$ wartości siły osiowej były największe, w porównaniu do pozostałych ustawień kątowych rolek. Siły wzrastały wraz z zwiększaniem przerobu plastycznego materiału i wynosiły maksymalnie 12,1 kN przy $\delta = 1,53$ (rys. 6.18). Wykonano jednak próby badawcze tylko dla dwóch prędkości $V_u = 10$ oraz 20 mm/s. Stosowanie prędkości przemieszczania uchwytu równej 40 mm/s powodowało wysuwanie pręta ze szczęk, dlatego też nie dokonano pomiarów parametrów siłowych w tym przypadku. Występujące zjawisko wynikało z mniejszej prędkości osiowej walcowanego materiału

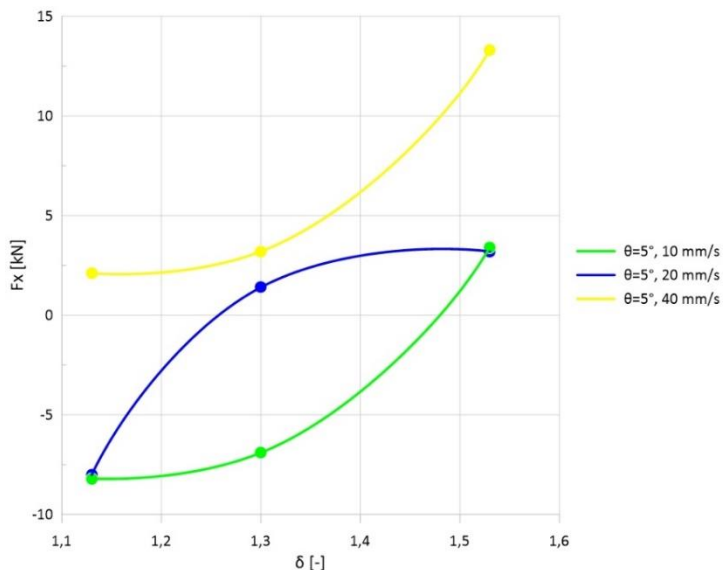
wychodzącego z rolek (wynoszącej 20,5 mm/s), będącej wypadkową kąowego ustawienia rolek stożkowych.

W przypadku kąta zukosowania $\theta = 5^\circ$ (rys. 5.19), podczas walcowania z prędkością $V_u = 10$ mm/s przy $\delta = 1,13$ i $1,3$ oraz $V_u = 20$ mm/s ($\delta = 1,13$) występowało zjawisko przepychania uchwytu wskutek zwiększonej prędkości osiowej kształtowanego materiału wynoszącej 41,1 mm/s. Na wykresach dla poszczególnych gniotów, podczas których występowało wspomniane zjawisko, siłę osiową (pchającą) przedstawiono z wartością ujemną, oznaczającą zwrot przeciwny w stosunku do siły ciągnącej. W pozostałych przypadkach, próby walcowania zrealizowano bez występowania tego efektu. Największe wartości siły wynosiły 3,2 kN (przy $V_u = 10$ mm/s i 20 mm/s) oraz 13,3 kN (przy $V_u = 40$ mm/s) i dotyczyły kształtowania materiału ze stopniem gniotu równym $\delta = 1,53$.

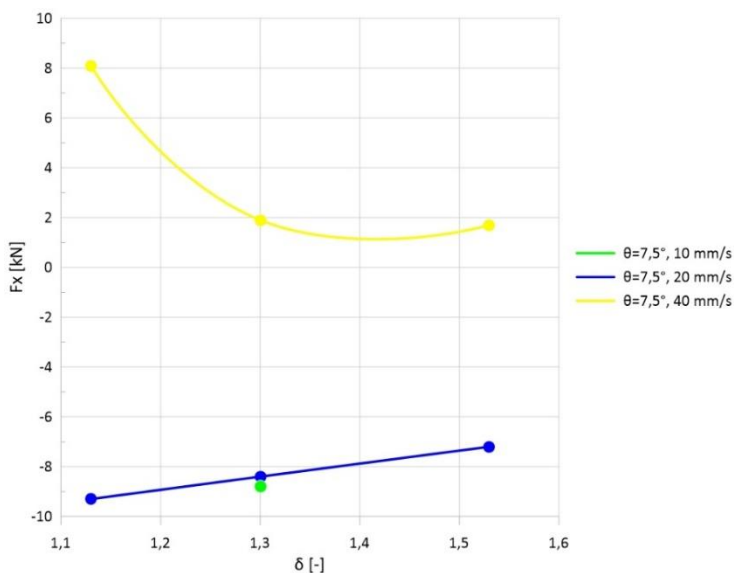
Przy największym kącie zukosowania rolek stożkowych $\theta = 7,5^\circ$ (rys. 5.20) występuje zjawisko przepychania uchwytu przy prędkościach równych $V_u = 10$ mm/s oraz 20 mm/s. Wyłącznie przy prędkości 40 mm/s zrealizowano próbę doświadczalną, w trakcie której płynięcie osiowe materiału nie było hamowane przez uchwyt.



Rys. 5.18. Wartości sił osiowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)



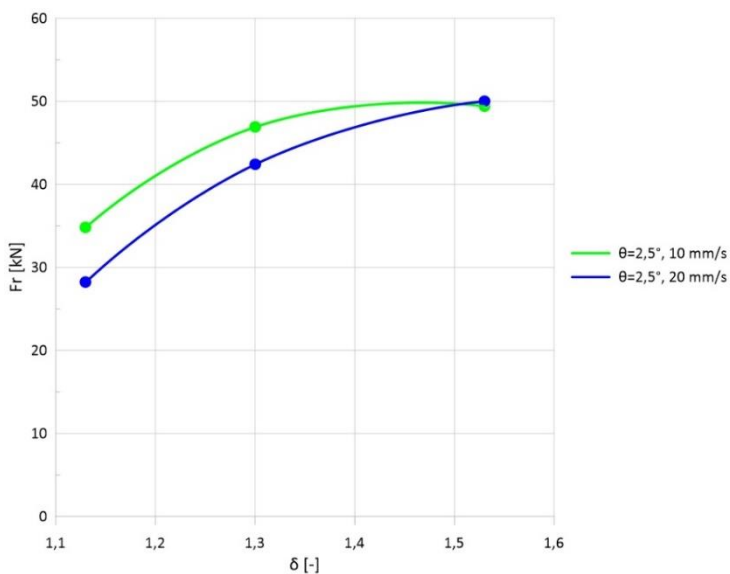
Rys. 5.19. Wartości sił osiowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)



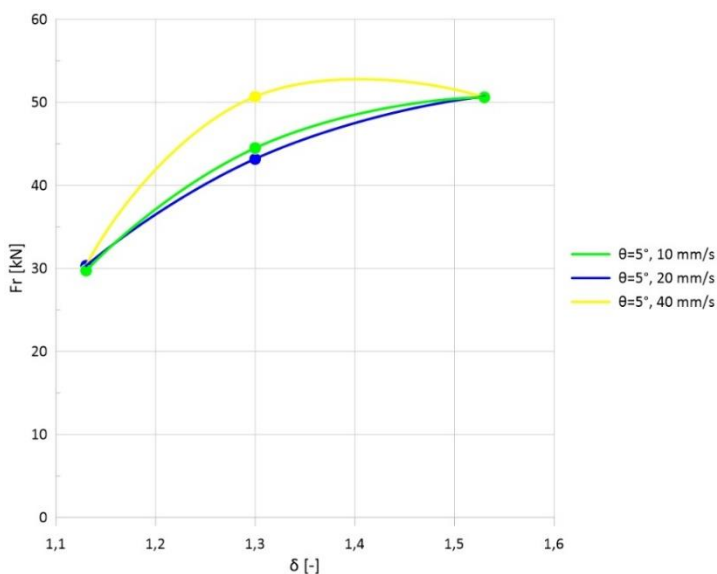
Rys. 5.20. Wartości sił osiowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Wartości sił promieniowych na rolce podczas walcowania skośnego dla każdego z trzech kątów zukosowania narzędzi θ wzrastały wraz ze zwiększającym się stopniem przerobu plastycznego materiału (rys. 5.21–5.23). Uzyskano maksymalne wartości sił promieniowych w zakresie od 49,4 kN

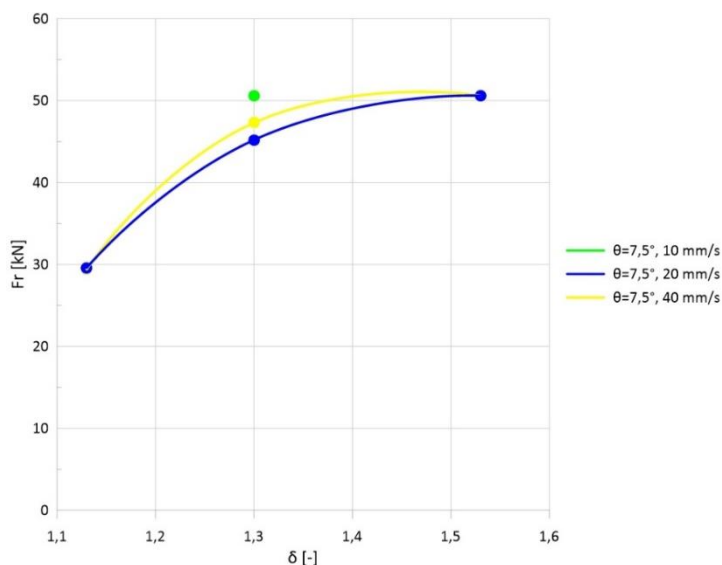
do 50,6 kN dla stopnia gniołu $\delta = 1,53$ dla każdego ustawienia kąтового rolek stożkowych.



Rys. 5.21. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)

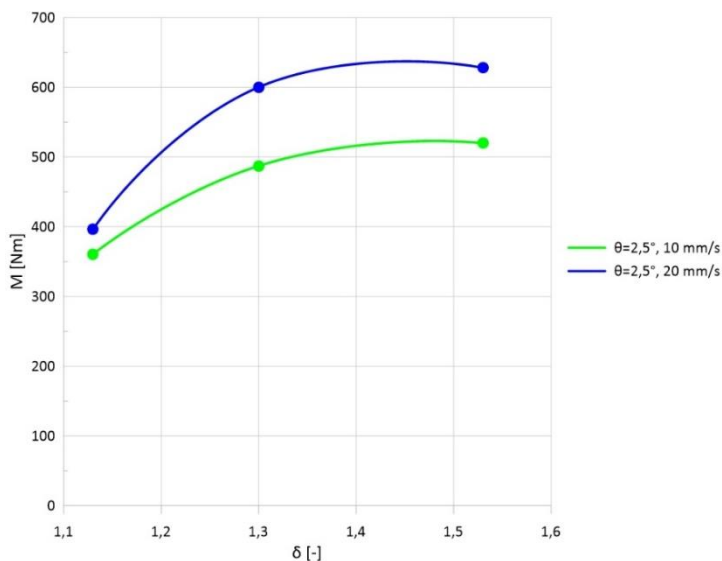


Rys. 5.22. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)

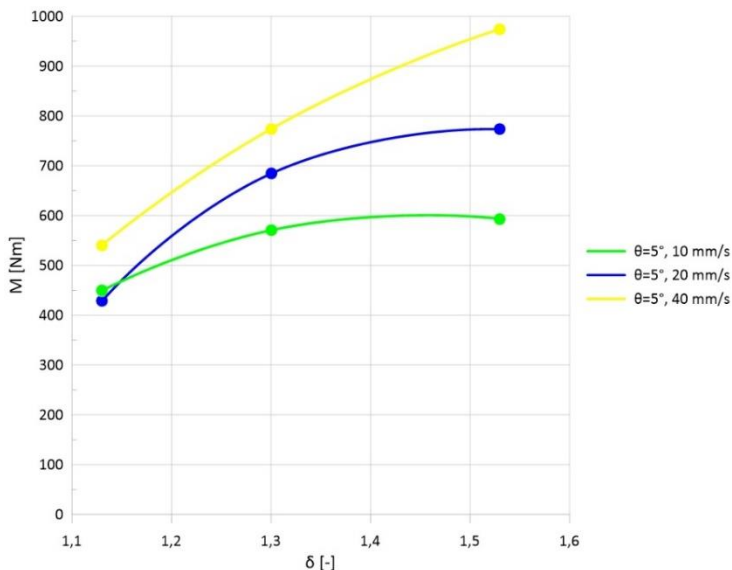


Rys. 5.23. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

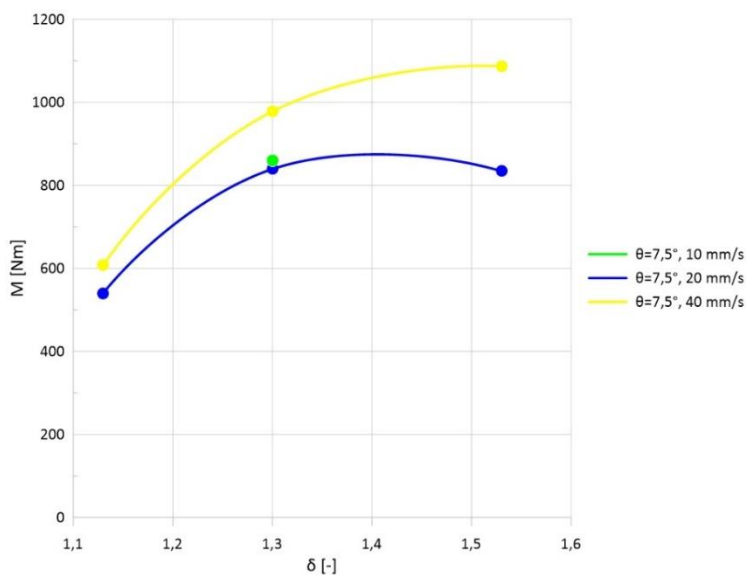
Najmniejsze wartości momentu obrotowego, które zmierzono podczas walcowania próbek badawczych za pomocą układu pomiarowego odnotowano przy kącie zukosowania rolek stożkowych $\theta = 2,5^\circ$. Wzrost wartości momentu obrotowego następuje wraz ze zwiększeniem pochylenia narzędzi względem osi kształtowanego wsadu do kąta $\theta = 7,5^\circ$ oraz stopnia przerobu plastycznego materiału, co zaprezentowano na rysunkach 5.24–5.26.



