



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO- TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Opracowanie technologii walcowania pierścieni na
przykładzie stopu aluminium**

Mgr inż. Maria Gąsiorkiewicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski

Słowa kluczowe: walcowanie pierścieni, walcarka, stop aluminium 6082

WROCŁAW 2025

*Składam serdeczne podziękowania
Panu prof. dr hab. inż. Zbigniewowi Gronostajskiemu
za okazana pomoc, cierpliwość i wsparcie naukowe.*

Pragnę również podziękować rodzinie za wsparcie i zrozumienie.

Spis treści

Spis treści	3
1. Wprowadzenie	7
2. Stan zagadnienia – literatura	9
2.1. Podsumowanie analizy literatury	29
3. Cel i teza pracy	31
4. Stanowisko badawcze	33
4.1. Budowa walcarki	34
4.2. Parametry walcarki	38
4.3. Obliczenia dla trzpienia kształtującego	39
4.4. Praca walcarki (działanie walcarki)	42
5. Materiał badawczy.....	46
6. Symulacje numeryczne.....	48
6.1. Dobór parametrów wejściowych	48
6.2. Wyniki symulacji numerycznych	51
7. Wstępne próby walcowania pierścieni	54
8. Badania doświadczalne walcowania pierścieni dla procesu z różnym ustawieniem trzpienia.....	59
8.1. Wyniki badań doświadczalnych.....	60
8.2. Badania kształtowania pierścienia z trzpieniem wahliwym podczas walcowania 62	
8.3. Analiza wyników badań doświadczalnych	63
8.4. Pomiary twardości	75
9. Wyniki obserwacji mikrostruktury.....	83
9.1. Wyniki badań mikrostruktury w technice TEM dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°	86
9.2. Wyniki badań mikrostruktury w technice TEM dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 4°	90
9.3. Badania EBSD pierścieni odkształconych	94
10. Potencjał wdrożeniowy opracowanej metody	99
11. Podsumowanie i wnioski końcowe	102

Wykaz ważniejszych oznaczeń

n_t - prędkość obrotowa trzpienia

V - minimalna prędkość obwodowa

d_t - średnica trzpienia

V_L - prędkość liniowa trzpienia

f_{obr} - posuw osiowy na jeden obrót pierścienia

n_s - liczba obrotów silnika

i_s - przełożenie przyjęte dla przekładni ślimakowej

i_w - przełożenie przyjęte dla przekładni walcowej

i_n - całkowite przełożenie napędu

P - skok gwintu śruby

M - moment

η - sprawność układu

η_s - sprawność przekładni ślimakowej

η_w - sprawność przekładni walcowej

P_s - moc silnika

Streszczenie

Rozprawa doktorska poświęcona jest opracowaniu i analizie procesu walcowania pierścieni ze stopu aluminium EN AW-6082 z wykorzystaniem nowatorskiej walcarki laboratoryjnej wyposażonej w wychylny trzpień kształtujący. Celem pracy było określenie wpływu kąta pochylenia trzpienia na przebieg procesu, stabilność walcowania oraz właściwości geometryczne i materiałowe uzyskiwanych pierścieni. Opracowana metodyka obejmowała symulacje numeryczne MES, eksperymenty laboratoryjne oraz analizy mikrostruktury i twardości. Wyniki badań wykazały, że umiarkowane pochylenie trzpienia (ok. 2°) oraz jego ruch wahliwy sprzyjają równomiernemu płynięciu materiału, zmniejszają ryzyko niestabilności procesu i prowadzą do uzyskania pierścieni o jednorodnej mikrostrukturze i stabilnych wymiarach. Zbyt duży kąt nachylenia powodował utratę ciągłości kontaktu narzędzi i lokalne deformacje. Opracowana walcarka umożliwia precyzyjną kontrolę parametrów procesu i stanowi demonstrator nowej technologii walcowania pierścieni ze stopów lekkich. Wyniki badań mają znaczenie poznawcze i aplikacyjne, otwierając możliwości wdrożenia technologii w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i maszynowym.

Abstract

The doctoral thesis is devoted to the development and analysis of the rolling process of EN AW-6082 aluminium alloy rings using an innovative laboratory rolling mill equipped with a tilting forming mandrel. The aim of the work was to determine the influence of the mandrel tilt angle on the process, rolling stability and the geometric and material properties of the rings obtained. The methodology developed included FEM numerical simulations, laboratory experiments and microstructure and hardness analyses. The results of the research showed that a moderate inclination of the mandrel (approx. 2°) and its oscillatory movement promote uniform material flow, reduce the risk of process instability and lead to rings with a homogeneous microstructure and stable dimensions. Too large an angle of inclination caused loss of tool contact continuity and local deformations. The developed rolling mill enables precise control of process parameters and demonstrates a new technology for rolling light alloy rings. The research results are of cognitive and practical importance, opening up opportunities for the implementation of the technology in the aerospace, automotive and engineering industries.

1. Wprowadzenie

Walcowanie pierścieni stanowi jedną z kluczowych metod kształtowania plastycznego metali, umożliwiającą wytwarzanie elementów o wysokiej dokładności wymiarowej, korzystnych właściwościach mechanicznych oraz znacznie zredukowanym zużyciu materiału w porównaniu z konwencjonalnymi technologiami obróbki. Proces ten znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle energetycznym, lotniczym, transportowym oraz maszynowym, gdzie pierścienie wykorzystywane są jako samodzielne elementy konstrukcyjne lub części większych układów – takich jak łożyska, obręcze kół, obudowy silników, elementy turbin czy komponenty instalacji wysokociśnieniowych. Z uwagi na rosnące wymagania dotyczące niezawodności, trwałości i precyzji wyrobów, a także potrzebę ograniczania masy konstrukcji, proces walcowania pierścieni jest przedmiotem intensywnych badań i udoskonaleń technologicznych.

Współczesne kierunki rozwoju technologii obróbki plastycznej koncentrują się na poszukiwaniu rozwiązań zapewniających większą elastyczność produkcji, lepszą kontrolę przepływu materiału oraz możliwość kształtowania stopów lekkich, które zyskują na znaczeniu w wielu gałęziach przemysłu. W szczególności stopy aluminium z serii 6xxx, a zwłaszcza stop EN AW-6082, łączą korzystny stosunek wytrzymałości do masy, wysoką odporność na korozję i dobre właściwości plastyczne, co czyni je atrakcyjnym materiałem konstrukcyjnym w aplikacjach, gdzie kluczowe znaczenie ma redukcja masy przy zachowaniu odpowiedniej nośności i stabilności wymiarowej. Jednakże proces walcowania pierścieni z aluminium, w odróżnieniu od technologii opracowanych dla stali, wiąże się z szeregiem trudności technologicznych, wynikających z niższej temperatury odkształcania, wysokiej przewodności cieplnej oraz ograniczonego zakresu jednorodnej deformacji. W konsekwencji konieczne staje się opracowanie metod pozwalających na kontrolę warunków kontaktu narzędzi z materiałem oraz stabilizację procesu odkształcania w czasie walcowania.

Dotychczasowe badania wykazały, że stabilność procesu walcowania pierścieni w znacznym stopniu zależy od geometrii narzędzi oraz sposobu ich prowadzenia. Zjawiska takie jak nierównomierne płynięcie materiału, utrata osiowości, niestabilność wymiarowa czy powstawanie wad geometrycznych są często efektem nieoptymalnego rozkładu sił w strefie odkształcania. W tradycyjnych walcarkach trzpień kształtujący pozostaje nieruchomy względem osi walca głównego, co ogranicza możliwość kompensacji lokalnych naprężeń i kontroli przepływu materiału w czasie rzeczywistym.

Wprowadzenie regulowanego pochylenia trzpienia lub jego ruchu wahliwego stanowi zatem istotny krok w kierunku zwiększenia sterowalności procesu oraz poprawy jakości uzyskiwanych pierścieni. Takie rozwiązanie pozwala nie tylko na modyfikację rozkładu odkształceń, lecz także na ograniczenie wad wynikających z asymetrii kontaktu między narzędziami.

Zapotrzebowanie na nowe rozwiązania w tym zakresie wynika bezpośrednio z potrzeb przemysłu, który dąży do skrócenia cyklu produkcyjnego, redukcji strat materiałowych i zwiększenia precyzji wyrobów. Wiele przedsiębiorstw zajmujących się wytwarzaniem pierścieni nie dysponuje własnymi ośrodkami badawczo-rozwojowymi, dlatego oczekuje od jednostek naukowych opracowania innowacyjnych, praktycznych metod możliwych do wdrożenia w warunkach przemysłowych. Dodatkowo, konkurencyjność w obszarze technologii walcowania pierścieni ze stopów lekkich jest wysoka, a wyniki badań przemysłowych często nie są publikowane, co ogranicza dostępność wiedzy i utrudnia dalszy postęp w tej dziedzinie.

W niniejszej rozprawie przedstawiono opracowanie i analizę procesu walcowania pierścieni ze stopu aluminium EN AW-6082 z wykorzystaniem nowatorskiej walcarki laboratoryjnej o unikatowej konstrukcji, umożliwiającej regulację kąta nachylenia trzpienia w zakresie od -7° do $+7^\circ$ oraz wprowadzenie jego wahliwego ruchu. Zaprojektowane stanowisko badawcze stanowi demonstrator technologii, która pozwala na prowadzenie eksperymentów w warunkach kontrolowanych, z możliwością precyzyjnego pomiaru parametrów procesu i rejestracji sił oraz momentów działających na narzędzia. Dzięki temu możliwe stało się kompleksowe zbadanie wpływu ustawienia trzpienia kształtującego na przebieg walcowania, stabilność procesu oraz właściwości geometryczne i materiałowe uzyskiwanych pierścieni.

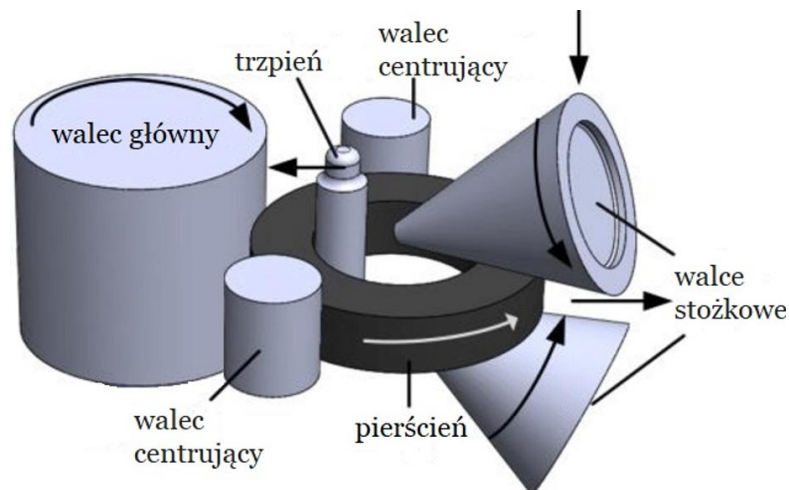
Opracowana metodyka badawcza obejmuje zarówno symulacje numeryczne w środowisku QForm, jak i badania eksperymentalne, które pozwoliły na walidację wyników obliczeń oraz ocenę realnych zjawisk zachodzących w strefie odkształcania. Przeprowadzono również szczegółowe analizy mikrostrukturalne i pomiary twardości, umożliwiające powiązanie warunków kinematycznych procesu z ewolucją mikrostruktury stopu. Wyniki badań wskazują, że umiarkowane pochylenie trzpienia (ok. 2°) oraz ruch wahliwy sprzyjają równomiernemu płynięciu materiału, redukują niestabilności procesu i prowadzą do uzyskania wyrobów o jednorodnej mikrostrukturze i stabilnych wymiarach. Zbyt duże wychylenie natomiast powoduje utratę ciągłości

kontaktu narzędzi z pierścieniem, prowadząc do lokalnych deformacji i pogorszenia jakości geometrycznej.

Podjęta problematyka ma charakter zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny. Z naukowego punktu widzenia praca przyczynia się do poszerzenia wiedzy o kinematyce procesu walcowania pierścieni ze stopów lekkich oraz o możliwościach sterowania przebiegiem deformacji za pomocą zmiennych ustawień trzpienia. Z praktycznego punktu widzenia, uzyskane rezultaty mogą stanowić podstawę do opracowania nowych rozwiązań technologicznych, które znajdą zastosowanie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym czy energetycznym – wszędzie tam, gdzie pożądane jest łączenie wysokiej precyzji wymiarowej z niską masą elementów. W konsekwencji opracowana technologia może stać się punktem wyjścia do dalszych badań nad inteligentnym sterowaniem procesami walcowania oraz do opracowania skalowalnych systemów przemysłowych pozwalających na elastyczną produkcję pierścieni o zróżnicowanej geometrii i właściwościach.

2. Stan zagadnienia – literatura

Technologia walcowania pierścieniowego znana jest na świecie od niespełna 200 lat, a jej istotny rozwój nastąpił w ostatnich 50-ciu latach [1]. Proces walcowania pierścieni można opisać jako ciągłe formowanie półfabrykatu między obracającymi się rolkami (Rys. 1).



Rys. 1. Model procesu walcowania pierścieni (opracowanie własne)

Początkowo proces ten znalazł zastosowanie głównie w przemyśle kolejowym (połowa XIX wieku) do produkcji kół kolejowych [1, 2]. Jednak wraz z rozwojem techniki, a następnie możliwością użycia coraz lepszych układów sterowania i hydrauliki, stał się coraz bardziej popularną metodą wytwarzania. Obecnie elementy pierścieniowe

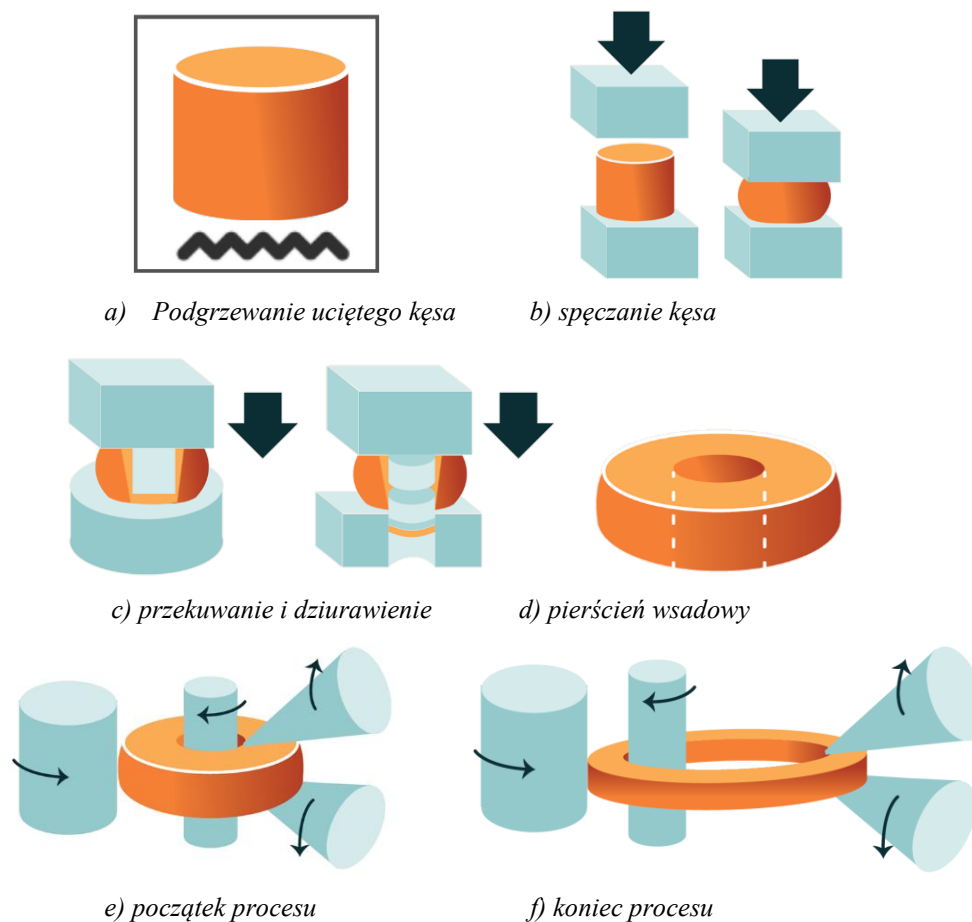
można spotkać prawie wszędzie, są one stosowane w łożyskach tocznych, przekładniach samochodowych, turbinach silników lotniczych, napędach samochodowych, w częściach reaktorów jądrowych, a także w wiatrakach [2, 3, 4]. Znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie stosuje się elementy pierścieniowe.

Walcowanie pierścieni należy do grupy procesów przeróbki plastycznej, które umożliwiają wytwarzanie elementów o szerokim zakresie średnic od 200 mm do 8000 mm [5] i korzystnych właściwościach mechanicznych przy jednoczesnym ograniczeniu ilości odpadu materiałowego. W praktyce przemysłowej stosuje się kilka metod walcowania pierścieni, różniących się zarówno konstrukcją walcarek, jak i zakresem możliwości technologicznych. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem jest walcowanie osiowo-promieniowe, w którym pierścień kształtowany jest jednocześnie w kierunku promieniowym oraz osiowym (Rys. 1) [6, 7]. Proces ten realizowany jest przy użyciu dwóch podstawowych układów walców: głównego i trzpienia, odpowiedzialnych za zmniejszanie grubości ścianki i zwiększanie średnicy, oraz walców stożkowych, które kontrolują wysokość pierścienia. Metoda ta umożliwia uzyskanie wysokiej dokładności wymiarowej oraz dużej powtarzalności, co sprawia, że znajduje szerokie zastosowanie w produkcji pierścieni łożyskowych, wieńców zębatych czy elementów konstrukcyjnych w lotnictwie i energetyce. Metoda ta uznawana jest za najbardziej uniwersalną i powszechnie stosowaną, gdyż łączy wysoką wydajność z możliwością precyzyjnego kształtowania szerokiego asortymentu pierścieni [6, 7].

Drugim typem jest walcowanie promieniowe, które stanowi wcześniejszą, uproszczoną odmianę procesu. W tym przypadku kształtowanie odbywa się wyłącznie między walcem głównym a trzpieniem, bez dodatkowej kontroli osiowej. Choć rozwiązanie to cechuje się prostszą budową walcarki, ma ograniczoną możliwość precyzyjnego sterowania szerokością pierścienia, co skutkuje mniejszą dokładnością wyrobu [6, 7].

Dwie wymienione metody opisują kierunek w jakim jednocześnie realizowane jest odkształcenie materiału podczas walcowania. Jeśli proces walcowania ująć szerzej, od etapu przygotowania materiału, to najczęściej wymienianą metodą w literaturze, jaki i stosowaną w przemyśle jest proces kuto walcowany, który rozpoczyna się od ucięcia kęsa z pręta lub wałka o zadanej objętości. Następnie jest on podgrzewany, spęczany, przekuwany oraz dziurowany (przebijany) w celu otrzymania przedkuwki w kształcie pierścienia, którą umieszcza się na trzpieniu walcarki pierścieniowej i walcuje między

obracającymi się rollkami. Ich kształt lub wysokość zmniejsza się stopniowo, aby uzyskać pożądany przekrój. Schemat procesu przedstawiono na Rys. 2 [2, 8, 9].



Rys. 2. Proces walcowania pierścieniowego (ring rolling): a) podgrzewania, b) kucie i spęczenie kęsa; (c) dziurawienie półfabrykatu; (d) półfabrykat w kształcie pierścienia; (e) początek procesu walcowania, (f) koniec procesu walcowania pierścieni po osiągnięciu pożądanych wymiarów [10]

Podczas procesu walcowania kształtowania ziarna wydłużają się i dostosowują do profilu pierścienia, układając równolegle do konturu powierzchni. Taki rozkład granicy ziaren, który jest równoległy do powierzchni, wpływa pozytywnie na poprawę właściwości mechanicznych odkształcanego pierścienia [2].

W procesie walcowania pierścieni można stosować dowolny materiał plastyczny. Najczęściej jest to stal, jak również stopy aluminium i tytanu [11].

Walcowanie pierścieniowe można podzielić również pod kątem temperatury materiału wsadowego na walcowanie na gorąco lub na zimno. W obu przypadkach, proces przygotowania przedkuwki jest podobny. Dopiero otrzymany półfabrykat w postaci pierścienia może być przedmiotem obróbki cieplnej i dalej walcowany na gorąco lub na zimno. Proces walcowania na zimno nie pozwala na duże odkształcenia, oznacza

to mniejszą możliwość redukcji średnicy, co znacznie ogranicza możliwość uzyskania różnych wariantów przekrojów dla komponentów [11]. Zaletą tego procesu jest otrzymanie bardzo wysokiej dokładności wykonania. Natomiast walcowanie na gorąco daje większą możliwość deformacji (odkształcenia), ale precyzja wykonania jest zmniejszona, a właściwości materiałowe gorzej kontrolowane. Walcowanie na zimno jest zwykle przeprowadzane w celu poprawienia wykończenia powierzchni, w wyniku powstawania na powierzchni naprężeń szczątkowych, które poprawiają żywotność i ograniczają powstawanie pęknięć powierzchniowych. Często pierścienie są walcowane na gorąco, a następnie ulepszone przez walcowanie na zimno tak jak np. łożyska toczne. Są również produkty, takie jak obręcze rowerowe, do których z sukcesem zastosowano walcowanie pierścieni na zimno od półfabrykatu do profilu końcowego [12, 13]. Jednak większości produktów i tak wciąż wymaga dalszej obróbki cieplnej w celu zwiększenia właściwości wytrzymałościowych.

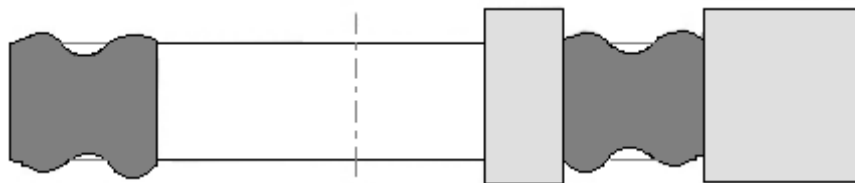
Proces walcowania pierścieni jest procesem skomplikowanym, w trakcie walcowania współpracuje ze sobą kilka narzędzi w różnych ustawieniach, prędkościach posuwu i obrotu. Dlatego uzyskanie produktu o odpowiednich wymiarach i mikrostrukturze bez wad wymaga szczegółowego opracowania procesu technologicznego. Należy zaplanować oraz kontrolować ruchy trzpienia, walca głównego i walców osiowych (stożkowych), ich siły, i moment obrotowy, tak aby uniknąć nadmiernej penetracji lub poślizgu między pierścieniem a rolką, aby cały proces był stabilny. Osiągnięcie wymaganej geometrii profilu podczas walcownia również nie jest proste. Mogą pojawić się wady w przekroju pierścienia, takie jak [11, 14, 15]:

- Wgłębienie zwane w literaturze „cavity”. Powstaje, gdy tarcie między rolkami a pierścieniem jest zbyt duże, co ogranicza przepływ materiału, jak pokazano na Rys. 3.



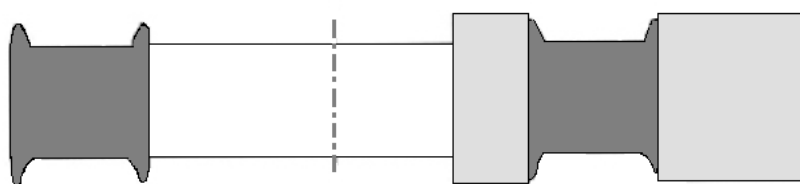
Rys. 3. Wgłębienie „cavity” na powierzchni walcowanego pierścienia [11]

- Falowanie powierzchni czołowej zwane rybim ogonem ang. „fishtail”. Powstaje na powierzchniach, które nie stykają się z walcami stożkowymi (osiowymi), gdy materiał przechodząc przez dowolną przeciwną parę walców, pokazane na Rys. 4.



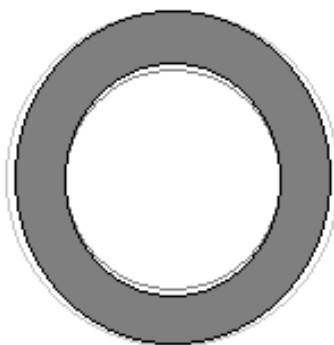
Rys. 4. Wada rybi ogon z angielskiego „fishtail” [11]

- Dalszy rozwój wady typu rybi ogon w przypadku nagromadzenia naprężenia w pierścieniach, może prowadzić do powstania zadziorów, które mogą się zaginać, oderwać, a nawet powodować pęknięcie zmęczeniowe. Ponadto zadziór może stać się defektem typu „flash”, jak pokazano na Rys. 5.



Rys. 5. Zadziory, wada typu „flash” [11]

Natomiast w wyniku błędnego przygotowania pierścienia wsadowego możliwe jest pojawienie się wad kształtu. W literaturze wymienione są cztery główne, przedstawione na Rys. 6 [11, 16-18].



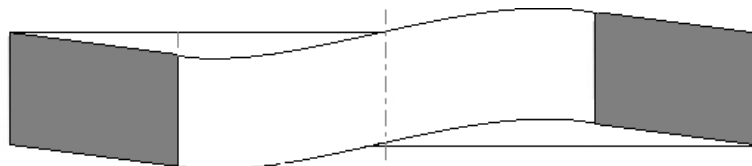
a) nieokrągłość;



a) „stożkowość”;



b) wklęsłość „dishing”;



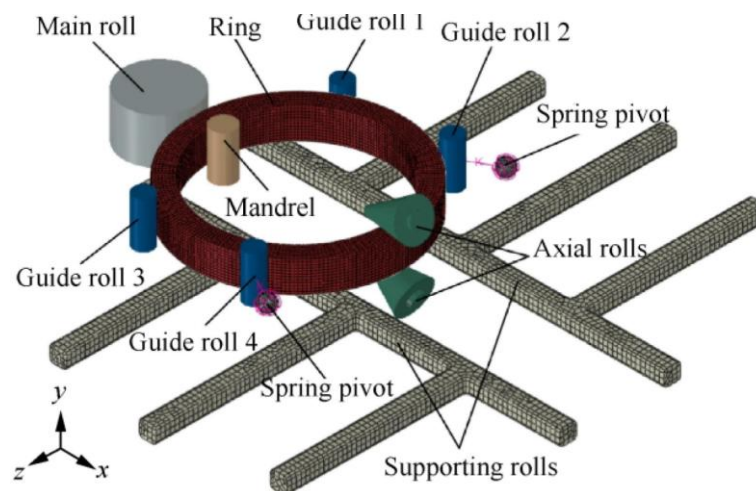
c) falistość.

Rys. 6. Wady przekroju podczas walcowania a), b), c), d) [11]

W literaturze trudno znaleźć dokładne opracowania zawierające zasady doboru parametrów technologicznych procesu walcowania, zapewniających prawidłowy kształt i wymiary pierścienia. W warunkach przemysłowych dobiera się je często na zasadzie prób i błędów, a opracowana technologia stanowi ściśle chronioną tajemnicę firmową. Dlatego ogromny postęp do procesu projektowania wniosły programy do analizy numerycznej MES (Qform, Simufact, Abaqus [19,20]), które pozwalają na dobór i optymalizację kształtu narzędzi, a co najważniejsze również parametrów walcowania. Umożliwiają one optymalizację całego procesu, nie wymagając wytworzenia rzeczywistych narzędzi, zakupu materiałów oraz urządzeń, a także wstrzymywania aktualnej produkcji, gdyż wszystko odbywa się w środowisku wirtualnym.

Obecnie większość prac naukowych dotyczących walcowania pierścieni, opiera się na wynikach analizy symulacji numerycznych, które pozwalają na określenie wpływu kluczowych parametrów procesu takich jak: prędkości obrotowej walca głównego, prędkości dosuwu trzpienia, początkowej temperatury wsadu. W pracy Sun, Yang i Ou do rozwiązania problemu wpływu parametrów procesu na niejednorodność odkształceń i rozkład temperatury w warunkach sprzężenia termomechanicznego wykorzystali symulacje numeryczne przeprowadzone w programie DEFORM do opracowania trójwymiarowego modelu procesu walcowania. Opracowany model umożliwił ilościową ocenę sprzężonych zjawisk cieplno-mechanicznych i wykazał zależności pomiędzy parametrami procesu a równomiernością odkształceń i temperatury, co stanowi podstawę do optymalizacji parametrów walcowania i poprawy jakości pierścieni walcowanych na gorąco [21].

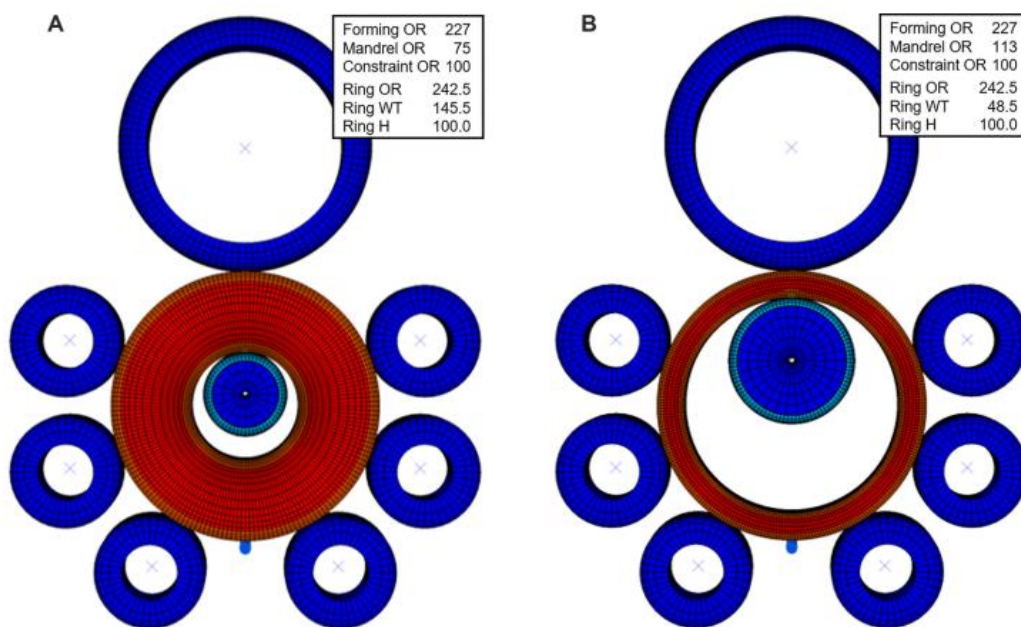
Li i współautorzy [22] opracowali trójwymiarowy termomechaniczny model MES (rys. 7), umożliwiający analizę oddziaływań pomiędzy walcami a pierścieniem podczas procesu gorącego walcowania promieniowo-osowego pierścieni wielkogabarytowych ze stopu aluminium 2219, wyposażonego w cztery walce prowadzące. Celem prowadzonych badań było stworzenie podstaw teoretycznych do wyznaczania sił procesu oraz optymalnego rozmieszczenia walców prowadzących, zapewniających stabilność procesu walcowania. Symulacje numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ABAQUS/Explicit 6.4, które umożliwiło odwzorowanie rzeczywistych warunków procesu. Na podstawie analizy wyników opracowano kryterium niestabilności plastycznej dla walcowania radialno-osowego pierścieni o dużych wymiarach, pozwalające na optymalizację parametrów prowadzenia i zwiększenie stabilności procesu.