Rys. 5.24. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)



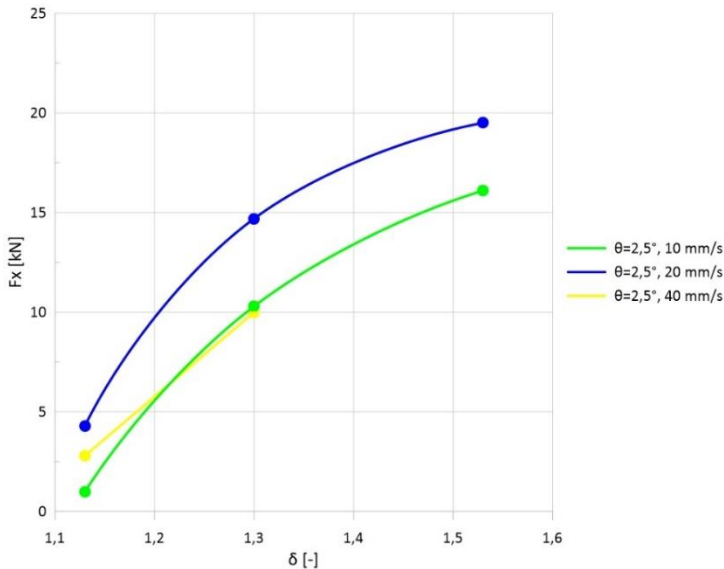
Rys. 5.25. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)



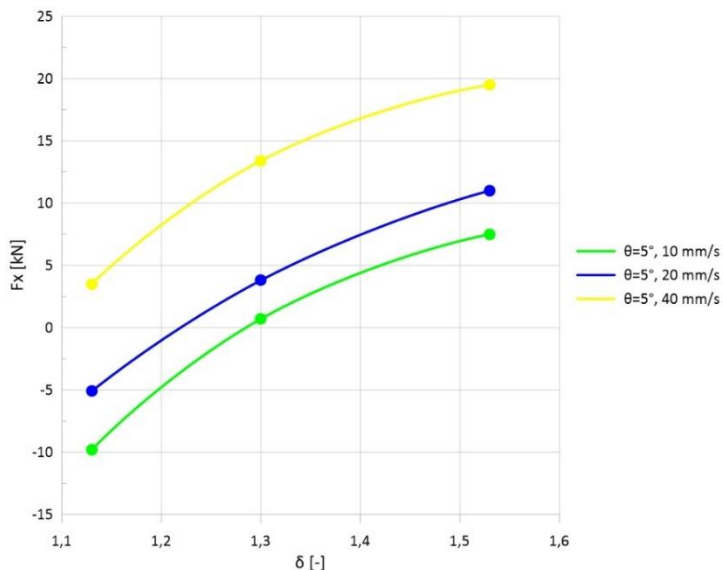
Rys. 5.26. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 15^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Zmiana narzędzi na kolejny zestaw rolek stożkowych o kącie kształtującym $\alpha = 20^\circ$ spowodowała zwiększenie siły osiowej mierzonej za uchwytem szczękowym w stosunku do wyników uzyskanych dla narzędzi o kącie $\alpha = 15^\circ$ (rys. 5.27–5.29).

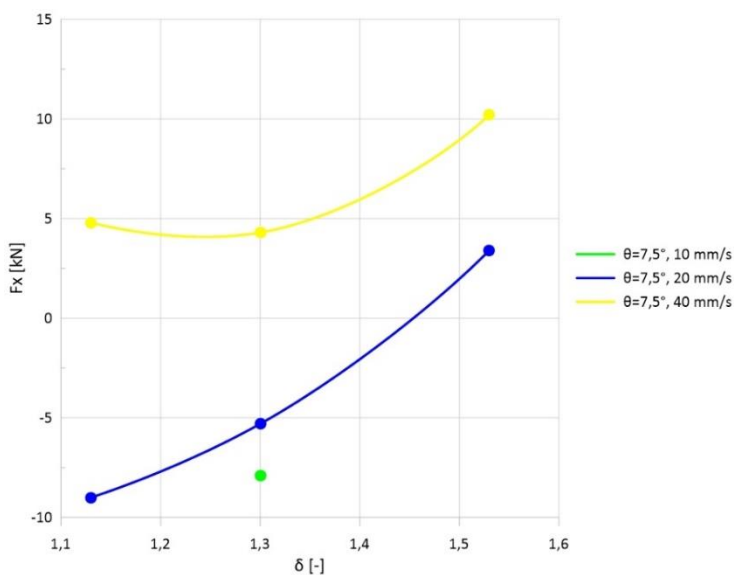
W przypadku $\theta = 2,5^\circ$ próby walcowania zrealizowano dla prędkości przemieszczania uchwytu równych 10 mm/s oraz 20 mm/s. Przy prędkości $V_u = 40$ mm/s dla przerobu plastycznego $\delta = 1,53$, nie dokonano próby badawczej, co wynikało z wysuwania się kształtowanego pręta z uchwytu. Podczas walcowania narzędziami zukosowanymi pod kątem $\theta = 5^\circ$ z prędkościami $V_u = 10$ mm/s oraz 20 mm/s z redukcją średnicy materiału równą $\delta = 1,13$ następowało przepychanie uchwytu. W pozostałych przypadkach wspomniane ograniczenie nie występowało. Natomiast przy $\theta = 7,5^\circ$ podczas próby kształtowania przy prędkości $V_u = 10$ mm/s oraz 20 mm/s ($\delta = 1,13$ i $\delta = 1,3$) następowało przepychanie uchwytu w wyniku większej prędkości osiowej materiału walcowanego niż prędkość przemieszczania uchwytu z zamocowaną próbką badawczą. Należy podkreślić, że dla każdego ustawienia kąтового narzędzi roboczych, zwiększenie redukcji przekroju poprzecznego walcowanych próbek powoduje wzrost siły osiowej.



Rys. 5.27. Wartości sił osiowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)



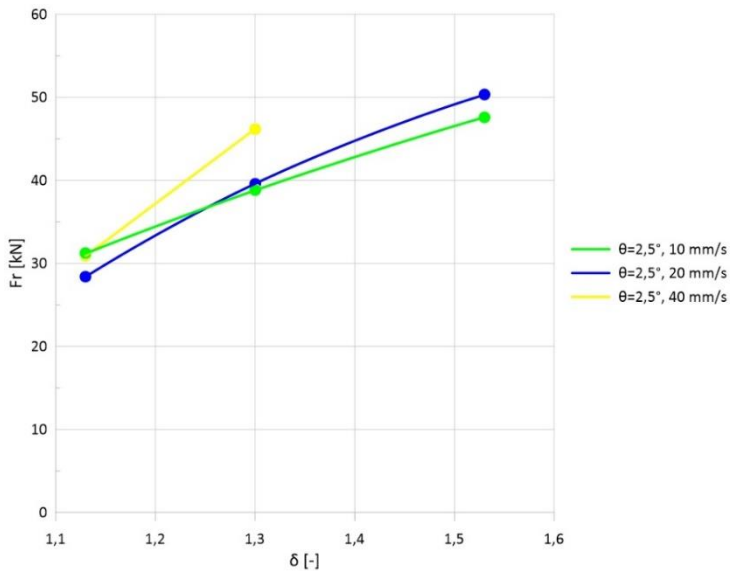
Rys. 5.28. Wartości sił osiowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)



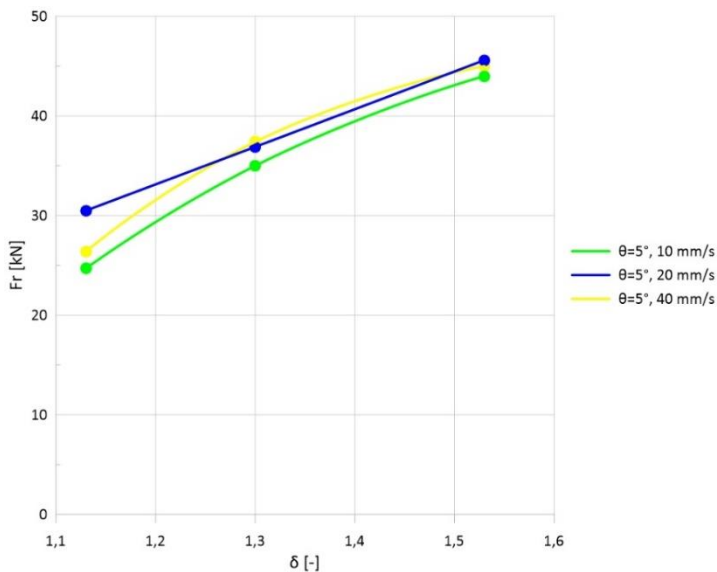
Rys. 5.29. Wartości sił osiowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Zwiększony kąt α narzędzi kształtujących z 15° do 20° powoduje zmniejszenie wartości sił promieniowych występujących na rolkach stożkowych podczas walcowania, głównie przy kącie zukosowania narzędzi $\theta = 5^\circ$ (rys. 5.30–5.32). Porównując wartości sił promieniowych dla trzech prędkości przemieszczenia uchwytu (przy $\delta = 1,53$) to przy $\alpha = 20^\circ$ wynoszą one od 44 kN do 45,6 kN,

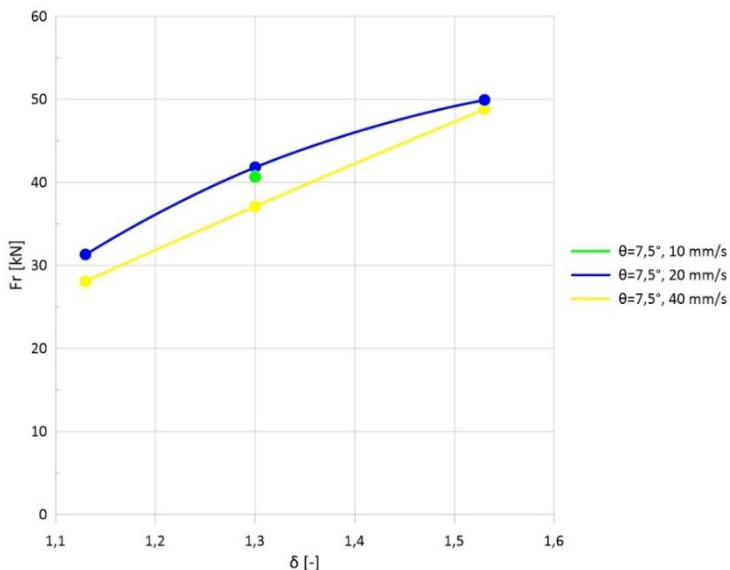
natomiast przy $\alpha = 15^\circ$ od 50,6 kN do 50,7 kN. W przypadku pozostałych ustawień kątowych rolek względem osi wsadu spadek wartości sił jest niewielki i wynosi do 2 kN.



Rys. 5.30. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)

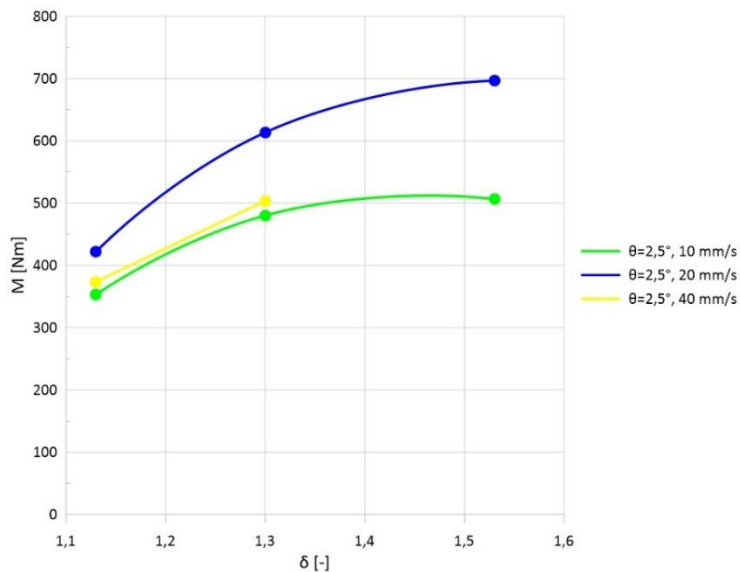


Rys. 5.31. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)

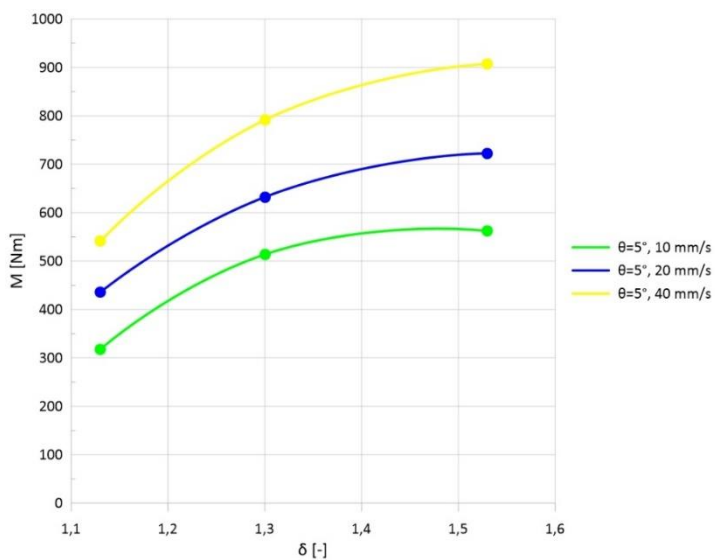


Rys. 5.32. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

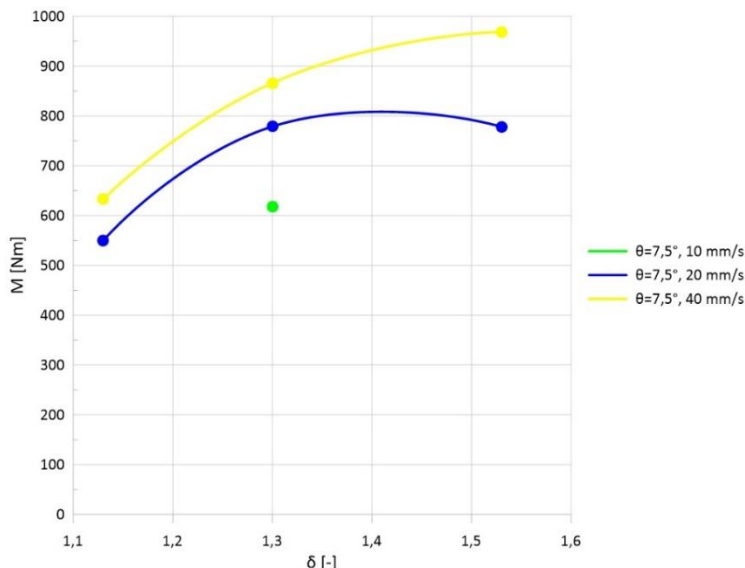
Podczas walcowania najmniejsza wartość momentu obrotowego, którą zarejestrowano wystąpiła dla przypadku kształtowania ze skośnym ustawieniem narzędzi pod kątem $\theta = 2,5^\circ$. Zwiększenie zukosowania narzędzi, jak również stopnia przerobu plastycznego próbek badawczych powoduje wzrost wartości parametru (rys. 5.33–5.35). Uzyskany moment obrotowy ($\theta = 5^\circ$) na wałach roboczych podczas kształtowania narzędziami o kącie $\alpha = 20^\circ$ jest mniejszy do 7% w stosunku do wyników uzyskanych z prób doświadczalnych dla rolek stożkowych o mniejszym kącie, tj. $\alpha = 15^\circ$. Natomiast w przypadku kąta $\theta = 2,5^\circ$ wartości zmniejszyły się nieznacznie o 2,6% (przy $V_u = 10 \text{ mm/s}$), a przy zukosowaniu rolek pod kątem $7,5^\circ$ nawet do 11% (przy $V_u = 20 \text{ mm/s}$) w stosunku do wartości odnotowanych podczas kształtowania pierwszym zestawem narzędzi z kątem $\alpha = 15^\circ$.