Rys. 7. Model 3D FE dla procesu promieniowo- osowego (RARR) z czterema rolkami prowadzącymi [22]

Postęp technologiczny w zakresie oprogramowania symulacyjnego umożliwia obecnie opracowywanie różnych schematów pracy walców, w tym symulowanie procesów kształtowania pierścieni profilowanych, a także szerokiego spektrum narzędzi. Programy te pozwalają także na analizę wyników i wyznaczanie kluczowych parametrów procesu. Odwzorowanie pracy poszczególnych walców w modelach symulacyjnych pozwala uzyskać proces zbliżony do rzeczywistych warunków. Szczególną rolę w kształtowaniu pierścieni odgrywa trzpień, który ma bezpośredni wpływ na poprawność kształtu kołowego. Lohmar, Cleaver, Allwood w pracy badali wpływ rolek dociskających na rozkład i ewolucję temperatury podczas promieniowego walcowania pierścieni. [23] Badacze skupiają się na procesie walcowania na gorąco pierścieni ze stopu Inconel 718,

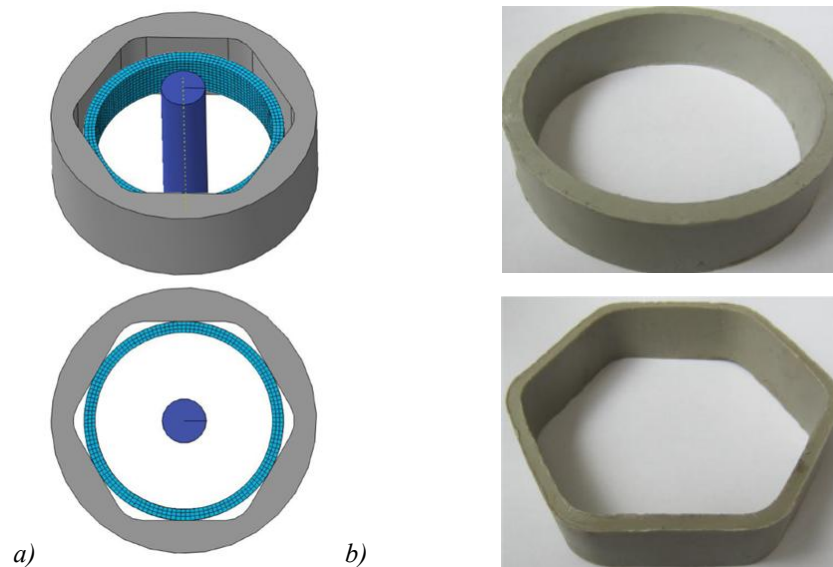
materiału o wysokiej wartości, dla którego precyzyjna kontrola temperatury jest kluczowa dla uzyskania pożądanych właściwości. W pracy przeprowadzono 24 termomechanicznie symulacje MES z wykorzystaniem oprogramowania Abaqus. Symulacje uwzględniały różne parametry procesu, w tym liczbę rolek dociskających 2, 4 i 6 (rys.8). W artykule wykazano, że zwiększenie liczby rolek dociskających prowadzi do znacznego spadku temperatury pierścienia, co może wpływać na jego właściwości. Wpływ ten jest silniejszy w przypadku pierścieni cienkościennych i dłuższych czasów walcowania. Autorzy sugerują, że wpływ rolek dociskających można w pewnym stopniu zminimalizować poprzez skrócenie czasu walcowania lub czasu transferu. Jednakże, w przypadku wytwarzania cieńszych pierścieni, precyzyjna kontrola temperatury i właściwości materiału może być trudna.



Rys. 8. Porównanie zespołów z geometrią narzędzi do pierścieni: a) grubych b) cienkich [23]

Zaawansowane symulacje numeryczne MES pozwalają lepiej zrozumieć i przewidywać zmiany krzywizny wyrobów wielokątnych (rys. 9), gdzie istotne znaczenie mają momenty zginające. Analizy symulacyjne wykazały charakterystyczne tryby plastycznego odkształcenia i zmiany kształtu pierścienia dla różnych ścieżek posuwu. W wyniku optymalizacji trajektorii uzyskano stabilny przebieg walcowania – w szczególności najbardziej pożądane ścieżki pozwoliły uzyskać równomierne formowanie ścianek pierścienia. Badania eksperymentalne pozwoliły uzyskać pierścień o wielokątnym kształcie zgodnie z założeniami procesu. Podsumowując, osiągnięto

zamierzony efekt – wykorzystując ustalone ścieżki posuwu narzędzia uzyskano stabilny proces i poprawne uformowanie wielokątnego pierścienia [24].



Rys. 9. Model symulacji kształtowania wyrobu wielokątnego (a), pierścień otrzymany po procesie (b)[24]

Programy do symulacji numerycznych wykorzystywane w procesach walcowania pozwalają na przewidywanie mikrostruktury materiału, w celu uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych. I tak w pracy Hua i Deng badają wpływ krzywej walcownia na ewolucję rekrytalizacji podczas walcownia na gorąco pierścienia ze stali stopowej 42CrMo. Zaproponowali model matematyczny opisujący ewolucję rekrytalizacji uwzględniając rekrytalizację dynamiczną i statyczną. Optymalizacja krzywej walcownia pozwala na precyzyjną kontrolę mikrostruktury gotowego pierścienia, co jest istotne dla uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych. Krzywa typu "S" zapewnia najlepszą jakość mikrostruktury [25].

Badania przedstawione w artykułach [26–31] pokazują, że skuteczna optymalizacja procesu walcownia pierścieni wymaga połączenia symulacji numerycznych (FEM) z metodami optymalizacji wielokryterialnej (MOO) oraz metodami statystycznymi takimi jak Response Surface Methodology (RSM). Zastosowanie tych podejść pozwala nie tylko skrócić czas obliczeń, ale przede wszystkim zoptymalizować krzywe posuwu radialnego i osiowego (feed curves) w taki sposób, aby osiągnąć kompromis między stabilnością odkształcenia, energochłonnością, a dokładnością wymiarową wyrobu. Przykładowo, Cappellini i in. [26] opracowali zautomatyzowany workflow łączący FEM i algorytmy optymalizacji, który umożliwił znaczącą redukcję czasu procesu przy zachowaniu stabilnego przebiegu walcownia. Z kolei Xie i współpracownicy [27] zaproponowali model analityczny skoordynowanego

posuwu promieniowo-osowego, który po zwalidowaniu numerycznym pozwolił na efektywne ograniczenie lokalnych niestabilności plastycznych.

Wyniki tych badań podkreślają, że dobór odpowiedniego profilu prędkości posuwu ma kluczowe znaczenie nie tylko dla równomierności odkształcenia, lecz także dla ograniczenia strat energii i poprawy jakości geometrycznej walcowanego pierścienia. W pracach [32, 33] zintegrowano modele ewolucji mikrostruktury (rekrytalizacja, rozrost ziarna, umocnienie) z symulacjami FEM procesu walcowania pierścieni. Pozwala to równocześnie kontrolować kształt geometryczny i mikrostrukturę wewnętrzną wyrobu, co ma istotne znaczenie w zastosowaniach wymagających wysokiej jednorodności właściwości mechanicznych. Zhu i in. [32] wykorzystali podejście sprzężone, łącząc FEM z modelem dynamicznej rekrytalizacji i metodą RSM, uzyskując mapy korelacji pomiędzy parametrami procesu (temperatura, prędkość posuwu, stopień odkształcenia) a średnim rozmiarem ziarna. Z kolei Wei i in. [33] zastosowali modelowanie sprzężone z eksperymentami na stopie niklu, co pozwoliło im prognozować ewolucję mikrostruktury w funkcji temperatury i historii odkształcenia podczas radial-axial ring rolling (RARR). Tego typu prace wskazują kierunek integracji modeli fizycznych z analizą numeryczną, prowadząc do predykcyjnego sterowania procesem walcowania pod kątem uzyskania pożądanej mikrostruktury końcowej.

Problematyka doboru wsadu oraz wpływu elasto-termicznych efektów odkształcenia na dokładność wymiarową została szerzej opisana w pracach [34] i [35]. Pressas i in. [34] uwzględnili w swoich modelach sprężystą i termiczną deformację walców, co umożliwiło dokładniejsze przewidywanie lokalnych odchyłek wymiarowych pierścieni po walcowaniu. Natomiast Luo i in. [35] skupili się na optymalizacji kształtu i wymiarów wsadu dla stopu GH3044, wykorzystując symulacje w FORGE w oparciu o eksperymentalnie wyznaczone krzywe konstytutywne. Uzyskane wyniki pokazały, że nieodpowiedni dobór wsadu może prowadzić do niejednorodnego rozkładu odkształceń i naprężeń własnych po procesie, co ma istotne znaczenie przy walcowaniu dużych pierścieni ze stopów wysokotemperaturowych. Wnioski z tych badań są szczególnie przydatne przy projektowaniu wsadów w nowatorskich walcarkach laboratoryjnych, gdzie geometria narzędzi i sposób ich podparcia znacząco wpływają na końcową dokładność wymiarową.

Zagadnienie powstawania defektów oraz stabilności procesu walcowania analizowano w pozycjach [27, 28, 36] oraz w pracy Li i in [37]. Autorzy skupili się na opracowaniu strategii zapobiegania wyboczeniom pierścienia i lokalnym

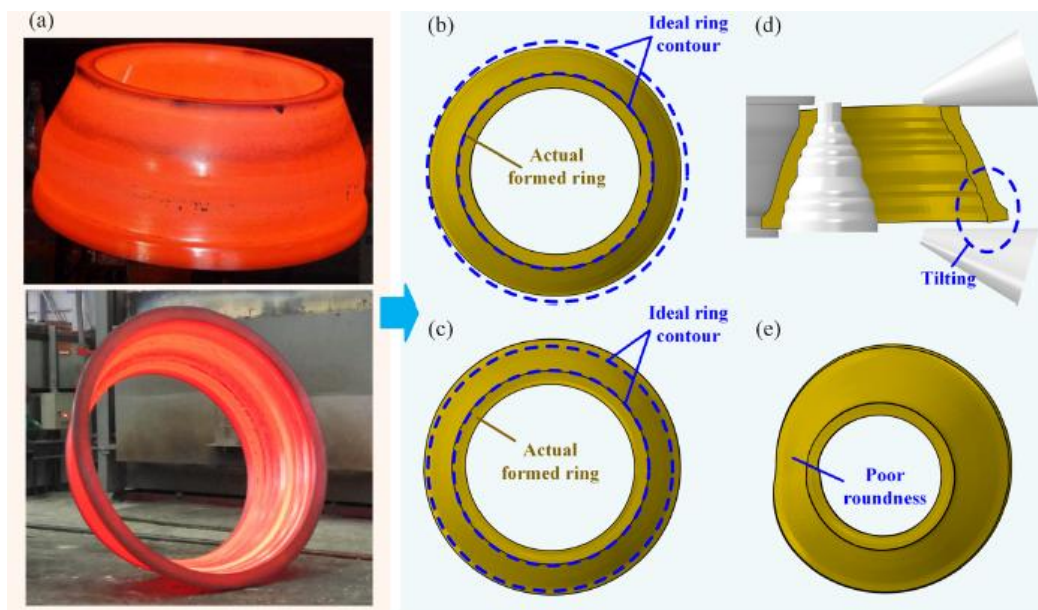
niestabilnościom plastycznym poprzez odpowiednie kształtowanie ścieżek posuwu oraz kontrolę ograniczeń geometrycznych. Xie i współpracownicy [27] zaproponowali strategię stopniowania posuwu, która znacząco poprawia stabilność procesu w walcowaniu dużych pierścieni. Feng i in. [36] analizowali defekty w procesie constrained ring rolling (CRR), wykorzystując symulacje numeryczne i plan eksperymentu do identyfikacji obszarów największego ryzyka wyboczeń. Z kolei Li i in. [37] opracowali kryterium niestabilności dla ultra-large RARR, oparte na analizie dynamicznej w symulacjach z czterema rolkami prowadzącymi. Wyniki tych prac potwierdzają, że numeryczne modelowanie niestabilności i defektów (rys. 10) stanowi kluczowy etap w projektowaniu stabilnych, energooszczędnych i powtarzalnych procesów walcowania pierścieni.



Rys. 10. Pierścienie odpadowe o zniekształconym kształcie w rzeczywistej produkcji [37]

Przytoczone przykłady wskazują jednoznacznie na skuteczność i zasadność stosowania metod numerycznych w projektowaniu nowych procesów technologicznych. Zapotrzebowanie na elementy pierścieniowe o przekroju profilowym ciągle rośnie i jest szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Ta rosnąca popularność na pierścienie o przekroju profilowanym wynika między innymi z oszczędności materiałowych (mniejsza materiałochłonności) przy wytwarzaniu pierścieni profilowych. W porównaniu do walcowania profili o przekroju prostokątnym, gdzie wykonanie pierścienia kołnierzewego wiąże się z koniecznością usunięcia od 30÷40% masy pierścienia [38-40]. Dlatego proces walcowania pierścieni profilowych od kilku lat jest przedmiotem intensywnych badań, a w wielu ośrodkach prowadzone są zaawansowane prace nad poznaniem zjawisk zachodzący podczas kształtowania. Walcowanie tego typu elementów stanowi trudniejsze wyzwanie technologiczne, ponieważ na pierścień oddziałuje nie zrównoważona siła. W przypadku pierścieni o złożonym przekroju – zarówno wewnętrzny, jak i zewnętrzny – rozkład naprężeń, odkształceń oraz temperatury jest wyjątkowo nierównomierny. Dodatkowo tempo wzrostu wymiarów pierścienia różni się w zależności od tego, czy walcowana jest średnica mała, czy duża, a sam przepływ

metal ulega w sposób znacznie bardziej złożony [41]. Jednym z kierunków badań jest prowadzenie prac nad walcowaniem pierścieni w walcach profilowych. Lei Liang i inni badali mechanizmy powstawania wad geometrycznych w procesie walcowania pierścieni profilowych o przekroju stożkowym (CSPRR) [42]. Zaproponowali trzy metody unikania wad: ulepszoną konstrukcją docelowego pierścienia (rysunek kucia), zmniejszenie prędkości posuwu rolki głównej oraz ulepszoną konstrukcją półfabrykatu. Symulacje i eksperymenty przemysłowe potwierdziły skuteczność tych metod w eliminowaniu wad geometrycznych. (Rys.11)



Rys. 11. Pierścień o przekroju stożkowym i typowe wady geometryczne w CSPRR: (a) pierścienie osłonowe stosowane w silnikach lotniczych i turbinach gazowych; (b) średnica zewnętrzna dużego końca nie osiąga wartości docelowej; (c) średnica zewnętrzna dużego końca przekracza wartość docelową; (d) przechylenie pierścienia oraz (e) wada okrągłość [42]

W literaturze technicznej wiele uwagi poświęcono zagadnieniu doboru wsadu i jego wpływowi na prawidłowy przebieg procesu walcowania pierścieni o pobocznicę kształtowej. Można wyróżnić trzy podejścia do tego problemu: dobór współczynnika walcowania, definiowanego w pracy [43] jako stosunek prędkości przesuwu trzpienia do zmiany wysokości pierścienia, dobór wymiarów wsadu pierścieniowego o przekroju prostokątnym [44] oraz dobór kształtu wsadu o przekroju poprzecznym zbliżonym do docelowego kształtu gotowego pierścienia [45].

Wpływ prędkości walcowania na wypełnienie profilu (rowka na wewnętrznej pobocznicę) analizował w swoich badaniach Song [46]. Wykazał on, że w zależności od zastosowanych wymiarów wsadu o przekroju prostokątnym można uzyskać odmienne

odwzorowanie kształtu pierścienia. Wyniki badań wskazują, iż zarówno zastosowanie wsadu o zbyt dużej masie (względem docelowej masy odkuwki), jak i wsadu zbyt małego prowadzi do nieefektywnego wypełnienia profilu, a dodatkowo sprzyja powstawaniu wad w postaci zadziorów.

Prowadzono również badania oparte na modelowaniu numerycznym nad wypełnieniem rowka pierścienia przed osiągnięciem żądanej średnicy szczególnie w trudno odkształcalnych materiałach. Zbadano wpływ wymiarów docelowego pierścienia (grubości prostokątnego półfabrykatu) i parametrów procesu na współczynnik ciągnięcia. Wyniki pozwoliły wyznaczyć krytyczną wartość grubości półfabrykatu i wymiarów konstrukcyjnych docelowego pierścienia (względna wysokość rowka) (Rys. 12) [47].



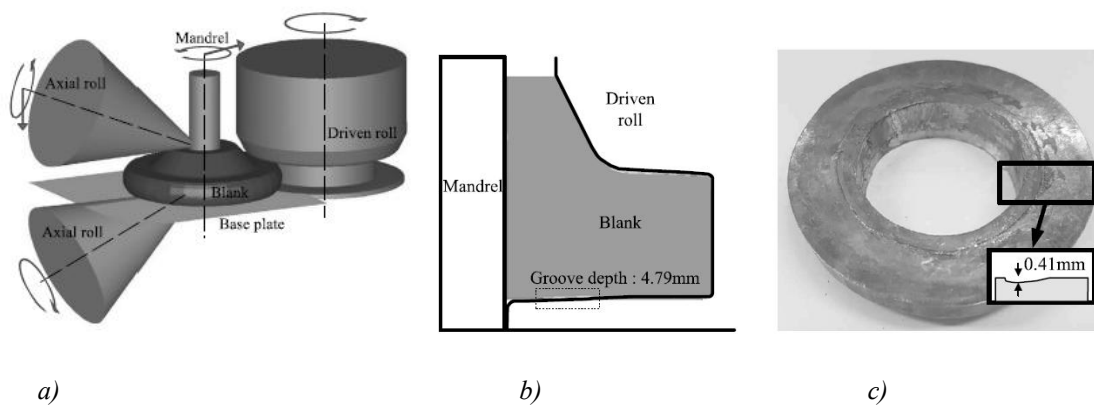
Rys. 12. Pierścień z rowkiem przeznaczony do przemysłu lotniczego [47]

He i inni prowadzili badania nad projektowaniem i optymalizacją pierścieni profilowych przeznaczonych do przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego z wykorzystaniem algorytmu NSGA-III w celu znalezienia optymalnych parametrów. Wyniki wskazują znaczne zmniejszenie zużycia materiału i poprawę jednorodności grubości ścianki bez pogorszenia właściwości użytkowych pierścienia [48]

W pracy badacze Zhu i Ma przedstawili nową metodę projektowania wsadu dla procesu walcowania pierścieni o przekroju C, które charakteryzuje się skomplikowaną geometrią i nierównomiernym rozkładem objętości wzdłuż osi pierścienia. W badaniach wykorzystano metodę elementów skończonych (FEM) połączoną z metodyką powierzchni odpowiedzi (RSM), aby zoptymalizować kształt wsadu pod kątem pełniejszego wypełnienia formy i równomiernego rozkładu odkształceń. Wyniki badań wykazały wysoką skuteczność metody projektowania wsadu dającą efektywną redystrybucję objętości materiału wzdłuż osi, co poprawia jakość formowania i ogranicza niewypełnienia. Model RSM osiągnął wysoką dokładność dopasowania ($R^2 = 98,31\%$),

a także oszczędność materiału na poziomie około 10% i zmniejszenie zapotrzebowania na obróbkę końcową [49].

Częstym zagadnieniem omawianym w literaturze jest analiza określania kształtu wsadu do procesu walcowania pierścieni o złożonym kształcie przekroju poprzecznego (pierścieni kołnierzowych o przekrojach L lub T). W pracy [50] analizowano defekty podczas walcowania pierścieni o profilu L : braku wypełnienia między kołnierzem a piastą oraz rowkami na dolnej powierzchni pierścienia. Zaproponowano metody poprawy jakości walcowania poprzez modyfikację kształtu półfabrykatu (zmiana kąta kołnierza) oraz geometrii walca (zwiększenie głębokości rowka). Zastosowano symulacje do analizy naprężeń i odkształceń podczas procesu walcowania, które pozwoliły na otrzymanie pierścieni w testach na linii produkcyjnej. (Rys. 13).



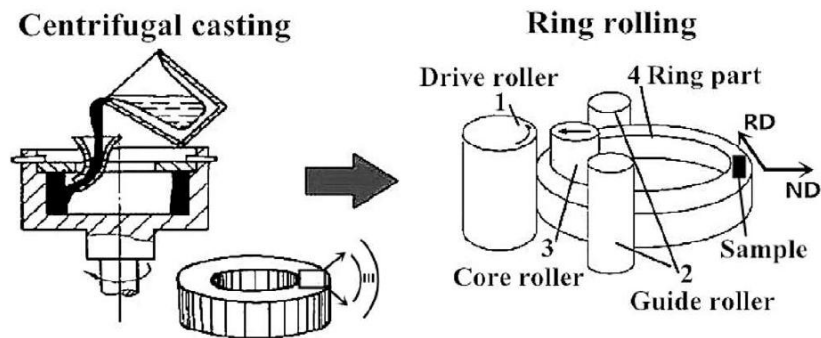
Rys. 13. Model numeryczny kształtowania pierścienia o profilu L (a), końcowy model wsadu (b) oraz wyrób rzeczywisty (c) [50]

Kolejnym kierunkiem badań jest łączenie metod odlewania wsadu i walcowania. Ich celem jest znaczące zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego procesu wytwarzania pierścieni profilowych o jednorodnej mikrostrukturze, która stanowi istotny czynnik determinujący właściwości mechaniczne wyrobów. Mikrostruktura walcowanych pierścieni profilowych charakteryzuje się dużą niejednorodnością, co negatywnie wpływa na jakość gotowych elementów, dlatego w przyszłości badania powinny być ukierunkowane na analizę ewolucji mikrostruktury, aby zapewnić odpowiedni poziom jakości produktu końcowego.

Wsad do walcowania na gorąco pierścieni zazwyczaj przygotowuje się w operacjach spęczania i wykrawania. Podobnie jak w przypadku wsadów o przekroju prostokątnym, uzyskanie z nich pierścieni profilowanych jest bardzo trudne, a niekiedy wręcz niemożliwe. Wykonanie wsadu pierścieniowego o kształcie zbliżonym do

docelowego profilu jest jeszcze bardziej skomplikowane, ponieważ wymaga specjalistycznych narzędzi oraz doświadczonej obsługi. Jednocześnie zastosowanie wsadu profilowanego znacząco upraszcza proces walcowania i sprzyja uzyskaniu właściwego kształtu końcowego pierścienia [51].

W pracy Ma i współautorów opisano wytwarzanie pierścieni ze stopu magnezu Mg-Gd-Y-Zn-Zr z zastosowaniem metody odlewania odśrodkowego, a następnie walcowania pierścieniowego (rys. 14). Po procesie kształtowania przeprowadzono starzenie materiału. Analizowano wpływ odkształcenia uzyskanego podczas walcowania na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne stopu. Wyniki badań wykazały, że połączenie procesów kształtowania i starzenia umożliwia uzyskanie pierścieni o wysokiej wytrzymałości (wytrzymałość na rozciąganie do 511 MPa) przy zachowaniu dobrej ciągliwości [52].



Rys. 14. Metoda połączonego procesu odlewania i walcowania pierścieniowego [52]

Z badań eksperymentalnych wynika [53], że podczas walcowania pierścieni z odlewanego wsadu ze stali GCr15 w gotowych wyrobach uzyskuje się mikrostrukturę o średniej wielkości ziarna. Nawet przy zwiększeniu odkształceń w procesie nie dochodzi do dalszego rozdrobnienia ziaren poniżej tego poziomu. Wynika to z jednoczesnego przebiegu dynamicznej rekrytalizacji oraz rozrostu ziaren spowodowanego wysoką temperaturą odkształcanego metalu. Uzyskane wyniki wskazują kierunki dalszych badań nad kontrolą wielkości ziarna oraz poprawą efektywności nowej technologii wytwarzania pierścieni.

Badano również proces walcowania pierścieni do łożysk z odlewanego wsadu ze stali 42CrMo w postaci pierścienia [54]. Autorzy, stosując metodę elementów skończonych, opracowali termomechaniczny model procesu, który umożliwił określanie wielkości ziaren rekrytalizowanych oraz analizę wpływu początkowej temperatury wsadu i prędkości przemieszczania się trzpienia na mikrostrukturę wyrobu końcowego.

Na podstawie wyników symulacji przeprowadzono walcowanie w skali przemysłowej, potwierdzając możliwość wytwarzania pierścieni o wymaganych parametrach geometrycznych. Dodatkowe badania właściwości mechanicznych oraz analizy metalograficzne gotowych pierścieni łożyskowych wykazały, że spełniały one wymagania norm odbiorowych. Oznacza to, że zastosowanie połączonych metod odlewania i walcowania pozwala uzyskać pierścienie łożyskowe o wymaganych właściwościach.

Opracowanie technologii nowych typów pierścieni kuto-walcowanych jest zadaniem trudnym i czasochłonnym. Symulacje numeryczne i obliczenia matematyczne są niepełne, dlatego wymagają weryfikacji eksperymentalnej. Przy pierścieniach o znanym kształcie wystarczy proces przemysłowy, lecz przy nowych geometriach czy materiałach ryzyko wybrakowania jest duże. Dlatego powstają stanowiska laboratoryjne, które pozwalają lepiej poznać zjawiska w procesie, testować nową kinematykę oraz obniżać koszty w porównaniu z próbami przemysłowymi. Literatura opisuje również zaawansowane stanowisko badawcze w Cambridge, umożliwiające kształtowanie pierścieni o zróżnicowanej geometrii dzięki niezależnemu sterowaniu narzędziami. W ośrodku tym prowadzone są eksperymenty z pierścieniami o nietypowych kształtach, w tym konstrukcjach mimośrodowych oraz z dodatkowymi wypustami [55,56]. Konstrukcja urządzenia pozwala na modyfikacje i sprawdzanie nowych rozwiązań, w tym technologii walcowania przyrostowego. Walcowanie pierścieni o stożkowej poboczniczy jest szczególnie trudne ze względu na odmienny rozkład sił i płynięcia materiału. Badania nad pierścieniami o kątach $\alpha = 15^\circ$ i 30° wykazały możliwość ich wytwarzania metodą przyrostowego walcowania, z potencjałem uzyskiwania kształtów wymagających dużej redystrybucji metalu. Nowatorskie rozwiązania Cambridge oraz zastosowanie narzędzi korekcyjnych umożliwiają rozwój tej technologii. Dalsze prace nad sterowaniem trajektorią i naciskiem walca ograniczającego mogą zwiększyć dokładność kształtów oraz zmniejszyć koszty materiałowe i energetyczne. Zaawansowane nowatorskie badania jakie są realizowane w Uniwersytecie w Cambridge wpływają na dużą rozpoznawalność tej jednostki naukowej, jednak nie jest ona jedyną, w której prowadzi się poszukiwania nowych rozwiązań.

Stanowisko laboratoryjne [57] do walcowania pierścieni na gorąco powstało w Institute of Metal Forming na Uniwersytecie w Aachen (RWTH Aachen University) przy współpracy z firmą Banning. (Rys.15). Umożliwia ono walcowanie pierścieni o średnicy zewnętrznej do 2000 mm i wysokości do 300 mm [58]. Wymiary pierścieni, jakie można

uzyskać w tej walcierce, umożliwiającą weryfikację badań numerycznych również w skali przemysłowej.



Rys. 15. Stanowisko badawcze w Aachen [57]

Poza walcami standardowymi, na wyposażeniu instytutu są również profilowane narzędzia umożliwiające walcowanie pierścieni o różnych ściankach [59]. Na tym stanowisku doświadczalnym przeprowadzono szereg badań naukowych [60]. Walcarka posiada sterowanie pozwalające na testowanie nowych strategii prowadzenia procesu walcowania, poprzez możliwość wprowadzania dużych zmian poszczególnych parametrów procesu kształtowania. Urządzenie badawcze wyposażono w czujniki umożliwiające pomiar i rejestrację następujących parametrów: siły, momentu obrotowego, określanie pozycji narzędzi oraz temperaturę kształtowanego pierścienia.

W literaturze wspomina się o stanowisku badawczym do badań nad procesem walcowania pierścieni do 700 mm powstałym na Uniwersytecie w Valenciennes. Jako materiał do kształtowania stosowane jest mieszanina powstała z połączenia wosku, żywicy i kaolinu, które odpowiada zachowaniu się stali 1035 przy temperaturze 1140°C [61,62]. Urządzenie posiada szeroką możliwość regulacji parametrów prowadzenia procesu walcowania oraz zapisu przebiegu procesu i wartości sił.

Oprócz przedstawionych europejskich ośrodków naukowych, o których znaleziono informacje dotyczące badań procesów walcowania pierścieni, należy również wspomnieć, że w Azji i Ameryce Północnej znajdują się ośrodki, w których prowadzone są podobne badania. Wiele firm posiada własne ośrodki naukowo - badawcze, w których testowane są nowe strategie walcowania, kształty narzędzi czy nowe kinematyki tego procesu. Największy na świecie walcowany bezszwowy pierścień stalowy (rekord wpisany do księgi Guinness) o średnicy 15,673 m wykonano w Chinach przez Iraeta Energy Equipment Co., Ltd. [63,64].

W Polsce na chwilę obecną tematyka związana z walcowaniem jest w fazie rozwoju, ale można zauważyć wzrost prowadzonych badań z zakresu walcowania. Na Politechnice Lubelskiej prowadzone są badania doświadczalne i numeryczne nad walcowaniem pierścieni ze stali C45, dokładnością wymiarową, kinetyką narzędzi oraz wpływem parametrów podawania, oraz walcowaniem pierścieni w walcierce pionowej (rys.16) i nad jego poprawnym odzwierciedleniem w badaniach numerycznych [65, 66].



Rys. 16. Walcarka pionowa, Politechnika Lubelska [65]

W Poznaniu w Łukasiewicz – PIT powstała walcarka laboratoryjna służąca do weryfikacji badań numerycznych i pozwalająca na obserwowanie zjawisk zachodzących w procesie walcowania pierścienia. Możliwe jest walcowanie na niej pierścieni do 500 mm [67].

Przykłady badań, od zaawansowanych projektów realizowanych na Uniwersytecie w Cambridge [68], po prace ukierunkowane na potrzeby przemysłu w Aachen czy eksperymenty prowadzone w Valenciennes, potwierdzają potencjał dalszego rozwoju zarówno konstrukcji walcarek, jak i samej technologii walcowania pierścieni. W Polsce badania w tym zakresie są na wczesnym etapie, jednak utrzymanie obecnego tempa i współpraca z przemysłem mogą umożliwić wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań w tej dziedzinie obróbki plastycznej.

Wyroby pierścieniowe odgrywają istotną rolę w budowie współczesnych maszyn, urządzeń i instalacji przemysłowych, pełniąc funkcje samodzielnych elementów konstrukcyjnych lub podzespołów większych części. Globalne trendy związane z rosnącym zapotrzebowaniem na energię oraz koniecznością ograniczania emisji CO₂ sprzyjają zwiększonemu wykorzystaniu pierścieni m.in. w energetyce wiatrowej, jądrowej czy w nowoczesnych blokach energetyki węglowej [69].

W pracy 70 badacze Ziółkiewicz i Pachutko zaproponowali zastosowanie jako materiału konstrukcyjnego popularnego stopu odlewniczego AZ91 na bazie magnezu, ze względu na korzystne właściwości, takie jak dobra lejność, plastyczność oraz niski koszt produkcji. Stop ten wykazuje nadplastyczność w niskich temperaturach i posiada drobnoziarnistą mikrostrukturę (poniżej 10 μm) [71]. Mikrostrukturę taką można uzyskać w procesach obróbki plastycznej, m.in. poprzez wyciskanie czy walcowanie [72, 73]. Właściwości badanego stopu, w tym możliwość uzyskania drobnoziarnistej mikrostruktury przy jednocześnie korzystnym stosunku wytrzymałości na rozciąganie do masy, stały się podstawą do podjęcia badań numerycznych nad procesem walcowania pierścieni [74]. Z wykorzystaniem oprogramowania Abaqus / Explicit opracowano matematyczny model procesu, łączący opis materiału w ujęciu elasto–plastycznym i termomechanicznym. Analizie numerycznej poddano m.in. wpływ prędkości obrotowej rolki napędowej na rozkład temperatury w odkształcanym metalu, określono pola naprężeń oraz oceniano ryzyko wystąpienia charakterystycznej wady pierścieni, tzw. „rybiego ogona”. Wyniki obliczeń wykazały, że wzrost prędkości obrotowej walca głównego sprzyja uzyskaniu bardziej jednorodnej mikrostruktury i równomiernego rozkładu temperatury. Odwrotnie przebiega natomiast zjawisko powstawania wady – im niższa prędkość obrotowa walca, tym mniejsze prawdopodobieństwo pojawienia się „rybiego ogona”. Dzięki tym badaniom udało się określić optymalne parametry walcowania, które umożliwiają wytwarzanie pierścieni o jednorodnej mikrostrukturze i minimalnej masie.