Rys. 5.33. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)



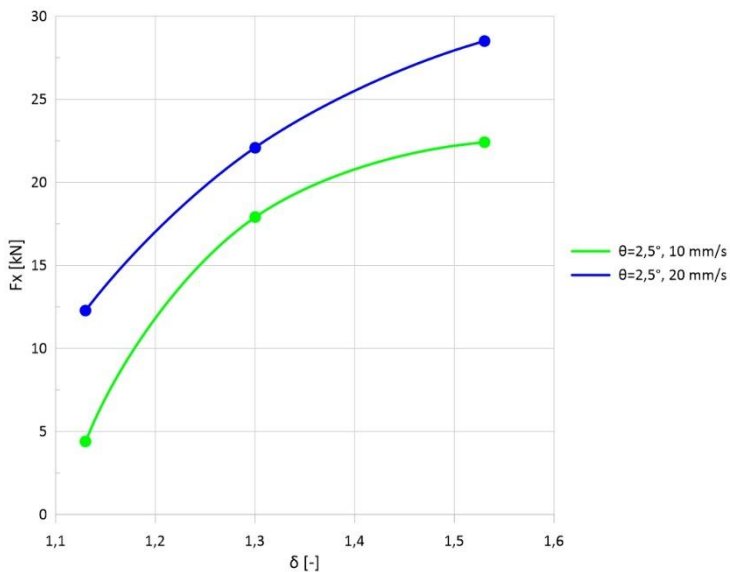
Rys. 5.34. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)



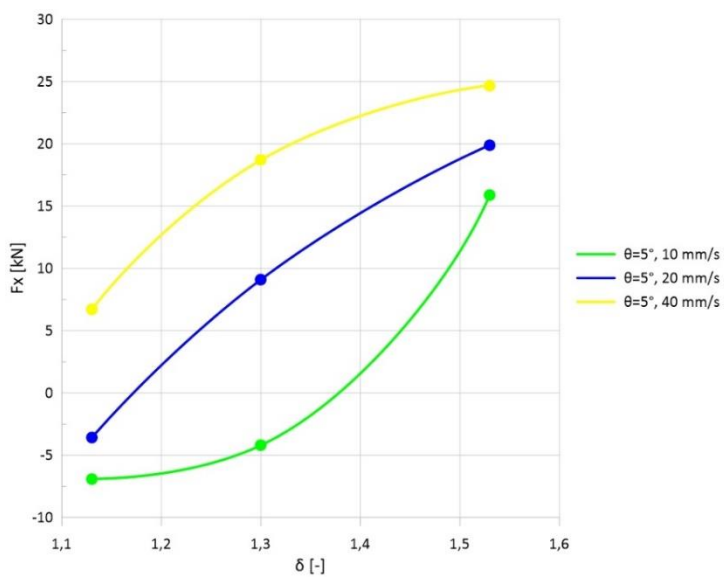
Rys. 5.35. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 20^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

Ostatni zestaw narzędzi o kącie kształtującym $\alpha = 25^\circ$ powoduje dalszy wzrost siły osiowej (rys. 5.36–5.38) w stosunku do wcześniej uzyskiwanych wyników. Przykładowo podczas walcowania ze skośnym ustawieniem rolek pod kątem $\theta = 2,5^\circ$ z prędkością $V_u = 20 \text{ mm/s}$ (przy $\delta = 1,53$) uzyskane wartości były wyższe o 45% w stosunku do wyników przy rolkach z $\alpha = 20^\circ$ oraz o 84% do uzyskanych w próbach badawczych z zestawem rolek z $\alpha = 15^\circ$.

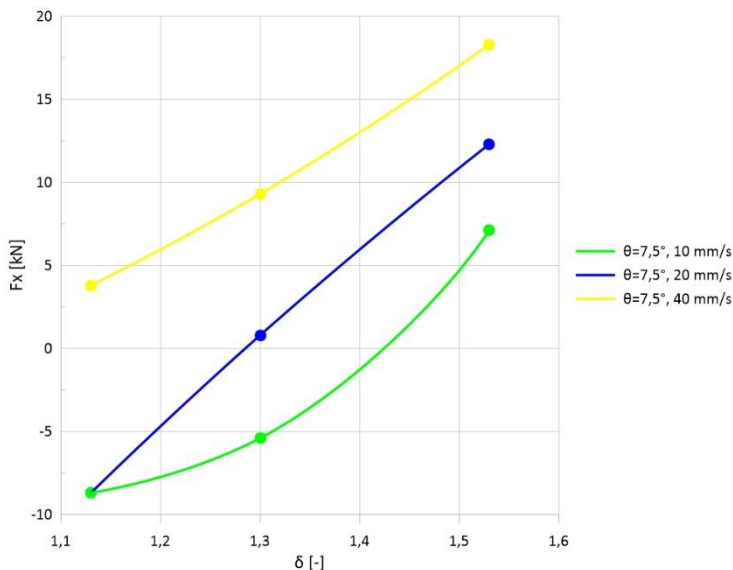
W przypadku zukosowania narzędzi pod kątem $\theta = 2,5^\circ$ przy ustawionej prędkości posuwu V_u równej 40 mm/s występowało ograniczenie w postaci wrywania kształtowanego pręta z uchwytu szczękowego. Zadana prędkość była większa niż prędkość osiowa walcowanego materiału. Ponadto wraz ze wzrostem przerobu plastycznego materiału wsadowego, siły osiowe w trakcie procesu rosną. Dla prędkości $V_u = 10 \text{ mm/s}$ oraz 20 mm/s (przy $\theta = 5^\circ$ oraz $\theta = 7,5^\circ$) następowało zjawisko wyboczenia kształtowanego pręta poprzez lekkie przepychanie uchwytu lub jego silne wyginanie w słupach prowadzących, co jest skutkiem różnic prędkości zadanej oraz przedmiotu obrabianego. W tych przypadkach na wykresach odnotowano siły pchające o wartościach ujemnych.



Rys. 5.36. Wartości sił osiowych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 2.5^\circ$)

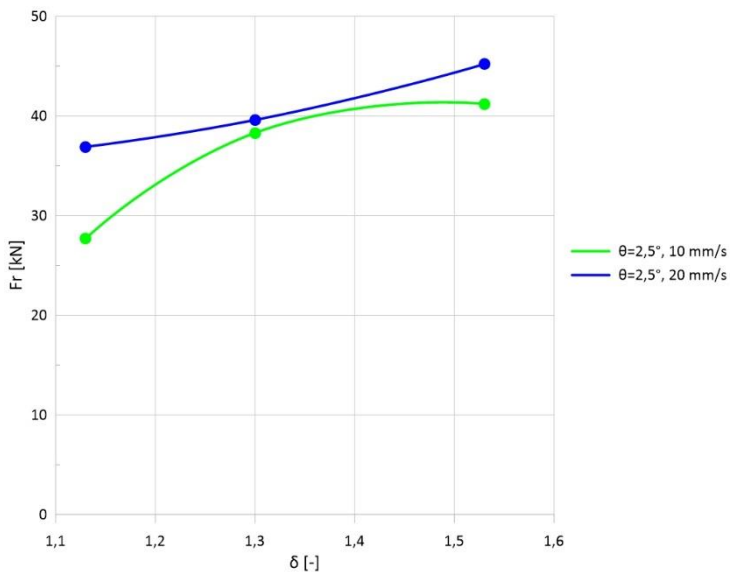


Rys. 5.37. Wartości sił osiowych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)

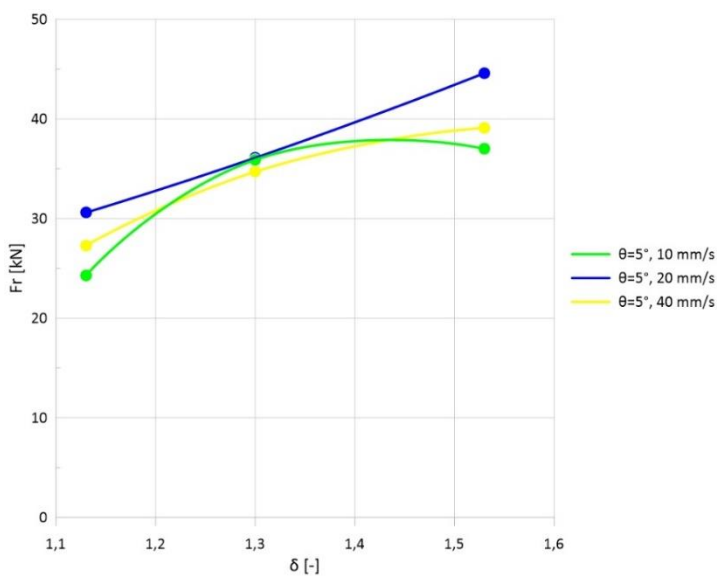


Rys. 5.38. Wartości sił osiowych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

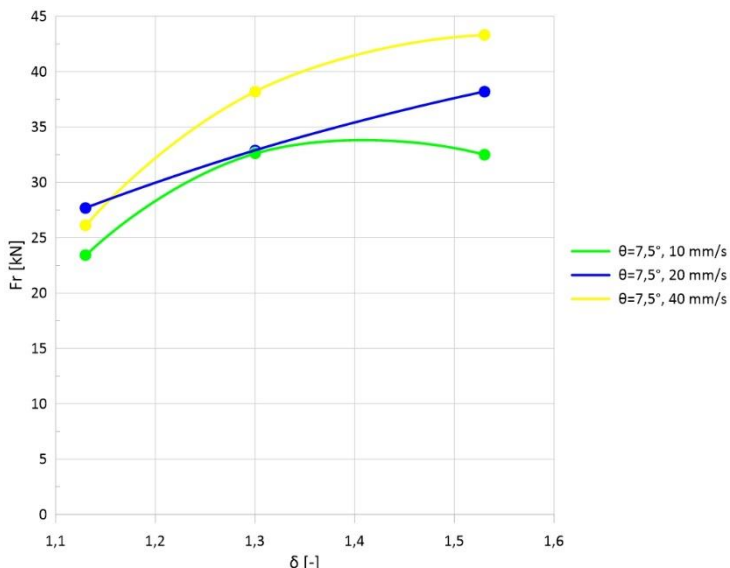
Siły promieniowe otrzymane przy rolkach stożkowych o kącie $\alpha = 25^\circ$ charakteryzują się najniższymi wartościami spośród trzech zestawów narzędzi użytych podczas prób doświadczalnych walcowania skośnego (rys. 5.39–5.41). Przy przerobie plastycznym materiału $\delta = 1,53$ wartości sił naciskających na kształtowaną próbkę badawczą dla wszystkich prędkości przesuwu uchwytu znajdują się w zakresie od 37 kN do 45,2 kN i są mniejsze niż w przypadku narzędzi o kącie $\alpha = 20^\circ$ o 2% (dla $V_u = 20 \text{ mm/s}$) natomiast w stosunku do rolek z kątem kształtującym $\alpha = 15^\circ$ są mniejsze o 12% (również dla $V_u = 20 \text{ mm/s}$). Wartości sił promieniowych (dla $\alpha = 15^\circ$) dla wszystkich prędkości uchwytu wynosiły maksymalnie do 50,7 kN.