Rosnące wymagania dotyczące wytrzymałości i trwałości części maszyn są szczególnie widoczne w przemyśle lotniczym, gdzie stale udoskonala się konstrukcje elementów silników [75]. Wytwarzane są one głównie ze stopów niklu, co wiąże się z wysokimi kosztami zarówno materiału, jak i samej technologii produkcji, wymagającej specjalistycznych narzędzi oraz ściśle określonych warunków procesowych. Z tego względu próby przemysłowe muszą być ograniczane do minimum, aby zredukować koszty. Niezastąpionym narzędziem wspomagającym projektowanie technologii oraz minimalizującym nakłady produkcyjne są programy komputerowe, umożliwiające prowadzenie symulacji numerycznych walcowania pierścieni.

W badaniach opisanych w pracy [76] zastosowano stop niklu Waspaloy, wyróżniający się wysoką wytrzymałością mechaniczną do temperatury 650°C oraz odpornością na utlenianie. Przy wprowadzaniu warunków technologicznych przyjęto pewne uproszczenia, co wynikało z ograniczonego czasu obliczeń. Celem analiz była

ocena modułu służącego do prognozowania ewolucji mikrostruktury materiału [77]. Wyniki symulacji umożliwiły przewidywanie średniej wielkości ziaren oraz udziału objętościowego fazy zrekrytalizowanej. Uzyskano wysoką zgodność między rezultatami obliczeń a rzeczywistymi wymiarami ziaren w gotowym pierścieniu. Różnica średniej wielkości ziarna między prognozą a obserwacjami nie przekraczała ASTM nr +1 / -1 w żadnym punkcie porównań. Dowiedziono, że opracowany system prognozowania charakteryzuje się wystarczającą dokładnością i może być z powodzeniem wykorzystywany do optymalizacji rzeczywistego procesu walcowania pierścieni [78].

Stopy aluminium należą do najpowszechniej stosowanych materiałów lekkich, szeroko wykorzystywanych w przemyśle jako elementy konstrukcyjne oraz części maszyn i urządzeń [79, 80]. Dobór odpowiedniego stopu zależy od wymagań wytrzymałościowych, warunków pracy danego elementu oraz technologii jego wytwarzania. Przykładowo, stopy z serii 6xxx znajdują zastosowanie w procesach kucia matrycowego. Samo kucie jednozabiegowe w matrycach nie nastręcza większych trudności i przebiega w sposób zbliżony do kucia stali, przy czym różni się zakresem temperatury obróbki.

Walcowanie pierścieni ze stopów aluminium jest natomiast procesem bardziej złożonym. Kluczowym czynnikiem jest tu temperatura odkształcanego materiału, która w przypadku aluminium wynosi około 500°C, a więc jest znacząco niższa niż w przypadku stali. Aluminium jako bardzo dobry przewodnik cieplny, nagrzewa się w piecach głównie wskutek promieniowania, w niewielkim stopniu zaś przez konwekcję. Jednocześnie cechuje się wysokim współczynnikiem wymiany ciepła, co stanowi istotne utrudnienie zarówno podczas przygotowania wsadu, jak i samego procesu walcowania pierścieni. Właściwości te należy uwzględnić na etapie projektowania technologii kształtowania.

He i współautorzy [81] przeprowadzili badania nad wpływem wielkości zadawanego odkształcenia w trakcie walcowania pierścieni o średnicy 3350 mm ze stopu aluminium 2219 na mikrostrukturę ziarna w gotowym wyrobie. Pierścienie te stosowane są jako elementy zbiorników paliwowych w satelitach [82]. Wyniki eksperymentów pozwoliły na opracowanie zmodyfikowanej technologii walcowania. Zaproponowano, aby proces produkcji prowadzić dwuetapowo: w pierwszym etapie przy odkształceniu 30% i po schłodzeniu o 20%, odpowiednio rozpoczynając w temperaturze stopu 460°C, następnie po schłodzeniu w temperaturze 240°C. Ulepszony proces umożliwił wytworzenie pierścieni wolnych od pęknięć, falistości i innych makroskopowych wad.

Dodatkowo zaobserwowano zmniejszenie rozmiaru ziaren. Zidentyfikowany mechanizm niszczenia miał charakter głównie międzykrystaliczny. Zmniejszenie wielkości ziaren oraz bardziej równomierny rozkład odkształceń w objętości stopu przyczyniły się do bardziej rozbudowanej ścieżki propagacji pęknięć podczas próby rozciągania, co skutkowało wzrostem wartości wydłużenia badanych próbek.

2.1. Podsumowanie analizy literatury

Analiza literatury dotyczącej walcowania pierścieni wskazuje, że technologia ta, znana od XIX wieku, dynamicznie rozwija się zwłaszcza w ostatnich dekadach. Początkowo stosowana głównie do produkcji kół kolejowych, dziś znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, energetycznym, motoryzacyjnym czy maszynowym. Walcowanie pierścieni umożliwia otrzymywanie elementów o dużych średnicach, korzystnych właściwościach mechanicznych oraz wysokiej ekonomice materiałowej. W praktyce przemysłowej najczęściej stosuje się walcowanie osiowo-promieniowe, zapewniające wysoką dokładność wymiarową, a także walcowanie promieniowe, które choć prostsze, charakteryzuje się mniejszą precyzją. Proces walcowania wymaga starannego doboru parametrów oraz kontroli przebiegu kształtowania, ponieważ niewłaściwe prowadzenie może prowadzić do powstawania wad, takich jak nieokrągłość, falistość czy charakterystyczny defekt „fishtail”.

W literaturze podkreśla się znaczenie symulacji numerycznych MES jako narzędzia wspomagającego projektowanie technologii. Programy takie jak Qform, Simufact czy Abaqus pozwalają analizować rozkłady naprężeń, temperatur i tarcia, a także przewidywać powstawanie wad i ewolucję mikrostruktury. Dzięki nim możliwe jest ograniczenie kosztownych prób przemysłowych i szybsza optymalizacja procesów. Badania symulacyjne wskazują m.in. na kluczową rolę tarcia i temperatury w stabilności procesu, wpływ liczby rolek dociskających na rozkład temperatury oraz możliwość sterowania mikrostrukturą dzięki odpowiedniej krzywej walcowania. Symulacje stosowane są również do projektowania wsadu, którego geometria decyduje o prawidłowym wypełnieniu profilu i uniknięciu wad w pierścieniach o złożonych przekrojach.

Znaczna część badań koncentruje się na pierścieniach o profilowanych przekrojach, które pozwalają ograniczyć zużycie materiału i masę wyrobów. Jednocześnie proces ich kształtowania jest bardziej złożony i podatny na występowanie defektów. Literatura wskazuje, że właściwy dobór wsadu, parametrów procesu oraz

trajektorii posuwu narzędzi ma zasadnicze znaczenie dla jakości wyrobu. Coraz częściej podejmowane są próby łączenia walcowania z innymi technologiami, np. odlewaniem odśrodkowym, co umożliwia redukcję energochłonności oraz lepszą kontrolę mikrostruktury. Ważnym kierunkiem badań pozostaje także walcowanie stopów trudno odkształcalnych i materiałów lekkich, w tym aluminium i magnezu. Ze względu na niższą temperaturę odkształcania i dużą przewodność cieplną, walcowanie aluminium wymaga szczególnej kontroli warunków procesowych. Badania pokazują, że odpowiedni dobór temperatur i etapów odkształcenia pozwala znacząco poprawić mikrostrukturę, zmniejszyć wielkość ziaren i ograniczyć występowanie wad, co ma kluczowe znaczenie dla przemysłu kosmicznego czy lotniczego.

Analiza źródeł wskazuje także na dynamiczny rozwój stanowisk laboratoryjnych, które umożliwiają prowadzenie badań w warunkach zbliżonych do przemysłowych przy ograniczonych kosztach. Przykłady ośrodków badawczych w Cambridge, Aachen czy Valenciennes pokazują, że dzięki nowatorskim rozwiązaniom konstrukcyjnym możliwe jest testowanie nowych strategii walcowania, kinematyki procesu oraz narzędzi korekcyjnych. W Polsce badania te dopiero się rozwijają, jednak powstają już własne stanowiska badawcze, np. na Politechnice Lubelskiej, AGH czy w instytutach Sieci Łukasiewicz. Otwiera to możliwości dalszej współpracy nauki z przemysłem w celu opracowywania innowacyjnych technologii.

Podsumowując, literatura potwierdza, że walcowanie pierścieni jest procesem złożonym, wymagającym interdyscyplinarnego podejścia łączącego doświadczenia przemysłowe, badania eksperymentalne i symulacje komputerowe. Wciąż istnieją luki wiedzy dotyczące m.in. walcowania szczególnie stopów lekkich takich jak stopy aluminium oraz nowych rozwiązań konstrukcyjnych walcarek, zwłaszcza w zakresie regulowanego ustawienia trzpienia kształtującego. Należy też podkreślić, że nie ma wytycznych to projektowania strategii walcowania, robi się najczęściej metodą prób i błędów wspomaganą modelowaniem matematycznym. O ile jest trochę informacji o powiązaniu strategii walcowania z mikrostrukturą dla stali to brak jest takich informacji dla stopów aluminium. Wypełnienie tych luk ma duże znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne, odpowiadając na rosnące potrzeby przemysłu poszukującego bardziej efektywnych, elastycznych i ekologicznych technologii wytwarzania pierścieni.

3. Cel i teza pracy

Celem niniejszej rozprawy jest opracowanie i przeanalizowanie procesu walcowania pierścieni ze stopu aluminium EN AW-6082 z wykorzystaniem nowatorskiej, laboratoryjnej walcarki pierścieni o regulowanym pochyleniu trzpienia. Praca określa wpływ zmienny kąta nachylenia trzpienia kształtującego na przebieg procesu i właściwości otrzymanych pierścieni. Zamierzeniem jest uzyskanie pierścieni o wymaganej geometrii (docelowej średnicy, wysokości oraz grubości ścianki) przy zachowaniu jednorodnej mikrostruktury materiału i odpowiednich właściwości mechanicznych.

Postawiona w pracy teza badawcza zakłada, że **wprowadzenie możliwości wychylania trzpienia kształtującego w procesie walcowania pierścieni umożliwi lepszą kontrolę kształtu i właściwości pierścieni ze stopu aluminium 6082.**

Metodyka badawcza

Aby zrealizować cel pracy i zweryfikować postawioną tezę, zastosowano kompleksową metodykę badawczą łączącą prace projektowo-konstrukcyjne, symulacje numeryczne oraz eksperymenty laboratoryjne z analizami materiałowymi:

- **Projekt i budowa stanowiska badawczego:** Na potrzeby rozprawy zaprojektowano i wykonano unikatową walcarkę laboratoryjną do walcowania pierścieni. Urządzenie to cechuje się kompaktową budową oraz możliwością wychylania trzpienia kształtującego w zakresie od -7° do $+7^\circ$ względem osi pionowej walca głównego. Walcarka składa się z pięciu głównych zespołów: napędzanego walca głównego, trzpienia kształtującego (osadzonego w regulowanych, wychylnych łożach), dwóch walców stożkowych (górnego i dolnego) oraz pary walców centrujących. Takie rozwiązanie konstrukcyjne – chronione zgłoszeniem patentowym – umożliwia realizację różnych trybów pracy trzpienia: od położenia prostego, przez stałe pochylenie dodatnie lub ujemne, aż po dynamiczny ruch wahliwy podczas walcowania. Zbudowanie tego stanowiska badawczego pozwoliło na przeprowadzenie rzeczywistych prób walcowania w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.
- **Symulacje numeryczne procesu (QForm):** Przed przystąpieniem do właściwych eksperymentów fizycznych, wykonano szereg symulacji numerycznych procesu

walcowania pierścieni z użyciem oprogramowania QForm. Wykorzystano dedykowany moduł *Ring Rolling* programu QForm, co umożliwiło odwzorowanie procesu kształtowania pierścienia z uwzględnieniem geometrii narzędzi (walca głównego, trzpienia, walców stożkowych i centrujących) oraz właściwości stopu 6082. Symulacje pozwoliły na dobranie optymalnych parametrów procesu – m.in. prędkości obrotowych walca, posuwu liniowego trzpienia na obrót pierścienia oraz sił nacisku – tak aby uzyskać pierścień o założonej średnicy (około 230 mm) oraz grubości ścianki (zredukowanej z ~40 mm do ok. 18 mm). Analizy numeryczne posłużyły również do przewidzenia wpływu różnych wariantów pochylenia trzpienia na płynięcie metalu. Na tej podstawie wytypowano scenariusze do weryfikacji doświadczalnej, minimalizując ryzyko niepowodzenia prób i określając wstępne ustawienia maszynowe.

- **Badania eksperymentalne na walcierce laboratoryjnej:** Zgodnie z wynikami symulacji przeprowadzono fizyczne testy walcowania pierścieni na zbudowanej walcierce. Materiałem wsadowym był stop EN AW-6082 w stanie T6, dostarczony w formie pręta o średnicy 140 mm. Z pręta przygotowano wsady pierścieniowe o średnicy zewnętrznej $\varnothing 140$ mm, wewnętrznej $\varnothing 60$ mm i wysokości 50 mm. Proces walcowania polegał na stopniowym zwiększaniu średnicy pierścienia przy jednoczesnym zmniejszaniu grubości jego ścianki, z wykorzystaniem walca głównego (napędzającego obrót wsadu) oraz współpracującego trzpienia kształtującego. W toku badań wykonano serię prób dla różnych nastaw kinematyki trzpienia:
 - *Trzpień niewychylony (0°)* – konfiguracja bazowa, odpowiadająca tradycyjnemu procesowi walcowania z trzpieniem ustawionym pionowo.
 - *Trzpień wychylony pod stałym kątem* – $+2^\circ$ oraz $+4^\circ$ względem pozycji pionowej.
 - *Trzpień wahliwy (zmienny) w czasie trwania procesu kształtowania* o $\pm 1^\circ$ oraz $\pm 3^\circ$

Dodatkowo, w wybranych eksperymentach wykorzystano również możliwość regulacji położenia górnego walca stożkowego w celu redukcji wysokości pierścienia o 5 i 10 mm. Każda próba realizowana była przy ciągłym monitorowaniu parametrów procesu – prędkości posuwu trzpienia, prędkości obrotowej walca głównego, pozycji walców stożkowych i centrycznych – za

pomocą dedykowanego panelu operatorskiego. Pozwoliło to na bieżącą kontrolę procesu i ewentualne korygowanie nastaw walcowania.

- **Analizy materiałowe i pomiary po walcowaniu:** Uzyskane pierścienie poddano wszechstronnej ocenie jakościowej. Przeprowadzono pomiary geometryczne – średnicy zewnętrznej oraz grubości ścianki – w kilku przekrojach wokół obwodu pierścienia, aby sprawdzić jednorodność kształtu i ewentualne odchyłki wymiarowe. Następnie wykonano badania mikroskopowe oraz pomiary twardości w przekrojach poprzecznych wybranych pierścieni. Mikrostruktura materiału została oceniona za pomocą mikroskopii świetlnej, skaningowej oraz transmisyjnej: próbki do obserwacji metalograficznych pobrano zarówno z obszaru brzegu, jak i środka przekroju pierścienia, co umożliwiło porównanie wielkości i jednorodności ziarna w różnych miejscach wyrobu. Pomiar twardości wykonano metodą Vickersa na przekrojach pierścieni po walcowaniu, przykładowo dla serii pierścieni uzyskanych z trzpieniem ustawionym pod kątami 0° , 2° i 4° oraz wahliwie 1° i 3° . Rozkład twardości pozwolił określić homogeniczność umocnienia materiału w wyniku procesu oraz porównać wpływ różnych wariantów ustawienia trzpienia na właściwości mechaniczne pierścienia.