Rys. 5.39. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 2.5^\circ$)

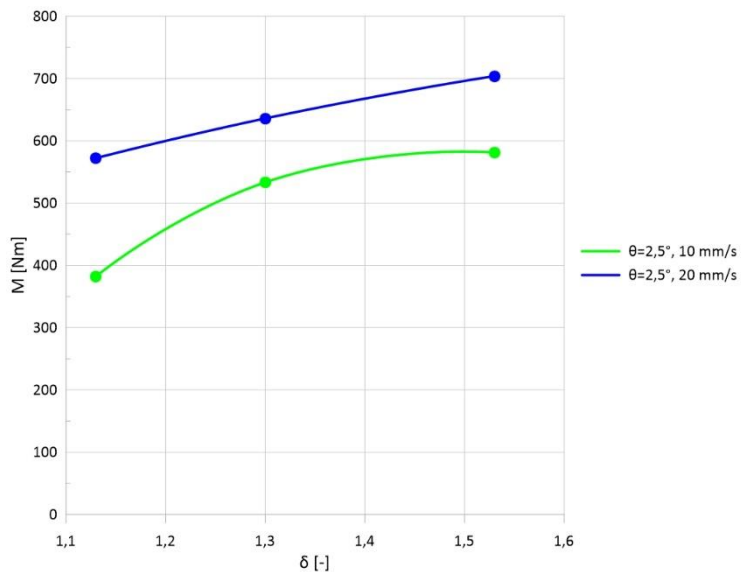


Rys. 5.40. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)

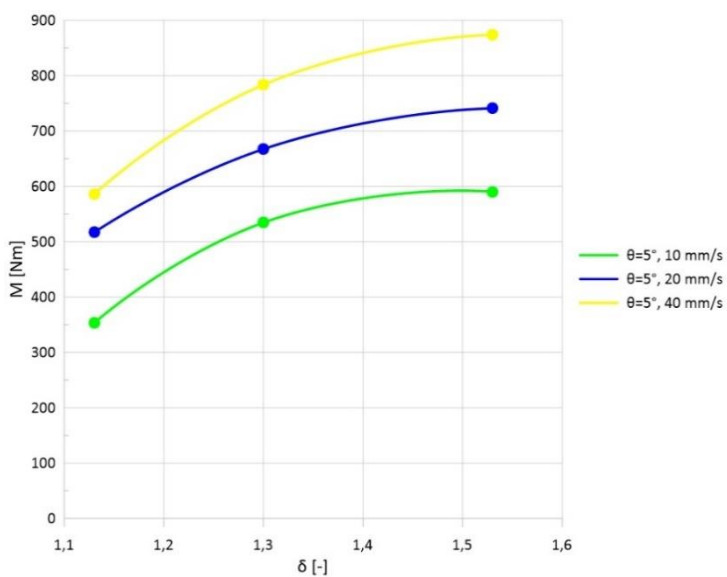


Rys. 5.41. Wartości sił promieniowych procesu dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

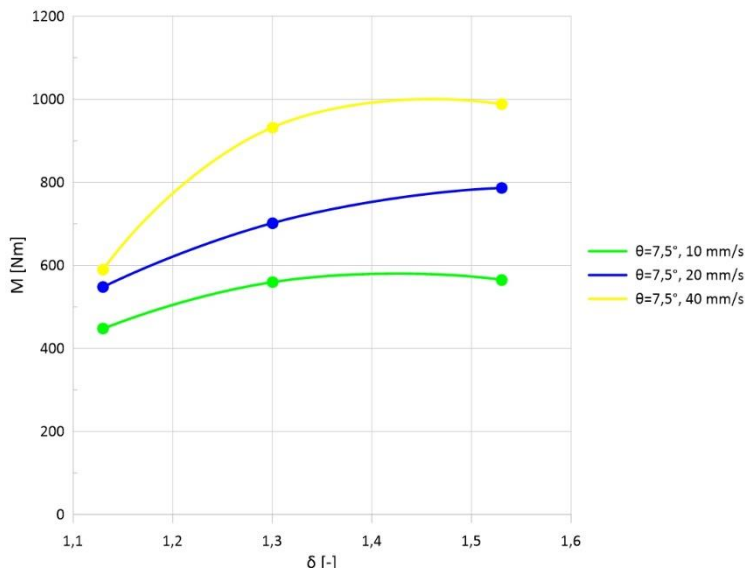
Momenty obrotowe uzyskiwane na wałach roboczych, do których montowane są narzędzia, uzyskują wyższe wartości wraz ze zwiększającym się kątem zukosowania narzędzi względem osi kształtowanego wyrobu, jak również pod względem wzrostu prędkości przemieszczania uchwytu (rys. 5.42–5.44). Podczas walcowania próbek pod kątem $\theta = 5^\circ$ zwiększenie prędkości $V_u = 10 \text{ mm/s}$ na 20 mm/s powoduje wzrost momentu obrotowego o 25%, a dalsze zwiększenie prędkości z 20 mm/s do 40 mm/s o kolejne 18%. W porównaniu do wyników otrzymanych podczas walcowania za pomocą rolek stożkowych z kątem $\alpha = 20^\circ$ przy prędkości uchwytu równej 20 mm/s dla każdego ustawienia kąтового narzędzi wartości momentu obrotowego były wyższe. Natomiast w stosunku do wyników osiągniętych podczas walcowania przy tej samej prędkości V_u ale dla $\theta = 5^\circ$ rolkami stożkowymi o kącie $\alpha = 15^\circ$ wspomniany parametr był mniejszy o 4%.



Rys. 5.42. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 2,5^\circ$)



Rys. 5.43. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 5^\circ$)



Rys. 5.44. Wartości momentów obrotowych dla rolek stożkowych $\alpha = 25^\circ$ ($\theta = 7,5^\circ$)

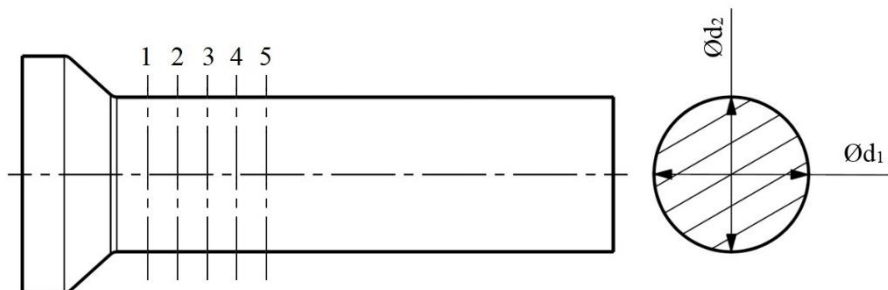
Na podstawie uzyskanych wyników parametrów siłowych stwierdzono, że zwiększenie kąta kształtującego α narzędzi powoduje wzrost siły osiowej F_x na uchwycie szczękowym dla każdego skośnego ustawienia rolek stożkowych. Jednocześnie powoduje zmniejszenie siły promieniowej F_r na rolce stożkowej. Natomiast zmiana kąta zukosowania narzędzi θ nie wpływa znacząco na wartość siły promieniowej F_r , jednakże zwiększenie kąta θ powoduje zmniejszenie siły ciągnącej w uchwycie szczękowym spowodowanej zwiększoną prędkością walcowanego materiału. Zwiększanie prędkości uchwytu V_u powoduje wzrost siły osiowej F_x , jak również momentu obrotowego M na wałach roboczych walcarki skośnej. Nie wpływa ona jednak znacząco na wartości siły promieniowej F_r na rolce stożkowej. Zmiana stopnia gniotu δ powoduje zwiększenie wszystkich parametrów siłowych dla każdego zestawu narzędzi roboczych.

5.2.3. Dokładność geometryczna odkuwek

W ramach prac badawczych dokonano także analizy dokładności wymiarów geometrycznych uzyskanych odkuwek w procesie walcowania skośnego w warunkach prób doświadczalnych. Otrzymane wyniki odniesiono do zakładanych do uzyskania wymiarów nominalnych.

Podczas prób laboratoryjnych kształtowano próbki badawcze o średnicy wyjściowej $\varnothing 52$ mm, stosując trzy różne stopnie przerobu plastycznego materiału, tj. $\delta = 1,13$; $\delta = 1,3$; $\delta = 1,53$. Tym samym otrzymywane odkuwki po walcowaniu powinny uzyskać następujące średnice: $\varnothing 46$ mm, $\varnothing 40$ mm, $\varnothing 34$ mm.

Wymiary geometryczne odkuwek mierzono warsztatowymi, cyfrowymi przyrządami pomiarowymi z rozdzielczością pomiarową do setnych części milimetra. Pomiaru średnic dokonano, w co najmniej pięciu przekrojach na długości ukształtowanego stopnia w dwóch prostopadłych kierunkach, wg schematu przedstawionego na rysunku 5.45.



Rys. 5.45. Schemat pomiarów wymiarów geometrycznych próbek badawczych

Obliczenia w zakresie odchyłek wymiarowych określających owalizację próbek badawczych Δd_o na podstawie przeprowadzonych pomiarów określono, wg zależności:

$$\Delta d_o = \bar{d}_1 - \bar{d}_2, \quad (5.4)$$

gdzie:

Δd_o – owalizacja wyrobu,

\bar{d}_1 – średnia arytmetyczna średnicy d_1 ,

\bar{d}_2 – średnia arytmetyczna średnicy d_2 .

Uśrednione wymiary geometryczne d_1 oraz d_2 , otrzymano wykorzystując średnią arytmetyczną, będącą ilorazem sumy wartości pomiarowych i ich liczności, opisanej wg poniższego wzoru:

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{n}, \quad (5.5)$$

gdzie:

\bar{d}_i – średnia arytmetyczna średnicy d_1, d_2 ,

d_j – poszczególne wartości pomiarowe,

n – liczba pomiarów.

Wyniki obliczeń maksymalnych wartości owalizacji z podziałem na poszczególne konfiguracje ustawień rolek stożkowych zaprezentowano w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Zestawienie wymiarów maksymalnych odchyłek owalizacji uzyskane z prób doświadczalnych

θ [°]	Prędkość osiowa V_u [mm/s]	Stopień gniotu δ [-]	d_n [mm]	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 25^\circ$
				Δd_o [mm]	Δd_o [mm]	Δd_o [mm]
2,5°	10	1,13	46	0,33	0,21	0,36
		1,3	40	0,38	0,22	0,37
		1,53	34	0,42	0,15	0,89
	20	1,13	46	0,60	0,38	0,19
		1,3	40	0,56	0,58	0,41
		1,53	34	0,30	0,29	0,29
	40	1,13	-	-	0,28	-
		1,3	-	-	0,24	-
		1,53	-	-	-	-
5°	10	1,13	46	0,77	0,55	0,65
		1,3	40	0,41	0,51	0,75
		1,53	34	0,19	0,18	0,27
	20	1,13	46	0,40	0,57	0,44
		1,3	40	0,87	0,27	0,92
		1,53	34	0,17	0,21	0,49
	40	1,13	46	0,32	0,13	0,21
		1,3	40	0,32	0,22	0,14
		1,53	34	0,83	0,31	0,40
7,5°	10	1,13	-	-	-	0,65
		1,3	40	1,20	0,55	0,71
		1,53	-	-	-	0,28
	20	1,13	46	0,17	0,86	0,60
		1,3	40	1,04	1,10	0,89
		1,53	34	1,07	1,06	1,04
	40	1,13	46	0,68	0,59	0,41
		1,3	40	1,03	0,58	0,34
		1,53	34	0,79	0,28	0,43

Podczas walcowania wsadów rolkami stożkowymi o kącie kształtującym $\alpha = 15^\circ$ widoczna jest tendencja wzrostowa odchyłek wymiarowych wraz ze zwiększaniem kąta zukosowania narzędzi θ względem osi walcowania. Maksymalna wartość różnicy wymiarów poprzecznych dla kąta $\theta = 2,5^\circ$ wynosi 0,6 mm (przy $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,13$), dla $\theta = 5^\circ$ wynosi 0,87 mm (przy $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,3$) natomiast dla $\theta = 7,5^\circ$ wynosi 1,20 mm (przy $V_u = 10$ mm/s, $\delta = 1,3$). Ta największa wartość występuje przy zukosowanych narzędziach pod kątem $\theta = 7,5^\circ$ i dotyczy walcowania, gdy prędkość kształtowanego materiału jest większa niż prędkość przemieszczania uchwytu V_u , co w konsekwencji prowadzi do ściskania materiału i przepychania uchwytu wraz z wsadem zgodnie z kierunkiem walcowania. Należy zwrócić uwagę, że podczas walcowania za pomocą rolek stożkowych o kącie kształtującym $\alpha = 15^\circ$ otrzymano największe wartości sił promieniowych w porównaniu do pozostałych kompletów, co wpływało negatywnie na pozycjonowanie tłoczków siłowników elektrośrubowych, co wraz z odkształceniami wałów roboczych i klatki roboczej podczas kształtowania przyczyniło się do uzyskania największych odchyłek.

W przypadku kształtowania wsadów narzędziami roboczymi o kącie $\alpha = 20^\circ$ następuje wzrost owalizacji przekroju poprzecznego wyrobu wraz ze zwiększającym się kątem zukosowania θ narzędzi roboczych. W przypadku kąta $\theta = 2,5^\circ$ otrzymano maksymalną odchyłkę równą 0,58 mm (przy $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,3$), a dla kąta $\theta = 5^\circ$ równą 0,57 mm (przy $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,13$). Natomiast dla $\theta = 7,5^\circ$, gdzie odchylenia są największe w porównaniu do poprzednich ustawień kątowych rolek stożkowych wartość parametru Δd_o wynosi 1,1 mm, przy prędkości uchwytu $V_u = 20$ mm/s i $\delta = 1,3$. Jedną z przyczyn powodujących zmniejszenie owalizacji odwalcowanych wyrobów są mniejsze siły nacisku na narzędzia występujące podczas procesu kształtowania próbek badawczych wspomnianym zestawem narzędzi w porównaniu do wcześniej opisywanych rolek stożkowych o kącie $\alpha = 15^\circ$.

Ostatni wykorzystany zestaw rolek stożkowych charakteryzuje się największym kątem kształtującym $\alpha = 25^\circ$. Podobnie jak w poprzednich kompletach narzędzi wartość owalizacji wzrasta wraz ze zwiększaniem kąta zukosowania θ . Przy najmniejszej jego wartości, tj. $\theta = 2,5^\circ$ maksymalna odchyłka wynosi 0,89 mm (przy $V_u = 10$ mm/s, $\delta = 1,53$). Zwiększenie kąta do $\theta = 5^\circ$ spowodowało wzrost wartości owalizacji do 0,92 mm (przy $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,3$) a przy większym skośnym ustawieniu narzędzi, tj. $\theta = 7,5^\circ$ uzyskano maksymalną wartość różnicy wymiarów poprzecznych wynoszącą 1,04 mm (przy $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,53$).

Podsumowując otrzymane wyniki to najmniejszą średnią wartość odchyłki wymiarowej uzyskano podczas kształtowania za pomocą rolek stożkowych o kącie $\alpha = 20^\circ$. Zwiększanie kąta zukosowania θ względem osi wsadu dla każdego zestawu narzędzi roboczych powoduje wzrost parametru owalizacji Δd_o . Przy kącie $\theta = 7,5^\circ$ uzyskano największe wartości, czego przyczyną była

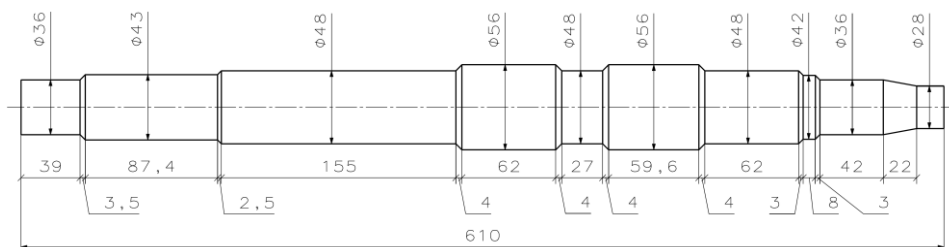
zwiększona prędkość walcowanego materiału w stosunku do prędkości uchwytu V_u .