Tak zaplanowana metodyka – od prac konstrukcyjnych i symulacji, poprzez eksperyment na unikalnym stanowisku badawczym, aż po analizy mikrostruktury i twardości – umożliwiła kompleksowe zbadanie procesu walcowania pierścieni ze stopu 6082. Pozwoliło to nie tylko zrealizować postawiony cel pracy, ale również rzetelnie zweryfikować hipotezę badawczą dotyczącą roli wychylnego trzpienia w kształtowaniu pierścieni.

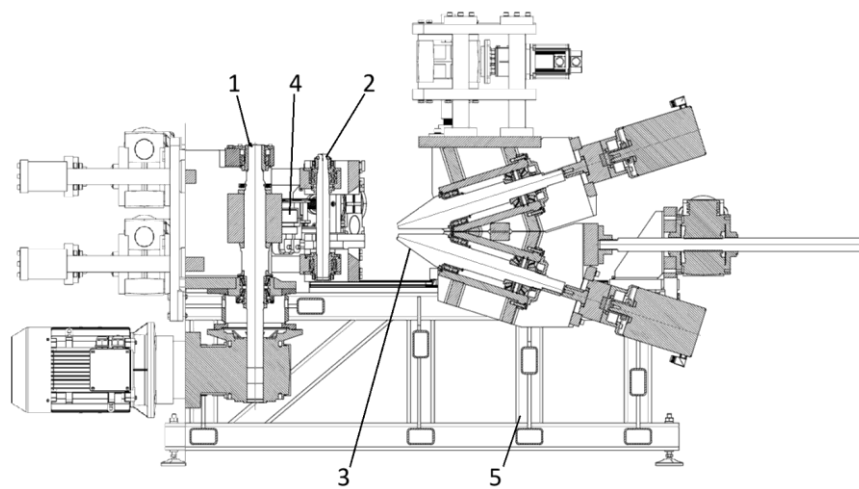
4. Stanowisko badawcze

Realizacja badań procesu walcowania pierścieni na przykładzie stopu aluminium 6082 obejmowała w swoim zakresie zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego walcarki laboratoryjnej. Powstałe stanowisko badawcze w pierwszym etapie badań posłużyło do przeprowadzenia wstępnych prób walcowania i opracowania parametrów początkowych procesu kształtowania pierścieni. W dalszym kroku na stanowisku badawczym walcarki laboratoryjnej zrealizowano badania doświadczalne walcowania pierścieni z wykorzystaniem zawansowanych możliwości ustawienia trzpienia kształtującego. W rozdziale 5 zaprezentowano budowę walcarki, parametry

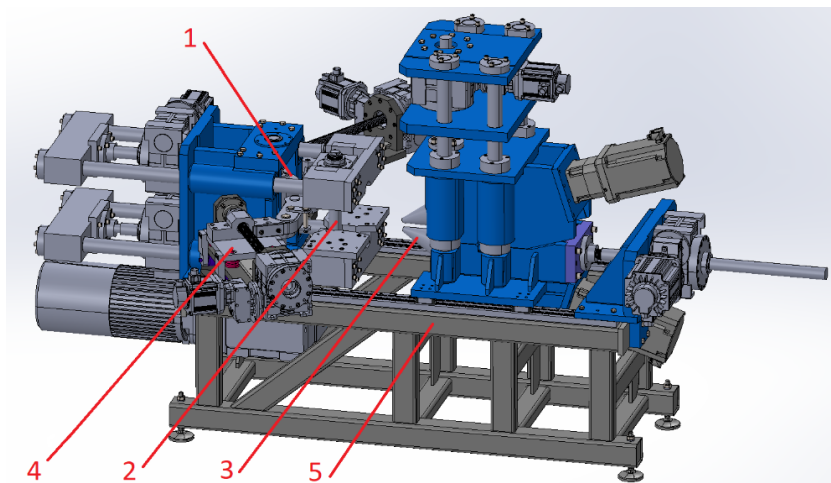
urządzenia, a także obliczenia przeprowadzone dla trzpienia kształtującego w celu doboru napędu. Przedstawiono również zasadę działania i sposób sterowania walcarką badawczą.

4.1. Budowa walcarki

Projekt walcarki z rozszerzoną kinematyką pracy trzpienia został opracowany przez zespół konstruktorów w Łukasiewicz –PIT, a jego nowatorskie rozwiązanie objęto ochroną patentową wynalazek pn. „Walcarka do walcowania pierścieni i sposób walcowania pierścieni” Pat.243823/P.437863. Na Rys. 177 przedstawiono widok 2D półprzekroju urządzenia (rys. 17a) oraz model 3D (rys. 17b) wykonany przy wykorzystaniu oprogramowania do projektowania SolidWorks.



a) Półprzekrój walcarki laboratoryjnej

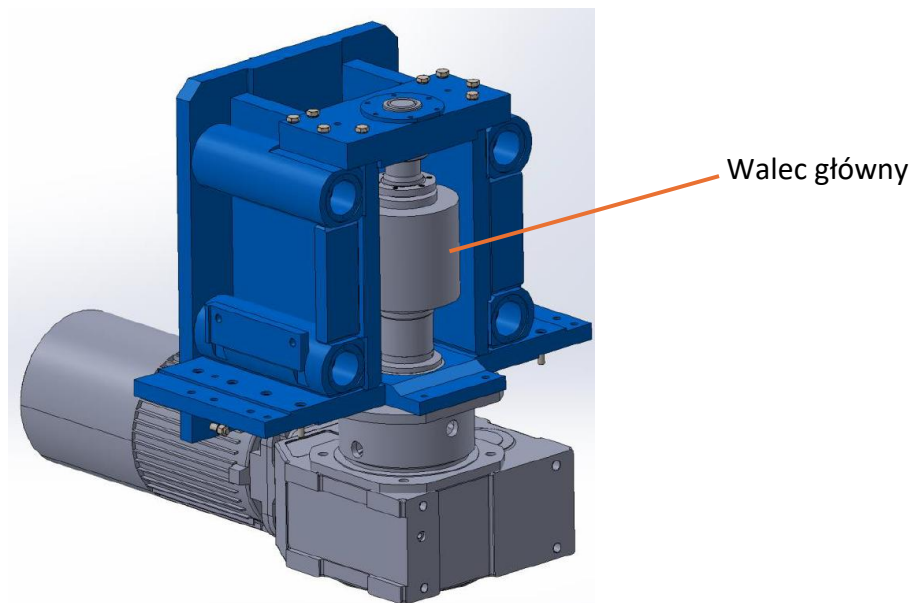


b) model 3D walcarki

Rys. 17. Budowa walcarki laboratoryjnej 1- zespół walca głównego, 2 – zespół trzpienia kształtującego, 3 – zespół walców stożkowych, 4 – zespół walców centrujących, 5 – korpus; a) model 3D, b) widok 2D półprzekrój

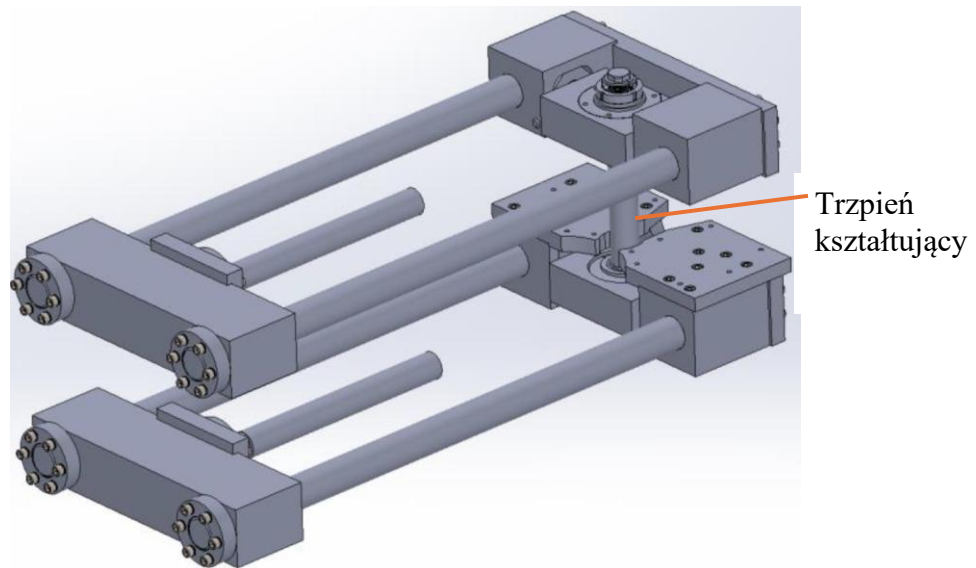
Urządzenie zbudowane jest z pięciu głównych zespołów: zespołu walca głównego 1, zespołu trzpienia kształtującego 2, zespołu walców stożkowych 3, zespołu walców centrujących 4 i korpusu 5 (idea procesu walcowania jest też przedstawiona na rys. 1)

Zespół walca głównego (Rys. 188) składa się z korpusu zbudowanego z płyt o grubości 30 mm połączonych ze sobą poprzez spawanie. Kształt korpusu jak i zastosowane grubości płyt zapewniają odpowiednią sztywność. W korpusie zabudowany jest walec główny napędzany silnikiem serwo z przekładnią o mocy 15kW, połączony sprzęgłem Radex N-85 NANA, które pozwala na przeniesienie momentu siły poprzez połączenie wpustowe z wałem napędowym. Wał łożyskowany jest u dołu dwoma łożyskami stożkowymi (nr 33113), a na górze łożyskiem wałeczkowym (NCF3014).



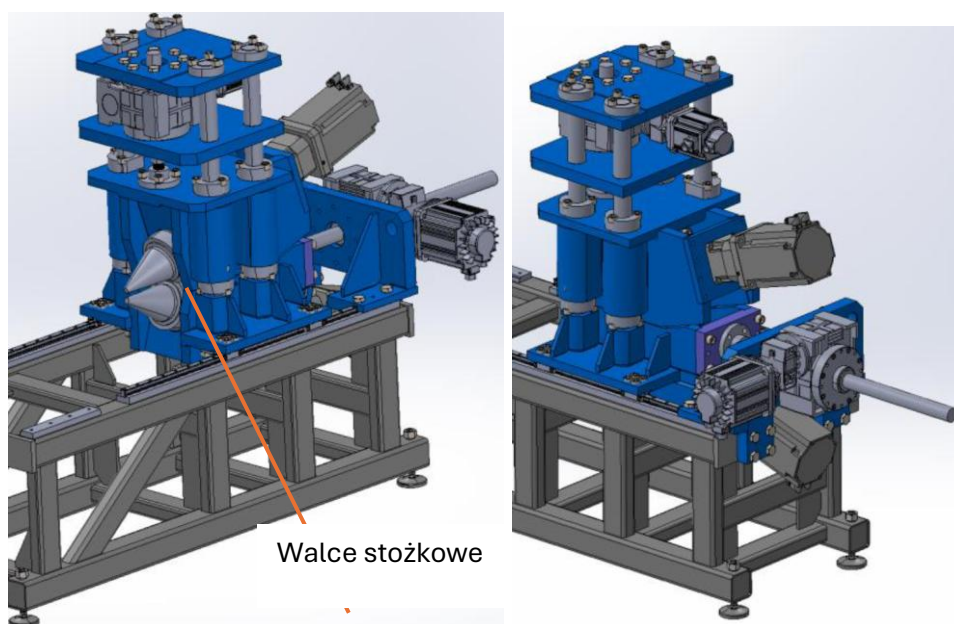
Rys. 18. Zespół walca głównego

Zespół trzpienia kształtującego (Rys. 199) składa się z łożyskowanego trzpienia zamocowanego w oprawach, które poprzez połączenie cylindryczne mogą realizować wychylenie trzpienia. Zastosowanie tulei ślizgowych cylindrycznych zapewnia płynność ruchu. Całość spięta jest z układem prowadnic, które podłączone są do dwóch niezależnych napędów (Kacperk MRP-100-SO+HM-281 SPEC ECMA-K11320). W ten sposób realizowane jest przemieszczanie się oraz ruch wychyłny trzpienia kształtującego. Do ruchu obrotowego trzpienia zastosowano łożyska baryłkowe dwurzędowe góra: łożysko nr 22309EK, na dole łożysko 24013.



Rys. 19. Zespół trzpienia kształtującego

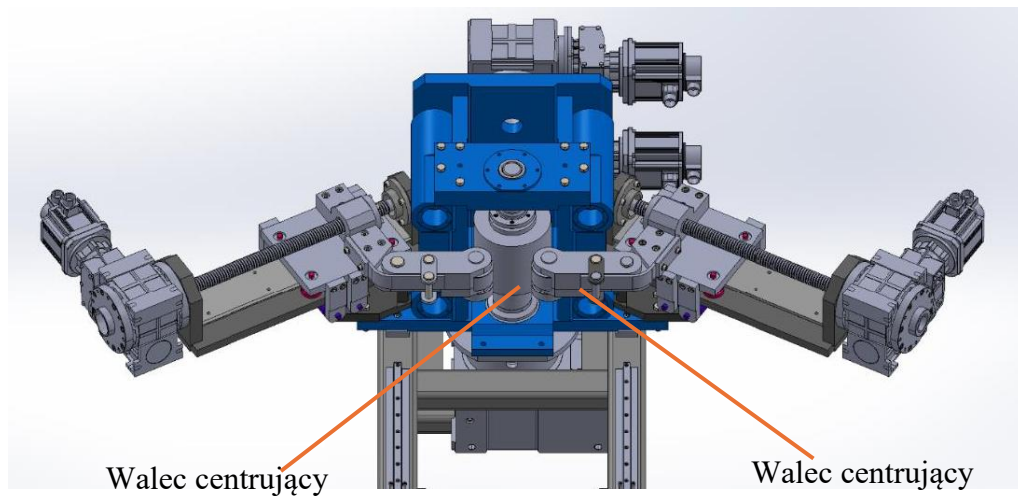
Zespół walców stożkowych (Rys. 20) składa się z dwóch korpusów, dolnego poruszającego się po prowadnicach liniowych, gdzie ruch jest realizowany za pomocą śruby i napędu zamocowanego do korpusu walcarki za pomocą elementu pośredniego. Górny korpus porusza się po prowadnicach walcowych, a ruch realizowany jest poprzez śrubę i napęd obrotowy. Napęd został tak dobrany, aby nacisk walca górnego na kształtowany pierścień wynosił maksymalnie 80 kN. Do realizacji ruchu obrotowego walca stożkowego wykorzystano silnik serwo o mocy 7,5 kW z przekładnią planetarną. Połączenie walca stożkowego z napędem realizowane jest poprzez sprzęgło Radex N-70 NN.



Rys. 20. Zespół walców stożkowych

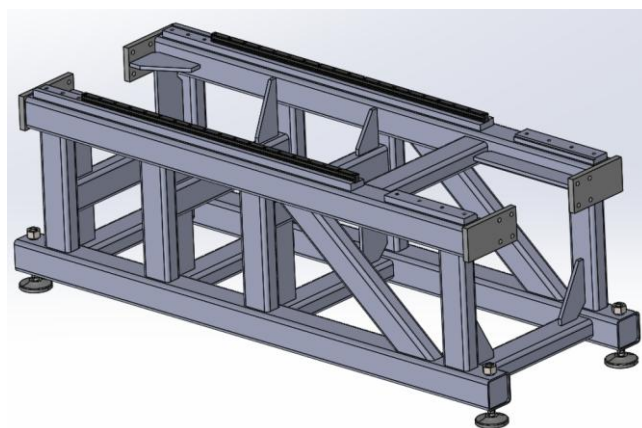
W dolnym korpusie zamocowane są specjalne oprawy z walcami stożkowymi ułożyskowanymi za pomocą łożyska dwurzędowego wałeczkowego (nr łożyska NNCF 5017) oraz dwóch łożysk stożkowych (nr łożyska 31312).

Zespół walców centrujących (Rys. 21) składa się z dwóch układów przemieszczania się walców zamocowanych do korpusu walca głównego. Ruch walców odbywa się po stałym kącie i realizowany za pomocą napędzanych śrub. Walce centryczne realizują ruch obrotowy bierny, natomiast ruch liniowy wynika bezpośrednio z przyrostu kształtowanego pierścienia podczas walcowania.