Należy podkreślić fakt, że w przypadku kształtowania wydłużonych wyrobów w postaci przedkuwek wspomniane naddatki materiałowe będą wpływać na większą ilość wyływki w dalszych procesach obróbki plastycznej natomiast przy odkuwkach zostaną one usunięte metodami obróbki ubytkowej. Dopuszczalne wartości naddatków technologicznych dla uzyskanych odkuwek dla wymiarów średnicowych wynoszą 2 mm. Tym samym odnotowane wartości odchyłek (w szczególności dla $\alpha = 20^\circ$ oraz $\theta = 5^\circ$) są zgodne z zalecanymi tolerancjami wykonania i nie odbiegają od dokładności uzyskiwanych w procesach obróbki plastycznej na gorąco.

Na podstawie otrzymanych wartości owalizacji Δd_o stwierdzono, że zasadnym byłoby podjęcie prac modernizacyjnych nad zmianą układu zasilającego siłowniki wykorzystywane do pozycjonowania narzędzi roboczych oraz uchwytu szczękowego. Należałoby co najmniej dwukrotnie zwiększyć zakres sił kształtowania możliwych do uzyskania podczas walcowania wyrobów. Pozwoliłoby to jednocześnie uniknąć osiągania wartości maksymalnych sił promieniowych, przy których załączane były automatycznie układy przeciążeniowe w laboratoryjnej walcierce skośnej.

5.3. Przykładowe odkuwki

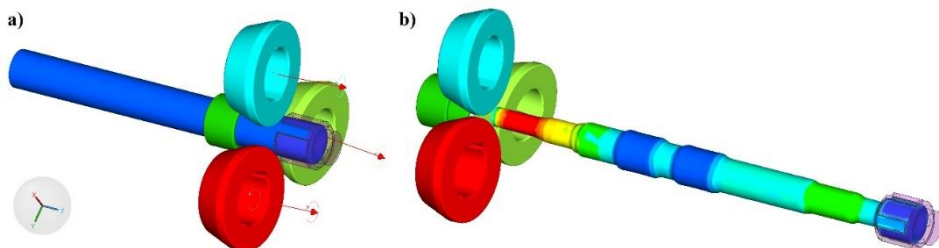
Weryfikację doświadczalną pozwalającą na sprawdzenie zasadności stosowania procesu walcowania skośnego do wytwarzania wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych przeprowadzono na przykładzie odkuwki wału do lekkiego samochodu transportowego. Szkic wyrobu wraz z zaznaczonymi wymiarami geometrycznymi zaprezentowano na rysunku 5.46.



Rys. 5.46. Odkuwka wału do lekkiego samochodu transportowego

W pierwszej kolejności przygotowano model procesu oraz przeprowadzono jego analizę numeryczną opartą na metodzie MES, wykorzystując oprogramowanie Simufact.Forming wer. 21 (rys. 5.47). Wykorzystano zestaw jednakowych rolek stożkowych o średnicy $D = 150$ mm i kącie kształtującym $\alpha = 25^\circ$. Narzędzia robocze zukosowano względem osi kształtowanego wyrobu pod kątem $\theta = 5^\circ$. W przedstawionej analizie rolki obracają się w tę samą stronę

z jednakową prędkością obrotową n równą 60 obr/min. Ponadto nadano ruch postępowy uchwytu, w którym zamocowano jeden z końców wsadu w postaci pręta stalowego w gatunku 100Cr6, o średnicy zewnętrznej d_0 równej 56 mm oraz długości początkowej $l_0 = 520$ mm.



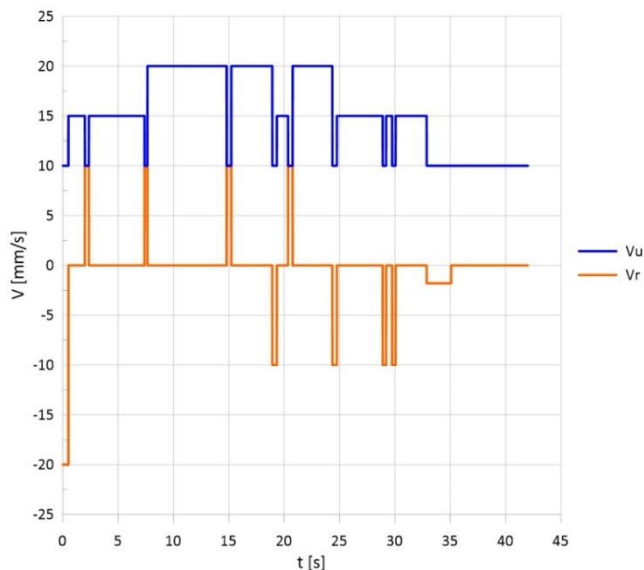
Rys. 5.47. Model numeryczny walcowania skośnego odkuwki: a) początek procesu, b) koniec procesu

Model materiałowy stali 100Cr6 wybrano z biblioteki oprogramowania Simufact.Forming. Opisany równaniem (3.2) charakteryzuje się końcową postacią przedstawioną poniżej:

$$\sigma_p = 3570,51 \cdot e^{(-0,00361237 \cdot T)} \cdot \varphi^{(0,000199803 \cdot T - 0,500043)} \cdot e^{\left(\frac{4,266269 \cdot 10^5 \cdot T - 0,117768}{\varphi}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(0,0002522279 \cdot T - 0,0980226)} \quad (5.6)$$

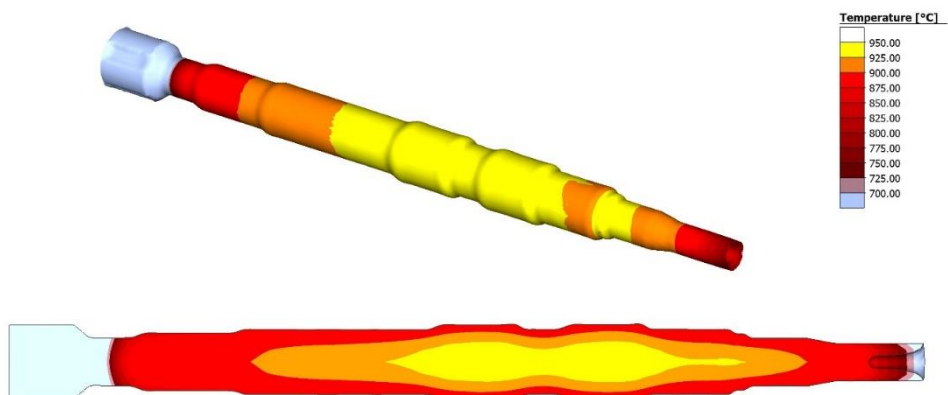
W obliczeniach numerycznych przyjęto również wartości pozostałych parametrów, tj.: czynnik tarcia na powierzchni kontaktu materiał-narzędzie równy 0,8, współczynnik wymiany ciepła pomiędzy rolkami a materiałem – 15 kW/m²K, temperaturę wsadu – 1000 °C oraz temperaturę narzędzi – 100 °C. W obliczeniach numerycznych wykorzystano model w postaci materiału sztywno-plastycznego, zastosowano elementy ośmiowęzłowe (heksagonalne) o wielkości 2,25 mm. Parametry dobierano na podstawie przeprowadzanych analiz numerycznych procesu opisanych w literaturze specjalistycznej [23–26, 37, 48, 49].

Dla uzyskania pożądanego kształtu walcowanego elementu określono sekwencję ruchu uchwytu oraz rolek stożkowych, a także ich prędkości posuwu w kierunku osiowym oraz promieniowym (rys. 5.48).



Rys. 5.48. Rozkład prędkości w kierunku osiowym (V_u) oraz w kierunku promieniowym (V_r)

Czas kształtowania wyrobu na podstawie zadanej trajektorii ruchu narzędzi roboczych wyniósł 42 sekundy. Pomimo długiego czasu procesu nie doszło do znacznego obniżenia temperatury walcowanego przedmiotu (rys. 5.49).

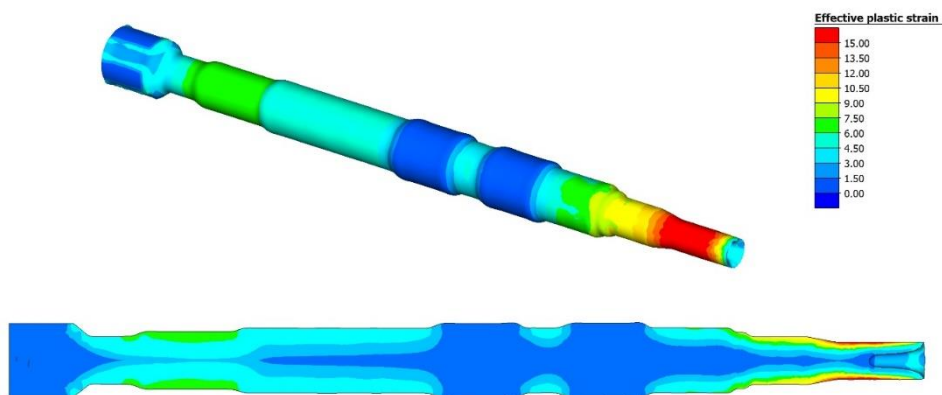


Rys. 5.49. Rozkład temperatury (w $^{\circ}\text{C}$) w odkuwce otrzymanej w procesie walcowania skośnego

Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest fakt, że ciągły kontakt narzędzi z materiałem następuje w sposób miejscowy. Ponadto można podkreślić, że straty ciepła odprowadzanego do rolek stożkowych oraz otoczenia rekompensowane są w wyniku generowania ciepła poprzez zamiany pracy tarcia i pracy odkształcenia plastycznego. Temperatura w środkowym obszarze walcowanego wału pozostaje względnie stabilna. Jednocześnie zaobserwowano, że w osi odkuwki wartość

temperatury jest nieznacznie wyższa niż przy jej zewnętrznej powierzchni, ze względu na to, że zmagazynowane ciepło nie jest bezpośrednio odprowadzane do otoczenia.

Rozkład intensywności odkształcenia na powierzchni oraz w przekroju osiowym odkuwki przedstawiono na rysunku 5.50. Analizowany rozkład prezentuje większe wartości odkształcenia występujące przy warstwie wierzchniej wyrobu i ich zmniejszenie wraz ze zbliżaniem do osi walcowanego elementu. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że kształtowany jest głównie materiał przy powierzchni zewnętrznej odkuwki. Maksymalne wartości odkształcenia uzyskano na ostatnim stopniu wałka, gdzie dokonano największej redukcji przekroju poprzecznego wsadu. Również w tym miejscu powstał lej czołowy w odkuwce, który jest charakterystyczny dla procesu walcowania skośnego. Jego przyczyną powstawania jest płynięcie materiału po powierzchni, gdzie w tym samym czasie rdzeń wsadu pozostaje nienaruszony bądź następuje jego niewielkie przemieszczenie. Zjawisko to powoduje straty materiału i konieczność uwzględniania odcinanego fragmentu podczas doboru materiału wsadowego. Ponadto konieczne okazało się doliczenie nadatków na tzw. kleszczowinę, która w omawianym przypadku wynosi ok. 50 mm.

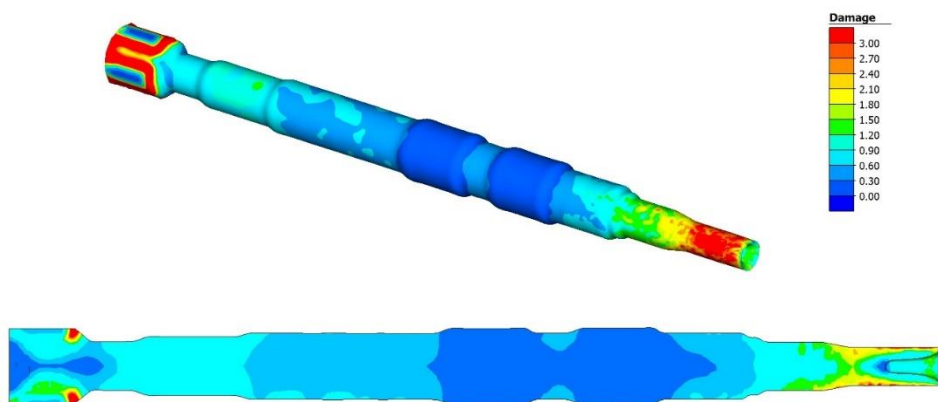


Rys. 5.50. Rozkład intensywności odkształcenia w odkuwce otrzymanej w procesie walcowania skośnego

Pęknięcie wewnętrzne materiału nazywane również efektem Mannesmanna występujące podczas walcowania skośnego jest jednym z ograniczeń procesu. W przypadku kształtowania za pomocą trzech narzędzi roboczych pęknięcia przybierają kształt pierścieni. Występują w pewnej odległości od osi wyrobu oraz głównie w strefie kształtowania, w której materiał poddawany jest obciskaniu obrotowemu. Przewidywanie zjawiska pęknięcia można określić na podstawie dostępnych kryteriów zniszczenia opierających się o różne funkcje zniszczenia.

W analizowanym przypadku wykorzystano znormalizowane kryterium Cockrofta–Lathama dostępne w oprogramowaniu Simufact.Forming, opisane równaniem (3.8).

Uzyskany rozkład funkcji zniszczenia (rys. 5.51) jest powiązany ze zmianą intensywności odkształcenia. Zwiększenie redukcji przekroju poprzecznego powoduje zwiększenie wartości funkcji zniszczenia, głównie przy ostatnim walcowanym stopniu odkuwki. Tym samym największe prawdopodobieństwo pęknięcia materiału będzie występować w obszarach, gdzie dokonano największych zmian średnic wsadu dla walcowanej odkuwki wału.



Rys. 5.51. Rozkład funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockrofta–Lathama) w odkuwce otrzymanej w procesie walcowania skośnego

W rezultacie przeprowadzonej symulacji numerycznej, stwierdzono, że istnieje możliwość wykonania wydłużonej odkuwki w postaci wału do lekkiego samochodu transportowego metodą walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych. Następnie podjęto próby doświadczalne weryfikujące uzyskane wyniki. Wykorzystano zmodernizowane stanowisko badawcze do walcowania skośnego, w którym zastąpiono siłowniki elektrośrubowe nowym zestawem siłowników hydraulicznych (rys. 5.52).