Rys. 21. Zespół walców centrujących zamocowanych do korpusu walca głównego.

Korpus walcarki (Rys. 22) zbudowany jest profili zamkniętych o grubości ścianki 5 mm. Podstawę dolną i górną stanowią profile o wielkości 100 x 100 mm, natomiast do ich połączenia zastosowano profile 60 x 100 mm oraz żebra kształtowe o grubości 12 mm. Całość osadzona jest na wibroizolatorach. W górnej części ramy znajduje się mocowanie dla zespołu walca głównego oraz prowadnice liniowe dla zespołu walców stożkowych.



Rys. 22. Korpus walcarki laboratoryjnej

4.2. Parametry walcarki

Realizacja kształtowania pierścienia na walcarce wymagała doboru parametrów pracy poszczególnych walców w zakresie wartości sił, prędkości obrotowych i liniowych. W związku z tym przeprowadzono szereg obliczeń i analiz na odpowiednich etapach projektowania, które umożliwiły określenie parametrów walcarki jak i procesu walcowania. W pracy przedstawiono obliczenia wykonane przez autora, które dotyczą trzpienia kształtującego.

W walcarce laboratoryjnej przyjęto następujące parametry geometryczne dla kształtowania pierścienia:

- maksymalna średnica pierścienia jaki można ukształtować: 500 mm,
- min. wielkość otworu w pierścieniu wsadowym: 60 mm,
- maksymalna wysokość wsadu: 80mm.

Dla walcarki laboratoryjnej przyjęto następujące parametry:

- prędkość przemieszczania się trzpienia: 1 mm/obr,
- prędkość obwodowa walca głównego: 0,4 – 1,5 [m/s].

Parametry siłowe walcarki laboratoryjnej:

- maksymalna siła nacisku trzpienia: 120 kN,
- maksymalna siła kształtowania górnego walca stożkowego: 80kN,
- maksymalna siła walców centrycznych: 25 kN.

Średnice walców zostały dobrane między sobą w sposób proporcjonalny odpowiadający walcarce przemysłowej. Dobrano następujące średnice:

- walec główny: $\varnothing 200$ mm,
- trzpień: $\varnothing 50$ mm,
- walce centryczne: $\varnothing 90$ mm,
- walce stożkowe: max. $\varnothing 125$ mm, kąt: 35° .

Dobrano również zakresy prędkości obrotowych i liniowych poszczególnych walców, które wraz z powyższymi parametrami posłużyły do przeprowadzenia obliczeń wybranych elementów walcarki oraz dobranie odpowiednich części handlowych i normatywnych. Przeprowadzono obliczenia dotyczące trwałości łożysk oraz dobrano napędy walców:

- trzpień: prędkość linowa: $V=0,28-2,1$ mm/s,
- walec główny: zakres prędkości obrotowej na wale wyjściowym: 38-70 obr./min.,
- układ walców stożkowych: prędkość linowa: $V=1,4-14$ mm/s,

- walec stożkowy: zakres prędkości obrotowej na wale wyjściowym 85-317 obr./min.,
- walce centryczne: prędkość linowa: $V = 0,7-7$ mm/s.

4.3. Obliczenia dla trzpienia kształtującego

Wyznaczenie prędkości obrotowej trzpienia n_t (obr./min)

Dla:

$$V = 0,4 \text{ m/s}$$

$$d_t = 50 \text{ mm}$$

$$V = \frac{\pi * d_t * n_t}{60000} \quad (4.1)$$

$$n_t = \frac{V * 60000}{d_t * \pi} = \frac{0,4 * 60000}{\pi * 50} = 152,72 \sim 153 \text{ [obr/min]}$$

Gdzie:

V - minimalna prędkość obwodowa

d_t - średnica trzpienia

Obliczenia prędkości liniowej trzpienia V_L

$$V_L = \frac{f_{obr}}{t} \text{ [mm/s]} \quad (4.2)$$

dla $t_{60} = 0,47$ [s], $f_{obr} = 1$ [mm/obr]

$$V_L = \frac{1}{0,47} = 2,127 \sim 2,13 \text{ [mm/s]}$$

dla $t_{60} = 3,60$ [s], $f_{obr} = 1$ [mm/obr]

$$V_L = \frac{1}{3,6} = 0,277 \sim 0,28 \text{ [mm/s]}$$

Gdzie:

V_L – prędkość liniowa trzpienia [mm/s]

f_{obr} - posuw osiowy na jeden obrót pierścienia

t_{60} - czas jednego obrotu dla średnicy pierścienia $\phi 60$ mm (min dla średnicy wew.)

t_{460} - czas jednego obrotu dla średnicy pierścienia $\phi 460$ mm (max dla średnicy wew.)

Obliczenia do silowników śrubowych w napędzie posuwu trzpienia w oparciu o katalog Kacperka dla SO Tr60x9

$$n_s = \frac{60 * V_L * i}{P} \quad [obr/min] \quad (4.3)$$

Dla obliczenia przełożenia całkowitego napędu przyjęto:

$$i_s = 20$$

$$i_w = 10$$

$$i_n = i_s + i_w = 20 * 10 = 200 \quad (4.4)$$

dla $V_L = 2,13$ [mm/s], $P = 9$ [mm]

$$n_s = \frac{60 * V_L * i}{P} \quad [obr/min] \quad (4.5)$$

$$n_s = \frac{60 * 2,13 * 200}{9} = 2840 [obr/min]$$

dla $V_L = 0,28$ [mm/s], $P = 9$ [mm]

$$n_s = \frac{60 * 0,28 * 200}{9} = 373,3 [obr/min]$$

Gdzie:

n_s - liczba obrotów silnika [obr/min]

i_s - przełożenie przyjęte dla przekładni ślimakowej (z katalogu)

i_w - przełożenie przyjęte dla przekładni walcowej

i_n - całkowite przełożenie napędu

P - skok gwintu śruby [mm/obr], dla śruby napędowej Tr60x9

Obliczenia momentu na wale silnika

$$M = \frac{F_{0,5} * P}{2\pi * i * \eta} \quad [Nm] \quad (4.6)$$

Dla η sprawność układu:

Gdzie przyjęto

$$\eta_s = 0,19$$

$$\eta_w = 0,98$$

η_s – sprawność przekładni ślimakowej (wg katalogu Kacperk dla silnika 1400 obr/min)

η_w – sprawność przekładni walcowej

$$\eta = \eta_s * \eta_w = 0,6 * 0,98 = 0,186 \quad (4.7)$$

$$M = \frac{F_{0,5} * P}{2\pi * i * \eta} = \frac{60 * 9}{2\pi * 200 * 0,186} = \frac{540}{233,616} \quad [Nm]$$

$$M = 2,31 \quad [Nm]$$

Obliczenie mocy silnika (dla stałego momentu)

$$P_s = \frac{M * n}{9550} \quad [kW] \quad (4.8)$$

$$P_{min} = \frac{2,13 * 373,3}{9550} = 0,09 \quad [kW]$$

$$P_{max} = \frac{2,13 * 2840}{9550} = 0,68 \quad [kW]$$

Silnik w zakresie obrotów $n = 400-3000$ obr/min przy zachowaniu stałego momentu (2,31Nm).

Wykonane obliczenia pozwoliły na dobranie napędu wraz z przekładnią dla realizacji posuwu i wychylenia trzpienia - Kacperk MRP-100-SO+HM-281 SPEC ECMA-K11320.

4.4. Praca walcarki (działanie walcarki)

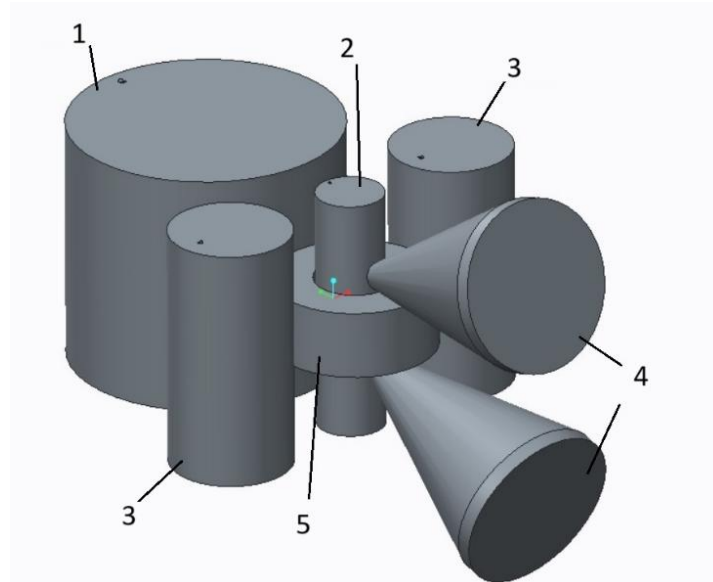
Walcarka laboratoryjna posiada budowę kompaktową, oznacza to, że w oparciu o opracowaną dokumentację konstrukcyjną możliwe jest wykonanie projektu walcarki do walcowania pierścieni o większej maksymalnej średnicy i wysokości. Na Rys. 233 pokazano walcarkę laboratoryjną wykonaną w metalu z podpiętymi układami napędowymi.



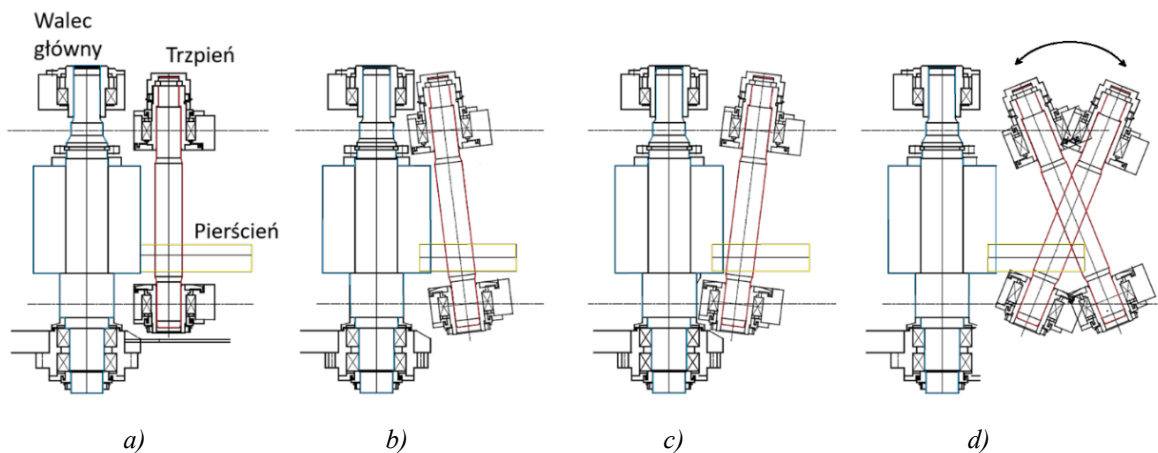
Rys. 23. Widok walcarki laboratoryjnej wykonanej w metalu

Proces walcowania pierścienia na walcarce laboratoryjnej odbywa się przy użyciu sześciu walców: walca głównego, trzpienia kształtującego, dwóch walców stożkowych i dwóch walców centrujących (Rys. 244). Walec główny (1) wykonuje ruch obrotowy napędzając pierścień wsadowy (5) umieszczony na stole walcarki. Trzpień (2) znajdujący się w otworze wsadu na skutek stykania się z wewnętrzną powierzchnią cylindryczną wsadu pierścieniowego obraca się wokół własnej osi ruchem wymuszonym oraz z posuwem liniowym o zadanej prędkości w kierunku walca głównego. Walce stożkowe (4) posiadają niezależny napęd, który wspomaga ruch obrotowy wsadu, a dodatkowo poruszają się one ruchem liniowym w kierunku od walca głównego podczas przyrostu średnicy pierścienia. Dodatkowo górny walec stożkowy posiada możliwość ruchu w

kierunku pionowym, co pozwala zredukować wysokość wstępniaka do wymiaru docelowego pierścienia. Walce centrujące (3) odpowiadają za zachowanie poprawnej geometrii kształtowanego pierścienia. Niezależnie od przyrostu średnicy walcowanego pierścienia zawsze tworzą stały kąt.



Rys. 24. Model poglądowy ustawienia walców: 1- walec główny, 2 – trzpień kształtujący, 3 –walce centrujące, 4 – walce stożkowe, 5-pierścień wsadowy



Rys. 25. Sposoby pracy trzpienia podczas walcowania: a) trzpień prosty; b) trzpień wychylony dodatnio; c) trzpień wychylony ujemnie; d) ruch wahliwy

W zespole trzpienia walcarki laboratoryjnej możliwe jest niezależne sterowanie ruchem liniowym belki górnej i dolnej, między którymi umocowany jest trzpień kształtujący. Pozwala to na poszerzenie ruchu trzpienia przez pochylenie go do osi walca głównego w zakresie od -7° do 7° . W efekcie oznacza to, że walcarka może pracować w następujących trybach (Rys. 255):

- ułożenie stałe proste trzpienia,
- ułożenie stałe pod kątem dodatnim lub ujemnym przez cały proces kształtowania,

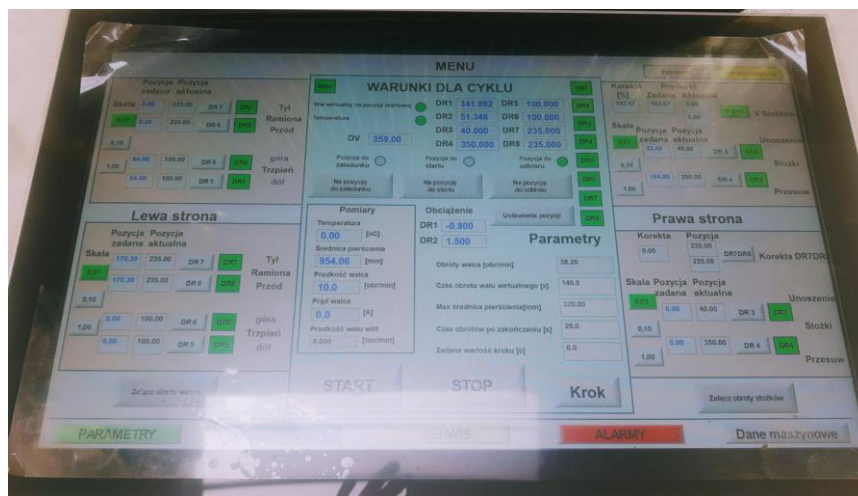
- ułożenie pod kątem dodatnim lub ujemnym przez określony czas procesu i powrót pozycji pionowej,
- praca wahliwa i przed końcem procesu przejście w pozycję prostą (naprzemienne wychylenie trzpienia pod kątem dodatnim i ujemnym przez cały czas trwania procesu).

W celu śledzenia parametrów technologicznych pracy opracowano panel operatorski. (Rys. 266)



Rys. 26. Widok panelu sterującego procesem walcowania

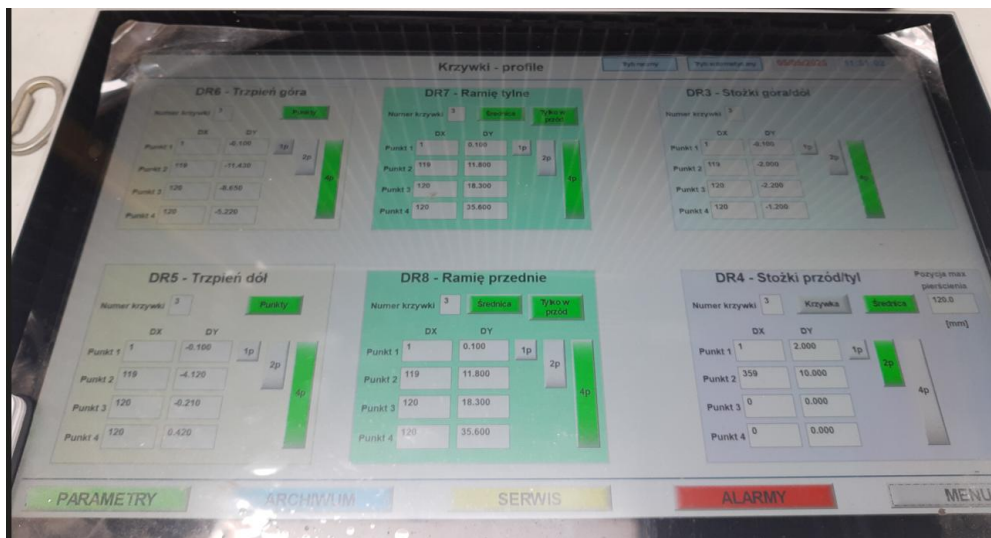
Aplikacja pozwala na zapis i odczyt wartości parametrów pracy. Ekran logowania daje dostęp do obsługi maszyny z poziomu administratora lub zwykłego użytkownika. Ze względu na dużą dynamikę procesu walcowania pierścieni i ewentualne wpływające na jego przebieg konieczne było wytypowanie tylko niezbędnych parametrów, pozwalających na obserwację przebiegu procesu (Rys. 277).