Rys. 5.52. Zmodernizowana laboratoryjna walcarka skośna z trzema rollkami kształtującymi

Siłowniki elektrośrubowe pomimo precyzyjnej dokładności pozycjonowania wykazywały ograniczenia w postaci generowanej siły nacisku tłoczyska. Podczas walcowania przy zwiększonych stopniach przerobu plastycznego materiału wsadowego następował wzrost siły potrzebnej do jego kształtowania, co wpływało negatywnie na dokładność położenia tłoczysk siłowników mocowanych w klatce walcowniczej a w następstwie narzędzi roboczych. Ostatecznie rzutowało to na wymiary geometryczne przekrojów poprzecznych uzyskiwanych odkuwek, co zaprezentowano w rozdziale 5.2.3. Ponadto wzrost siły nacisku tłoczyska siłownika powodował zwiększenie wartości natężenia prądu elektrycznego zasilającego poszczególne układy nimi sterujące, tj. sterowniki osi, tzw. Compax3S, co często doprowadzało do załączenia ich wewnętrznych systemów bezpieczeństwa (ograniczających przeciążenia) i ich automatycznego wyłączenia z użytkowania. Wprowadzona modernizacja umożliwiła eliminację wspomnianych ograniczeń występujących w pierwotnym stanowisku badawczym. Zamontowano agregat hydrauliczny, którego parametry techniczne zaprezentowano w tabeli 5.3, służący do zasilania poszczególnych siłowników hydraulicznych.

Tabela 5.3. Dane techniczne zasilacza hydraulicznego laboratoryjnej walcarki skośnej

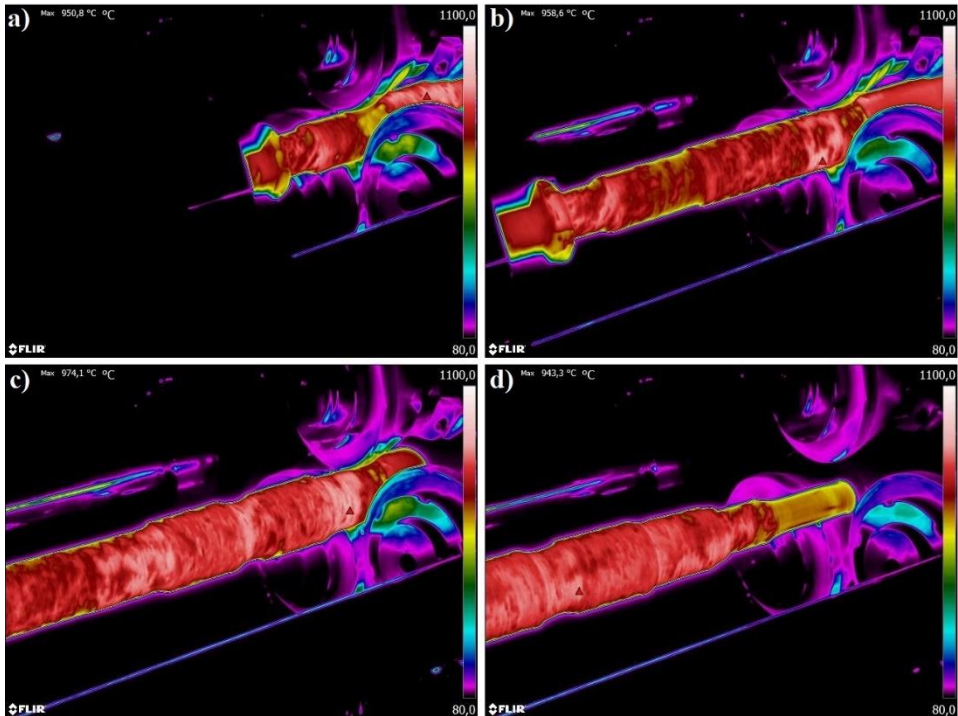
Zasilacz hydrauliczny		
Moc	[kW]	18,5
Napięcie zasilające	[V]	400
Ciśnienie nominalne	[bar]	210
Przepływ	[l/min]	48
Pojemność	[dm ³]	160

Każdy z siłowników posiada wbudowane enkodery absolutne służące do pozycjonowania tłoczków oraz odczytu aktualnego ich położenia. Parametry ustawcze oraz opisujące bieżący status pracy laboratoryjnej walcarki skośnej dostępne są w aplikacji sterującej wykonanej w środowisku programistycznym Codesys. Ponadto zmodernizowane stanowisko badawcze wyposażono w napięciowe czujniki ciśnienia (zakres 0–10 V) o pomiarze w zakresie od 0 do 250 barów, które umożliwiają rejestrację sił promieniowych oraz siły osiowej podczas procesu walcowania. Rejestracji parametrów siłowych dokonywano w oparciu o już istniejący układ pomiarowy bazujący na graficznym środowisku LabView (rys. 4.20 i 4.21).

Do prób doświadczalnych wykorzystano wsad w postaci pręta stalowego w gatunku 100Cr6 o średnicy d_0 równej 56 mm i długości l_0 wynoszącej 520 mm. Na początku materiał nagrzewano w piecu komorowym, oporowym typu LAC PK55 (rys. 5.3b) do temperatury 1100 °C. Różni się ona od zastosowanej w analizie numerycznej MES, gdzie przyjęto 1000 °C. Wynika to z faktu, że w symulacji numerycznej założono straty ciepła odprowadzanego do otoczenia podczas przeprowadzanych prac przygotowawczych przed rozpoczęciem procesu kształtowania, tj. przenoszenia materiału z pieca komorowego oraz jego montażu w uchwycie szczękowym. Następnie ustawiano pozycję początkową uchwytu z umieszczonym wsadem poprzez aplikację sterującą pracą walcarki dla rozpoczęcia procesu walcowania. Kształtowanie materiału na podstawie zadanej trajektorii ruchu narzędzi roboczych i uchwytu trwało ok. 35 sekund. Rozbieżność dotycząca czasu kształtowania odkuwki pomiędzy próbą doświadczalną oraz analizą MES wynika z przyjętego do obliczeń numerycznych dłuższego czasu wybiegu na końcowym stopniu wyrobu. Uzyskaną odkuwkę wału przedstawiono na rysunku 5.53.



Rys. 5.53. Odkuwka wału do lekkiego samochodu transportowego: a) bezpośrednio po procesie walcowania, b) po śrutowaniu, c) po odcięciu nadatków technologicznych, d) przekrój osiowy



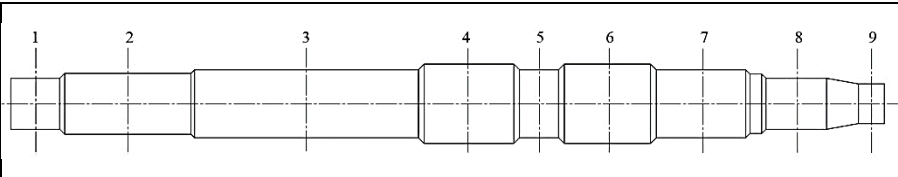
Rys. 5.54. Termogramy z prób doświadczalnych prezentujące rozkład temperatury (w °C) na powierzchni odkuwki: a) kształtowanie pierwszego stopnia wału, b) rozpoczęcie walcowania dwóch stopni o najmniejszym przerobie plastycznym, c) kształtowanie końcowych stopni wału, d) wyrób finalny

Podczas prób doświadczalnych dokonywano pomiaru temperatury walcowanej odkuwki wału wykorzystując kamerę termowizyjną Flir T860, za pomocą której zarejestrowano termogramy przedstawione na rysunku 5.54. Uzyskane wartości temperatury są zbieżne z wynikami otrzymanymi z analizy numerycznej walcowania wyrobu. Obszary odkuwki charakteryzujące się mniejszymi przekrojami poprzecznymi szybciej odprowadzają ciepło do rolek stożkowych oraz otoczenia aniżeli obszary o stopniach z większymi średnicami przekrojów, co zaprezentowano na termogramach 5.54b i 5.54d.

Wykonano również badanie niszczące w celu określenia występowania potencjalnych wad materiału w uzyskanej odkuwce wału (rys. 5.53d). W tym celu wyrób poddano obróbce ubytkowej, wykorzystując metodę frezowania poprzez usuwanie poszczególnych warstw materiału aż do osiągnięcia jego przekroju osiowego. Nie stwierdzono występowania wad wewnętrznych materiału w postaci pęknięć, co odpowiada uzyskanym rezultatom z przeprowadzonej analizy numerycznej procesu. Na powierzchni odkuwki widoczne są jednak rowki owinięte po jej obwodzie w kształcie linii śrubowej (rys. 5.53c), jednakże zostaną one usunięte podczas dalszego procesu technologicznego poprzez obróbkę skrawaniem.

Dokonano również pomiaru wymiarów geometrycznych poszczególnych stopni odkuwki wału i porównano z wymaganymi, nominalnymi średnicami zaprezentowanymi na rysunku 5.46. Uzyskane wyniki zaprezentowano w tabeli 5.4.

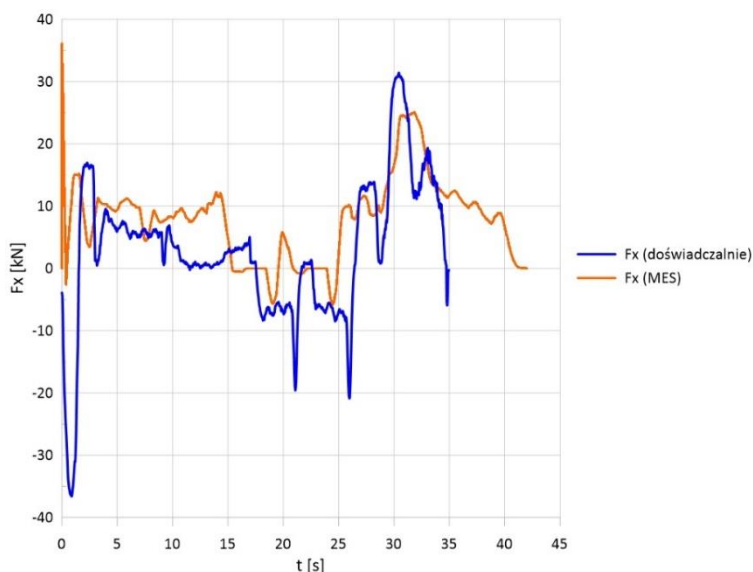
Tabela 5.4. Wymiary geometryczne odkuwki wału uzyskane z próby doświadczalnej



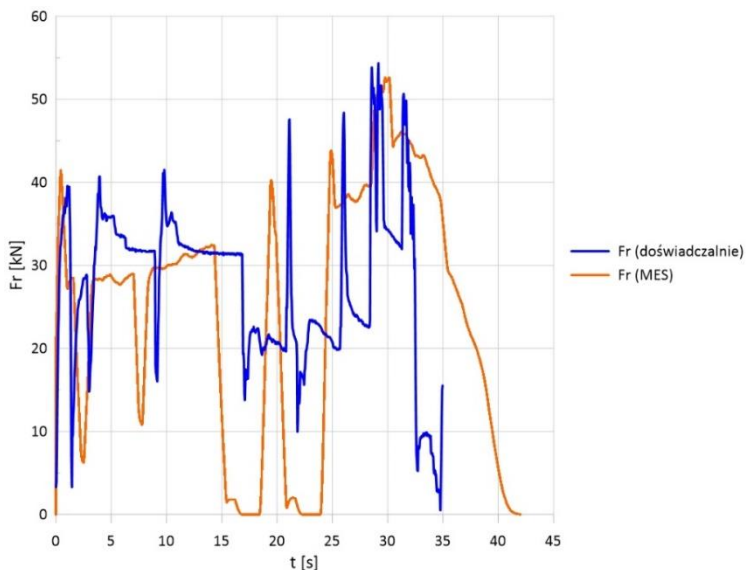
Nr przekroju poprzecznego	d_n [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	$\Delta d_o = d_1 - d_2$ [mm]
1	36	37,05	36,70	0,34
2	43	44,43	44,21	0,22
3	48	50,12	49,57	0,55
4	56	56,21	56,01	0,20
5	48	49,40	48,95	0,46
6	56	56,35	56,20	0,16
7	48	49,88	49,40	0,48
8	36	37,18	36,56	0,62
9	28	29,09	28,81	0,29

Pomiaru średnic dokonano w dwóch prostopadłych kierunkach przekroju dla danego stopnia odkuwki, podobnie jak to wykonano przy analizie próbek badawczych opisanej w rozdziale 5.2.3. Wyniki przedstawiają dobrą dokładność wymiarową i geometryczną. Największe odchylenie względem wymiaru nominalnego wynosi 2,12 mm, jednakże ten naddatek materiału zostanie usunięty w dalszym etapie produkcyjnym poprzez zastosowanie obróbki ubytkowej. Natomiast przekrój poprzeczny wyrobu ulega również owalizacji, która pomimo działania części kalibracyjnej narzędzi nie jest w pełni usuwana i wynosi maksymalnie do 0,62 mm.

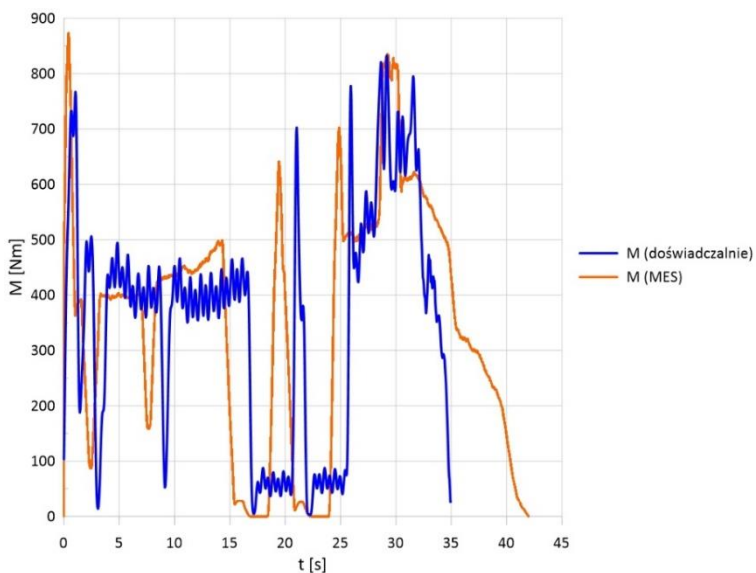
Podczas prób walcowania rejestrowano przebiegi parametrów siłowych w tym: momentu obrotowego, siły nacisku narzędzi (promieniowej) oraz siły osiowej w uchwycie. Wyniki z pomiarów porównano z rozkładami uzyskanymi z obliczeń numerycznych (rys. 5.55–5.57).



Rys. 5.55. Przebiegi zmian sił osiowych w procesie walcowania otrzymane z próby doświadczałnej oraz analizy MES



Rys. 5.56. Przebiegi zmian sił promieniowych w procesie walcowania otrzymane z próby doświadczalnej oraz analizy MES



Rys. 5.57. Przebiegi zmian momentów obrotowych w procesie walcowania otrzymane z próby doświadczalnej oraz analizy MES

W przedstawionym przykładzie walcowania odkuwki wału widoczne są wzrosty wartości siły promieniowej oraz momentu obrotowego na wale roboczym podczas zagłębiania się rolek stożkowych w materiał. Wartości tych parametrów

stabilizują się w przypadku kształtowania stopni wyrobu o ustalonej, stałej redukcji przekroju poprzecznego wsadu, podczas którego narzędzia nie zmieniają swojego położenia. Zaobserwowano, że w tym samym czasie następuje spadek siły ciągnącej na uchwycie szczękowym. Przyczyną tego zjawiska jest większa prędkość wydłużanego materiału w stosunku do prędkości przemieszczania uchwytu V_u , powodując ściskanie materiału, co widoczne jest na wykresach w postaci ujemnych wartości siły osiowej.

Dodatkowo wykonano próby laboratoryjne walcowania skośnego, podczas których kształtowano wydłużone, osiowosymetryczne odkuwki i przedkuwki o prostszych, jak również bardziej skomplikowanych kształtach (rys. 5.58) [54].



Rys. 5.58. Przykładowe wyroby otrzymane metodą walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych

Tym samym poddano weryfikacji możliwość walcowania wyrobów o różnych kształtach obwiedni, której zarys wprowadzano do aplikacji sterującej pracą walcarki. Zaprezentowane przykładowe elementy charakteryzują się poprawną dokładnością geometryczną zgodną z założonymi wartościami nominalnymi. Ponadto powierzchnia zewnętrzna wykazuje dobrą jakość, jak również nie stwierdzono wewnętrznych pęknięć w uzyskanych wyrobach pomimo stosowanych dużych redukcji przekrojów poprzecznych.

5.4. Ograniczenia przebiegu procesu walcowania skośnego

Przeprowadzone prace badawcze wykazały występowanie ograniczeń wpływających na przebieg procesu kształtowania wyrobów osiowosymetrycznych metodą walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych.

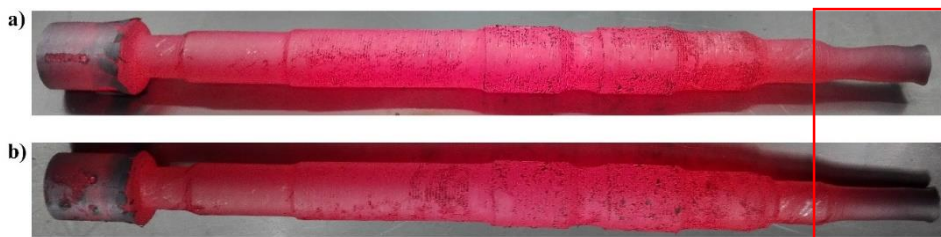
Pierwszym z nich jest wyboczenie pręta podczas walcowania. Przyczyną wpływającą na to zjawisko jest większa prędkość wydłużanego materiału

wychodzącego z narzędzi roboczych w stosunku do prędkości przemieszczania uchwytu V_u . Następuje ściskanie materiału wsadowego w trakcie kształtowania, wpływające na spadek siły ciągnącej w uchwycie szczękowym, co w następstwie powoduje utratę stateczności pręta. W przypadku walcowania próbek badawczych większe prawdopodobieństwo wystąpienia tego ograniczenia było podczas kształtowania narzędziami roboczymi zukosowanymi pod kątem $\theta = 7,5^\circ$. Przy prędkości przemieszczania uchwytu V_u równej 20 mm/s oraz 10 mm/s, która kolejno jest ponad trzykrotnie oraz sześciokrotnie mniejsza od prędkości osiowej kształtowanego materiału występowały warunki sprzyjające występowaniu tego ograniczenia (rys. 5.59).



Rys. 5.59. Zdeformowane próbki badawcze poprzez wyboczenie: a) $\alpha = 15^\circ$, $\theta = 7,5^\circ$, $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,3$, b) $\alpha = 20^\circ$, $\theta = 7,5^\circ$, $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,3$, c) $\alpha = 25^\circ$, $\theta = 7,5^\circ$, $V_u = 20$ mm/s, $\delta = 1,53$

Kolejnym ograniczeniem występującym w trakcie kształtowania osiowosymetrycznych wyrobów jest deformacja materiału w postaci triangularyzacji kształtu przekroju poprzecznego. Przyczyną tego zjawiska jest większa prędkość przemieszczającego się uchwytu V_u w stosunku do prędkości osiowej walcowanego wsadu. Następuje wówczas powierzchniowe kształtowanie wsadu poprzez płynięcie materiału głównie w warstwie wierzchniej, które odbywa się względnie szybciej niż w kierunku promieniowym, gdzie dokonuje się niewielkie przemieszczenie materiału. W konsekwencji nieregularne płynięcie materiału prowadzi do deformacji kształtowanych odkuwek bądź przedkuwek. W przedstawionej odkuwce wału na rysunku 5.60 widoczny jest efekt wspomnianego zjawiska. Nieregularny kształt krańcowego stopnia wału uzyskano przy przemieszczaniu uchwytu z prędkością V_u równą 20 mm/s (rys. 5.60a). Jej zmniejszenie do $V_u = 15$ mm/s skutkowało otrzymaniem poprawnej powierzchni walcowej omawianego stopnia wału (rys. 5.60b).



Rys. 5.60. Odkuwka wału do lekkiego samochodu transportowego:
 a) zdeformowany stopień wału, b) poprawnie ukształtowany stopień wału

Kolejnym z ograniczeń walcowania skośnego jest występowanie zarysu linii śrubowej na powierzchni ukształtowanych odkuwek. Powodowane jest ono przez większą prędkość przemieszczającego się uchwytu V_u w stosunku do prędkości osiowej walcowanej próbki stalowej. Tym samym powierzchnia kształtowanego wsadu nie jest poddawana w pełni kalibracji przez część walcową rolki stożkowej, służącej usuwaniu powstałych w poprzedniej fazie procesu walcowania nieregularności kształtu wyrobu (rys. 5.61). Występowaniu tego ograniczenia sprzyja także stosowanie rolek, których strefa kalibracyjna zakończona jest krawędziami zaokrąglonymi małymi promieniami.



Rys. 5.61. Próbkki badawcze z widocznymi zarysami linii śrubowych: a) $\alpha = 15^\circ$, $\theta = 7,5^\circ$, $V_u = 40$ mm/s, $\delta = 1,53$, b) $\alpha = 25^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $V_u = 40$ mm/s, $\delta = 1,53$, c) $\alpha = 25^\circ$, $\theta = 7,5^\circ$, $V_u = 40$ mm/s, $\delta = 1,53$

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono metodę kształtowania wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych, wykorzystując proces walcowania skośnego za pomocą trzech narzędzi roboczych w postaci rolek stożkowych. Charakteryzuje się ona dużą uniwersalnością stosowania ze względu na możliwość wykorzystania jednego zestawu narzędzi do walcowania różnych wyrobów, których kształt końcowy będzie wynikiem zaprogramowanego ruchu rolek oraz uchwytu szczękowego. Powoduje to, że proces ten znajduje uzasadnienie finansowe już w przypadku produkcji małoseryjnej i jednostkowej, gdzie głównymi metodami wytwarzania jest obróbka skrawaniem.

Analizę teoretyczną w zakresie symulacji numerycznej, opartą na metodzie elementów skończonych (MES) zrealizowano w warunkach przestrzennego stanu odkształceń. W ten sposób uzyskano możliwość wyznaczenia m. in. rozkładów intensywności naprężeń, odkształceń oraz parametrów siłowych występujących podczas walcowania. Otrzymane wyniki umożliwiły określenie możliwości kształtowania wydłużonych wyrobów z wykorzystaniem metody walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych. Ponadto, uzyskane parametry wykorzystano do założeń związanych z pracami nad przygotowaniem konstrukcji stanowiska badawczego.

Badania doświadczalne weryfikujące zasadność zastosowanej metody kształtowania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, wykorzystując walcarkę skośną sterowaną numerycznie z trzema rolkami stożkowymi. Do realizowanych badań wykorzystano zestaw trzech kompletów narzędzi roboczych, różniących się kątem kształtującym α . Stosowano zmienne warunki początkowe procesu poprzez zmianę kąta zukosowania narzędzi θ względem osi walcowanego wsadu, prędkości przemieszczania uchwytu V_u , jak również różnych stopni gniotu δ . Próby badawcze przeprowadzono wykorzystując materiał wyjściowy w postaci prętów stalowych w gatunku C60.

Uzyskane wyniki z badań doświadczalnych potwierdziły zasadność stosowania procesu walcowania skośnego do kształtowania wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych. Przyjęte zestawienia ustawień dla prób laboratoryjnych (przedstawione w tabeli 5.1), wykorzystujące trzy komplety rolek stożkowych różniące się kątem kształtującym α wyjaśniły ich wpływ na rejestrowane parametry siłowe w trakcie procesu, jak również na jakość otrzymywanych wyrobów, co zaprezentowano w rozdziale 5.2. Ponadto określono przyczyny zakłócające stabilność przebiegu walcowania skośnego. Należą do nich: wyboczenie wsadu podczas walcowania, triangularyzacja kształtowanych stopni półfabrykatów oraz występowanie zarysu linii śrubowej na powierzchni walcowanych wyrobów.

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz obliczenia numeryczne umożliwiły sformułowanie poniższych wniosków końcowych:

- Wydłużone wyroby osiowosymetryczne można kształtować metodą walcowania skośnego za pomocą trzech narzędzi roboczych (rolek).
- Walcarka skośna sterowana numerycznie zapewnia uzyskanie wyrobów, o zarysie obwiedni powstającej w wyniku synchronicznego przemieszczenia rolek stożkowych i uchwytu szczękowego.
- Najlepszy kompromis pomiędzy jakością uzyskiwanych wyrobów a parametrami siłowymi uzyskano przy stosowaniu zestawu rolek stożkowych o kącie kształtującym $\alpha = 20^\circ$. Zwiększenie kąta kształtującego α wpływa na wzrost wartości siły osiowej F_x w uchwycie dla każdego skośnego ustawienia narzędzi roboczych, jednocześnie zmniejsza siłę promieniową F_r na rolce stożkowej. Powoduje to ponadto wzrost wartości parametru falistości W_r , wpływając na pogorszenie jakości powierzchni zewnętrznej wyrobów.
- Zalecane jest stosowanie kąta zukosowania narzędzi względem osi walcowania o wartości $\theta = 5^\circ$. Ustawianie rolek stożkowych z większym kątem θ powoduje wzrost wartości parametru falistości W_r , co w konsekwencji przekłada się na pogorszenie jakości warstwy wierzchniej otrzymywanych wyrobów. Ponadto zmniejsza siłę ciągnącą F_x w uchwycie szczękowym poprzez zwiększanie prędkości osiowej walcowanego materiału wsadowego, co przyczynia się do występowania zjawiska ograniczającego w postaci wyboczenia.
- Większe prędkości V_u należy stosować przy stopniach gniotu mniejszych $\delta \leq 1,13$. W przypadku większego przerobu plastycznego ($\delta \geq 1,3$) należy stosować prędkość V_u uchwytu, co najmniej dwukrotnie mniejszą od prędkości osiowej rolki wynikającej ze skośnego ustawienia narzędzi roboczych.
- Wsad podczas walcowania skośnego powinien być umieszczony w tulei prowadzącej usytuowanej przed kotłową walcowniczą, gdyż minimalizuje to swobodne przemieszczanie promieniowe jednego z jego nieutwierdzonych końców.
- Stabilny przebieg procesu walcowania skośnego może zostać zakłócony zjawiskami ograniczającymi, w postaci: wyboczenia wsadu, triangularyzacji kształtu odkuwki oraz kształtowania zarysu linii śrubowej na obwodzie wyrobu.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowana metoda walcowania skośnego za pomocą trzech rolek stożkowych może stać się alternatywną metodą kształtowania wydłużonych wyrobów osiowosymetrycznych w postaci przedkuwek do dalszych procesów obróbki plastycznej, jak również w formie odkuwek, jako wyrób finalny. Zasadnym będzie kontynuowanie prac badawczych, głównie w zakresie określenia optymalnej prędkości przemieszczania uchwytu szczękowego w przypadku zmian stopnia gniotu δ .

Literatura

1. Behrens B.A.: *Forge Rolling*. „CIRP Encyclopedia of Production Engineering”, 2018, s. 1–6.
2. Brensing K. H., Sommer B.: *Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes*. Salzgitter Grossrohre GmbH.
3. Bulzak T., Tomczak J., Pater Z., et al.: *A Comparative Study of Helical and Cross-Wedge Rolling Processes for Producing Ball Studs*. „Materials”, 2019, vol. 12, nr 18, s. 1–11.
4. Cai Z.: *Precision design of roll forging die and its application in the forming of automobile front axles*. „Journal of Materials Processing Technology”, 2005, vol. 168, s. 95–101.
5. Dietrich J.: *Praxis der Umformtechnik. Umform und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*. 12 Auflage. Springer Viewag, 2018.
6. Dobrucki W.: *Podstawy konstrukcji i eksploatacji walcowni*. Wydawnictwo „Śląsk. Katowice 1973.
7. Domblesky J. P., Shivpuri R., Altan T.: *A Review of Radial Forging Technology Including Preform Design for Process Optimization*. The Ohio State University Columbus, Ohio 1994.
8. Dziemballa H., Manke L., Houska M., et al.: *Verfahren und Vorrichtung zum Querwalzen abgestufter Hohlwellen oder zylindrischer Hohlteile aus einem Rohr*. Patent nr DE 102007041149, Biuletyn Europejskiego Urzędu Patetowego, 2009, nr 10.
9. Ficker T., Hardtmann A.: *Entwicklung des Axial-Vorschub-Querwalzens an der TU Dresden - ein historischer Überblick von Anfang der 1970-er Jahre bis heute*. „Verlag Meisenbach GmbH”, 2012, vol. 2, s. 1–10.
10. Gontarz A., Tomczak J., Pater Z., et al.: *Effect of the Forming Zone Length on Helical Rolling Processes for Manufacturing Steel Balls*. „Materials”, 2019, vol. 12, nr 18, s. 1–13.
11. Grupp P., Kienhofer C.: *Rotary Swaging Technology. Processes, Advantages, Possibilities*. Felss GmbH Maschinenfabrik, Koenigsbach-Stein 2003.
12. Houska M., Rotarescu M.-I.: *Experimental and Finite-Element Analysis of Axial Feed Bar Rolling (AVQ)*. „Advanced Technology of Plasticity”, 1999, vol. 2, s. 1523–1528.
13. <https://help.codesys.com/> [dostęp lipiec 2020 r.].

14. Hu B., Shu X., Yu P., et al.: *The strain analysis at the broading stage of the hollow railway axle by multi wedge cross wedge rolling*. „Applied Mechanics and Materials”, 2014, vol. 494–495, s. 457–460.
15. Hua X., Xiao G., Cheng J.: *Numerical Simulation of Blank-Making Roll Forging Process for Heavy Automotive Front Axle*. „Atlantis Press”, 2012, s. 481–484.
16. Jarocki J., Wasiunyk P.: *Kuźnictwo i prasownictwo. Część I*. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1960.
17. Kozhevnikova G.V., Rudovich A., Shchukin V.Y.: *Cross-Wedge Rolling Railroad Wheel Axles*. „Forge”, 2017, nr 8.
18. Lasco Umformtechnik GmbH: *Cross-Wedge and Forging Rolls. Solid Forming Machines*. 2006, s. 1–18.
19. Lasco Umformtechnik GmbH: *Rolling Machines. Efficiency through perfection*. 2019, ver. 1, nr 9, s. 1–15.
20. Li R., Jiao S., Wang J.: *Roll forging technology of automotive front axle precision performing and die design*. „IERI Procedia”, 2012, vol. 1, s. 166–171.
21. Lin L., Wang B., Zhou J., et al.: *Manufacturing large shafts by a novel flexible skew rolling process*. „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2022, vol. 118, s. 2833–2851.
22. Lipski T.: *Kucie na kowarkach*. Warszawa 1979.
23. Lis K., Pater Z.: *Analiza numeryczna walcowania skośnego odkuwki stopniowanego wałka ze stopu aluminium 6061*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2017, vol. 62, nr 12, s. 67–70.
24. Lis K., Pater Z.: *Analiza numeryczna walcowania skośnego stopniowanych wałków ze stopów metali nieżelaznych*. „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2019, vol. 64, nr 1, s. 21–25.
25. Lis K., Pater Z.: *Analiza numeryczna wpływu kąta kształtującego na parametry siłowe w procesie walcowania skośnego wałka stopniowanego*. „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, 2018, vol. 85, nr 7, s. 219–222.
26. Lis K., Wójcik Ł., Pater Z.: *Numerical analysis of a skew rolling process for producing a crankshaft preform*. „Open Engineering”, 2016, vol. 6, s. 581–584.
27. Lorenz B.: *Ressourceneffiziente Formgebungsverfahren für Titan und hochwarmfeste*. Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology Chemnitz IWU Legierungen, 2013, s. 64–71.

28. Meyer M., Stonis M., Behrens B.A.: *Cross wedge rolling and bi-directional forging of preforms for crankshafts*. „Production Engineering. Research and Development”, 2015, vol. 9, s. 61–71.
29. Meyer M., Stonis M., Behrens B.A.: *Cross wedge rolling of preforms for crankshafts*. „Key Engineering Materials”, 2012, vol. 504–506, s. 205–210.
30. Nieschwietz P. J., Knauf F., Szczepanik S.: *Kowarka o napędzie hydraulicznym i jej zastosowanie*. „Obróbka Plastyczna Metali”, 2016, vol. 27, nr 4, s. 341–352.
31. Pater Z.: *A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls*. „Metalurgija”, 2016, vol. 2, s. 233–236.
32. Pater Z.: *Analysis of Helical Rolling Process of Balls Formed From a Head of a Scrapped Rail*. „Advances in Science and Technology Research Journal”, 2016, vol. 10, nr 30, s. 110–114.
33. Pater Z.: *Analysis of the helical wedge rolling process for producing a long stepped shaft*. „Key Engineering Materials”, 2014, vol. 622–623, s. 893–898.
34. Pater Z.: *Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a workholding bolt*. „Metalurgija”, 2014, vol. 53, s. 653–656.
35. Pater Z.: *Walcowanie poprzeczno-klinowe*. Politechnika Lubelska, Lublin 2009.
36. Pater Z., Bulzak T., Tofil A. et al.: *Helical-Wedge rolling of balls*. „Kovarenstvi”, 2013, nr 47, s. 84–87.
37. Pater Z., Bulzak T., Tomczak J.: *Numerical analysis of a skew rolling process for producing a stepped hollow shaft made of titanium alloy Ti6Al4V*. „Archives of Metallurgy and Materials”, 2016, vol. 61, nr 2, s. 677–682.
38. Pater Z., Samołyk G.: *Podstawy technologii obróbki plastycznej metali*. Politechnika Lubelska, Lublin 2013.
39. Pater Z., Samołyk G.: *Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali*. Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
40. Pater Z., Tofil A.: *Analiza procesu walcowania śrubowo-klinowego odkuwki korpusu noża obrotowego*. „Hutnik, Wiadomości Hutnicze”, 2013, vol. 80, s. 692–696.

41. Pater Z., Tomczak J.: *Innowacyjne technologie obróbki plastycznej metali rozwijane w Politechnice Lubelskiej. „Obróbka Plastyczna Metali”*, 2015, vol. 26, nr 3, s. 241–254.
42. Pater Z., Tomczak J.: *Walcowanie śrubowe kul do młynów kulowych*. Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
43. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., et al.: *Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls*. „International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 2013, vol. 67, s. 1–7.
44. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails*. „Procedia Manufacturing”, 2017, vol. 11, s. 466–473.
45. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *An Innovative Method for Forming Balls by Cross Rolling*. „Materials”, 2018, vol. 11, nr 10, s. 1–14.
46. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Analysis of a cross wedge rolling process for producing drive shafts*. „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2018, vol. 94, s. 3075–3083.
47. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *New forming possibilities in cross wedge rolling processes*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2018, vol. 18, s. 149–161.
48. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts*. „Metalurgija”, 2015, vol. 54, nr 4, s. 627–630.
49. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Numerical analysis of the skew rolling process for rail axles*. „Archives of Metallurgy and Materials”, 2015, vol. 60, nr 1, s. 415–418.
50. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Walcarka skośna*. Patent nr 236319, Biuletyn Urzędu Patentowego, 2017, nr 15.
51. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.: *Wpływ kształtu obrzeża na przebieg procesu walcowania kul*. „Mechanik”, 2013, vol. 3, s. 187–191.
52. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., et al.: *A helical wedge rolling process for producing a ball pin*. „Procedia Manufacturing”, 2018, vol. 27, s. 27–32.
53. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., et al.: *Walcarka nawrotna*. Patent nr 410189, Biuletyn Urzędu Patentowego, 2016, nr 11.
54. Pater Z., Tomczak J., Lis K., et al.: *Forming of rail car axles in a CNC skew rolling mill*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2020, vol. 3, nr 3, s. 1–13.

55. Pater Z., Weroński W. S.: *Podstawy procesu walcowania poprzeczno-skinowego*. Politechnika Lubelska, Lublin 1996.
56. Penkała P.: *Metodologia pomiarów istotnych parametrów walcowania skośnego*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, 2011, nr 2, str. 792–799.
57. Piwek V., Kuhfuss B., Moumi E., Hork M.: *Light Weight Design Of Rotary Swaged Components And Optimization Of The Swaging Process*. „International Journal of Material Forming”, 2010, vol. 3, nr 1, s. 845–848.
58. Quanxian W., Qiping W., Jianming X.: *Study on the method for groove design in the helical rolling of steel balls*. „Journal of Materials Processing Technology”, 1995, vol. 55, s. 340–344.
59. Ren X., Liu Y.: *Study on the Influence of Deforming Velocity on Steel Ball Quality Based on DEFORM*. „Applied Mechanics and Materials”, 2011, vol. 117–119, s. 1806–1809.
60. Ren X., Liu Y., Jin Y.: *Optimization of Screw Rolling Ball Process Parameters Nased on Orthogonal Test*. „Applied Mechanics and Materials”, 2012, vol. 201–202, s. 1190–1193.
61. Rut T., Walczyk W.: *Nowe zastosowania i możliwości technologiczne metody TR*. „Obróbka Plastyczna Metali”, 2007, vol. 18, nr 4, s. 3–10.
62. Satish G. D., Singh N.K., Ohdar R.K.: *Preform optimization of pad section of front axle beam using Deform*. „Journal of Materials Processing Technology”, 2008, vol. 203, s. 102–106.
63. Schubert N., Steger J., Gerlach M., et al.: *Production planning for optimal mass pre-distribution for axial feed cross rolling*. „Procedia Manufacturing”, 2019, vol. 27, s. 192–196.
64. Shi X., Wang B.: *Numerical Simulation of Al Ball Forming Process in Skew Rolling*. „Material Science Forum”, 2011, vol. 704–705, s. 151–154.
65. Shor E.I.: *Nowyje procesy prokatki*. Gosudarstwennoje Nauczno-Technicheskije Izdatelstwo Literatury po Czernoj i Cwietnoj Metalurgii, Moskwa 1960.
66. 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”, 2012, vol. 184–185, s. 75–79.
67. Shu X., Wei X., Li C., et al.: *The influence rules of stress about technical parameters on synchronous rolling railway axis with multi wedge cross rolling*. „Applied Mechanics and Materials”, 2010, vol. 37–38, s. 1482–1488.

68. Simufact MSC Software Company: *Friction modeling in Simufact Forming*.
69. Sińczak J.: *Podstawy procesów przeróbki plastycznej*. Wydawnictwo naukowe AKAPIT, Kraków 2010.
70. SMS Group GmbH. *Forging Rolls. RW/ARWS Series*. 2017.
71. SMS Group GmbH. *SMX Radial forging machines. All-round pioneers*. 2017.
72. Sun B., Zeng X., Shu X., et al.: *Feasibility study on forming hollow axle with multi wedge synchrostep by cross wedge rolling*. „Applied Mechanics and Materials”, 2012, vol. 201–202, s. 673–677.
73. Tekkaya A. E., Homberg W., Brosius A.: *60 Excellent Inventions in Metal Forming*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015, s. 253–259.
74. The Ajax Manufacturing Co. *Wide Adjustment Forging Rolls*. Biuletyn nr 91-D, s. 1–13.
75. Tofil A.: *Procesy kształtowania półwyrobów w uniwersalnej walcierce kuźniczej*. Politechnika Lubelska, Lublin 2016.
76. Tofil A., Pater Z.: *Overview of the Research on Roll Forging Process*. „Advances in Science and Technology Research Journal”, 2017, vol. 11, nr 2, s. 72–86.
77. Tomczak J.: *Studium procesów obciskania obrotowego odkuwek drążonych*. Politechnika Lubelska, Lublin 2016.
78. Tomczak J., Bartnicki J.: *Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej*. Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
79. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J.: *Skrew Rolling of Balls in Multiple Helical Impressions*. „Archives of Metallurgy and Materials”, 2013, vol. 58, nr 4, s. 1071–1076.
80. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *A helical rolling process for producing ball studs*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2019, vol 19, nr 4, s. 1316–1326.
81. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Walcarka skośna*. Patent nr 238841, Biuletyn Urzędu Patentowego, 2020, nr 11.
82. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T., et al.: *Design and technological capabilities of a CNC skew rolling*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2021, vol. 21, s. 1–17.
83. Vollertsen F.: *Micro Metal Forming*. Springer Verlag Berlin Heidelberg 2013.

84. Wasiunyk P.: *Kucie matrycowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975.
85. Wasiunyk P.: *Walcownictwo i ciągarstwo*. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1975.
86. Wasiunyk P., Jarocki J.: *Kuźnictwo i prasownictwo*. WSiP, Warszawa 1963.
87. Wolfgarten M., Rosenstock D., Schaeffer L., Hirt G.: *Implementation of an open-die forging process for a large hollow shafts for wind power plants with respect to an optimized microstructure*. "La Metallurgia Italiana International Journal of the Italian Association for Metallurgy", 2015, nr 4, s. 43–49.
88. www.amtengine.com/en/ [dostęp maj 2020 r.].
89. www.beltechnologia.by/ [dostęp maj 2020 r.].
90. www.chinahongjie.com/Item/list.asp?id=1723 [dostęp maj 2020 r.].
91. www.forging.org [dostęp kwiecień 2020 r.].
92. www.inop.poznan.pl [dostęp kwiecień 2020 r.].
93. www.lasco.com/umformtechnik/reckwalze.html [dostęp maj 2020 r.].
94. www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Downloads/Compax3_support_page.pdf [dostęp lipiec 2020 r.].
95. www.vniimetmash.com [dostęp maj 2020 r.].
96. Yang S.C., Khen 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”, 2001, vol. 215, s. 523–532.
97. Zaleski K., Matuszak J., Zaleski R.: *Metrologia warstwy wierzchniej*. Politechnika Lubelska, Lublin 2018.
98. Zhang H., Wang B., Lin L., et al: *Numerical analysis and experimental trial of axial feed skew rolling for forming bars*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2022, vol. 22, s. 1–17.
99. Zhang Q., Jin K., Mu D., et al.: *Rotary swaging forming process of tube workpieces*. „Procedia Engineering”, 2014, vol. 81, s. 2336–2341.
100. Zhao J., Lu L.: *The application of multi wedge cross wedge rolling forming long shaft technology*. „Applied Mechanics and Materials”, 2012, vol. 101–102, s. 1002–1005.

101. Zhou J., Yu Y., Zeng Q.: *Analysis and experimental studies of internal voids in multi wedge cross wedge rolling stepped shaft.* „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2014, vol. 72, s. 1559–1566.
102. Zhuang W., Hua L., Wang X., et al.: *Numerical and experimental investigation of roll forging of automotive front axle beam.* „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2015, vol. 79, s. 1761–1777.