Rys. 27. Pulpit operatora z widocznymi parametrami procesu i podglądem na pozycje poszczególnych walców

Istnieje możliwość szybkiego ingerowania w proces walcowania pierścienia przez sterowanie zmianami na poziomie pulpitu operatora. W tym celu służą impulsometry (zewnątrzne pokrętki ręczne umożliwiające dynamiczną zmianę pracy danego walca) zainstalowane na pulpicie i przypisane dla danego ruchu walców, aby zapewnić odpowiednią szybkość reakcji operatora na zmiany w procesie. Korekcje może podlegać prędkość posuwu trzpienia, prędkość redukcji wysokości pierścienia, prędkość odjazdu walców stożkowych oraz centrycznych.

Sterowanie procesem walcowania opiera się na definiowaniu wartości określających prace wału wirtualnego. W systemach sterowania wał wirtualny to programowo utworzony, wirtualny element odniesienia, który symuluje działanie fizycznego wału. Służy do synchronizacji ruchów wielu osi napędowych w systemach automatyki, np. w maszynach pakujących czy drukarkach. Dzięki niemu wszystkie osie mogą pracować w precyzyjnie skoordynowany sposób, jakby były mechanicznie połączone, mimo że są sterowane niezależnie. Ruch osi napędowych opisany jest za pomocą krzywek cyfrowych. Krzywki cyfrowe to programowo zdefiniowane funkcje ruchu, które określają, kiedy i jak napędy mają się poruszać w odniesieniu do wału wirtualnego. Zamiast fizycznych elementów, krzywki te działają w postaci sygnałów logicznych lub profili ruchu, aktywowanych w określonych pozycjach wału (Rys. 288). Umożliwiają precyzyjną synchronizację i automatyzację złożonych sekwencji ruchów w maszynach, bez potrzeby stosowania mechanicznych komponentów.



Rys. 28. Zdjęcie pulpitu z widocznymi zapisami określonych pozycji dla poszczególnych walców

5. Materiał badawczy

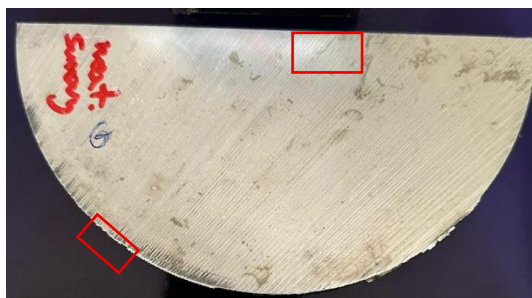
Materiał badany to stop aluminium EN AW-6082 w postaci pręta o średnicy 140 mm w stanie T6. Stop ten należy do rodziny stopów serii 6000, zawiera głównie magnez i krzem. Jest znany ze swojej wysokiej wytrzymałości, dobrej odporności na korozję oraz doskonałej obrabialności. Dzięki połączeniu korzystnych właściwości mechanicznych, stop ten znajduje szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, transportowym, konstrukcyjnym czy stoczniovym.

Dla dostarczonego materiału przeprowadzono analizę jego składu chemicznego. Wyniki zawartości pierwiastków, będące średnią z 6 punktów pomiarowych, pokazano w Tabeli 1.

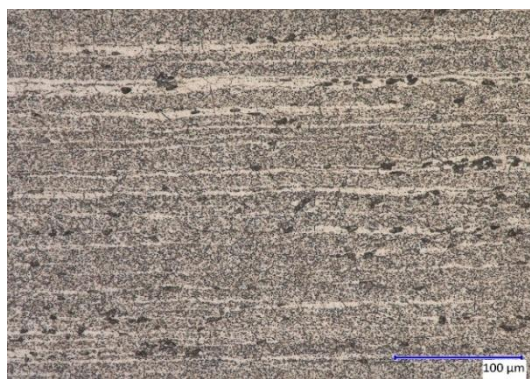
Tabela 1. Wyniki analizy składu chemicznego dostarczonego stopu aluminium

Nr próbki	Zawartość pierwiastków w % wagowych			
	Si	Cu	Mg	Cr
nr 1	0,943	0,057	0,701	0,022
	Mn	Ti	Fe	Zn
	0,589	0,204	0,143	0,028

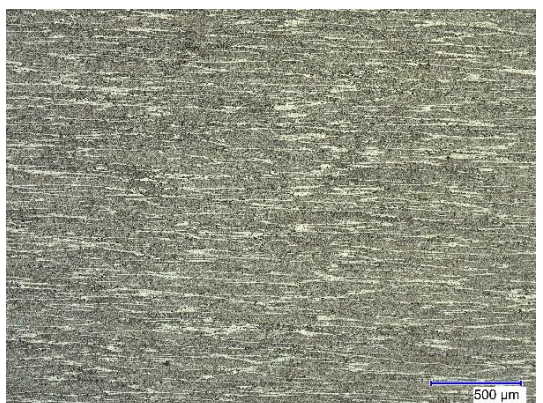
Skład chemiczny potwierdził, że dostarczony materiał spełnia kryteria dla stopu EN AW 6082 wg PN-EN 573-3 Aluminium i stopy aluminium (Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów, z wyłączeniem Ti). Przeprowadzono również badania mikroskopowe mikrostruktury dostarczonego materiału. Do badań wycięto krążek o grubości 10 milimetrów, a miejsca obserwacji wykonano na brzegu oraz środku próbki, tak jak pokazano na Rys. 299. Makrostruktura materiału przy brzegu jest dość jednorodna i drobnoziarnista, natomiast im bliżej środka tym bardziej jest zróżnicowana z większymi i mniej jednorodnymi ziarnami w porównaniu do brzegu. Z pręta stopu aluminium 6082 o średnicy $\varnothing 140$ mm ucięto plastry na wykokosieć 55 mm. W tak przygotowanych próbkach wytoczono otwory o średnicy $\varnothing 60$ mm i frezowano je na wysokość 50 mm (Rys. 3030).



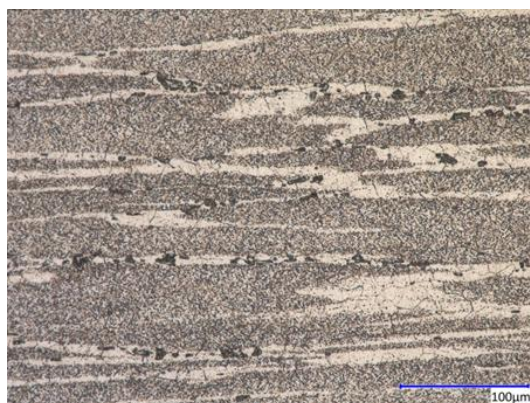
a)



b)

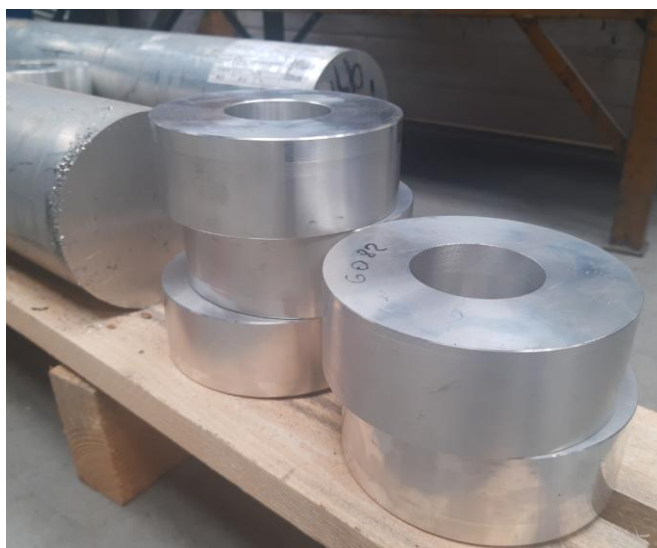


c)



d)

Rys. 29. Zdjęcia z obserwacji mikroskopowych materiału wyjściowego stopu aluminium 6082 pobranej z pręta dla różnych powiększeń a), b) i c) d) środek krążka



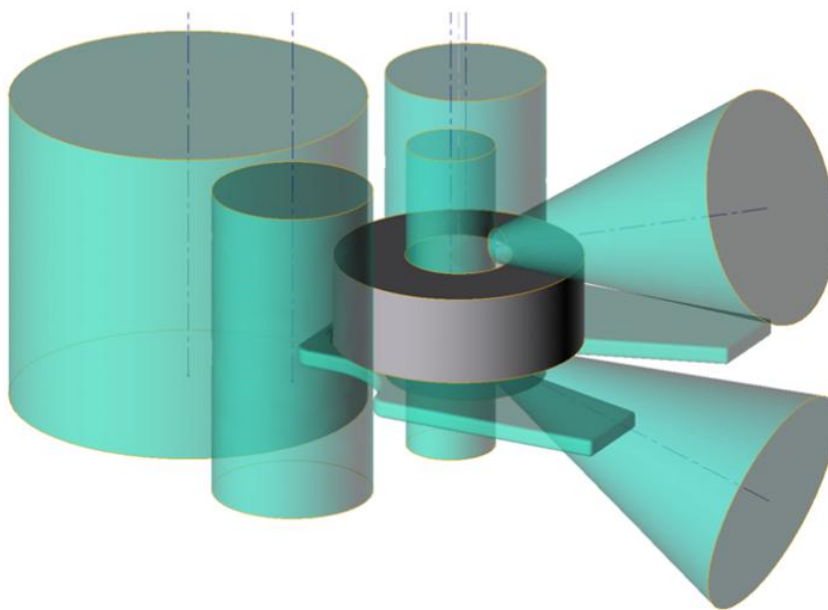
Rys. 30. Materiał badawczy wraz z przygotowanymi próbkami do badań

6. Symulacje numeryczne

W rozdziale 7 opisano przeprowadzone modelowanie numerycznych procesu walcowania pierścieni dla stopu aluminium 6082. Przedstawiono program użyty do modelowania numerycznego, parametry oraz przyjęte warunki brzegowe. Następnie przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań i określono parametry procesu walcowania do realizacji badań wstępnych na walcierce laboratoryjnej.

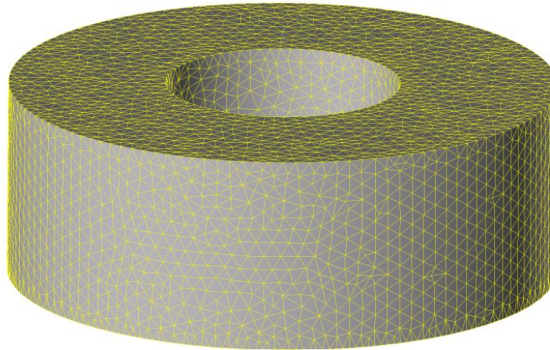
6.1. Dobór parametrów wejściowych

W celu ustalenia możliwie najlepszych parametrów dla badań fizycznych, w pierwszej kolejności przeprowadzono badania numeryczne procesu walcowania pierścieni. Do symulacji numerycznych wykorzystano program Qform posiadający dedykowany moduł Ring Rolling do symulacji procesów walcowania kół i pierścieni. Moduł ten zawiera specjalny algorytm obliczeniowy dual mesh z dwiema nakładanymi na siebie siatkami, które zapewniają wysoka dokładność obliczeń oraz skracają czas symulacji. Modele narzędzi 3D, walców kształtujących wraz z ich położeniem wyjściowym względem pierścienia wsadowego wykonano w programie do modelowania inżynierskiego SolidWorks (Rys. 31). Model geometryczny zawiera walec główny, trzpień kształtujący, wsad pierścieniowy, walce centrujące (x2), walce stożkowe (x2) oraz aby zapewnić jak najdokładniejsze odwzorowanie rzeczywistego procesu płytę stołu, na której ułożony jest materiał wsadowy.



Rys. 31. Układ narzędzi przy walcowaniu pierścienia przyjęty do modelowania procesu wykonany w programie SolidWorks

Siatka mesh do obliczeń jest typu tetraedryczna (4-węzłowe elementy typu tetraedron) i nanoszona jest w edytorze graficznym Qshape programu Qform. Na Rys. 32 pokazano wsad pierścieniowy z utworzoną siatką.



Rys. 32. Wsad do walcowania z nałożoną siatką tetraedryczną

W podstawowym wariantcie symulacji założono, że prawidłowo wykonany proces walcowania powinien zapewniać uzyskanie pierścienia o średnicy 230 mm, o stałej wysokości 50 mm i redukcji ścianki do 18 mm oraz poprawnym kształcie geometrycznym. Model materiału wsadowego przyjęto z bazy materiałowej odpowiadający aluminium 6082. Symulacje numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem następujących parametrów wejściowych:

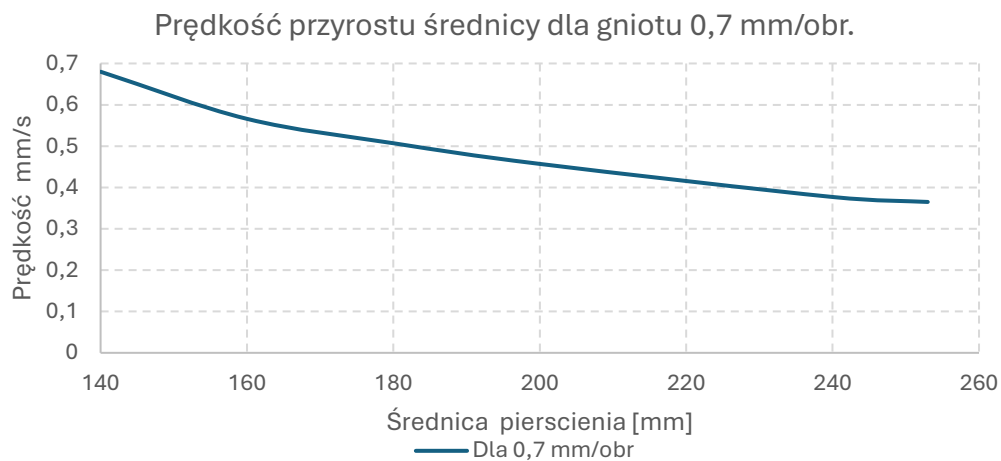
- wymiary wsadu pierścieniowego:
 - średnica zewnętrzna ϕ 140 mm,
 - średnica wewnętrzna ϕ 60 mm,
 - wysokość 50 mm;
- temperatura wsadu 480°C;
- temperatura walca głównego, trzpienia, walców centrujących i stożkowych 20°C;
- temperatura płyty stołu 70°C;
- współczynnik tarcia: 0,6 - dla układu wsad pierścieniowy - walce, bez smarowania;
- współczynnik tarcia: 0,3 - dla układu wsadu pierścieniowego i płyta stołu, ze smarowaniem;
- prędkość obrotowa walca głównego: 38,2 obr./min.

W programie Qform kinematyka ruchu walców realizowane jest przez określenie prędkości przyrostu średnicy pierścienia oraz zmiany wysokości pierścienia. W rozpatrywanym przypadku wysokość pierścienia podczas procesu kształtowania nie ulega zmianie i jest stała (50 mm). Natomiast do wyznaczenia przyrostu średnicy

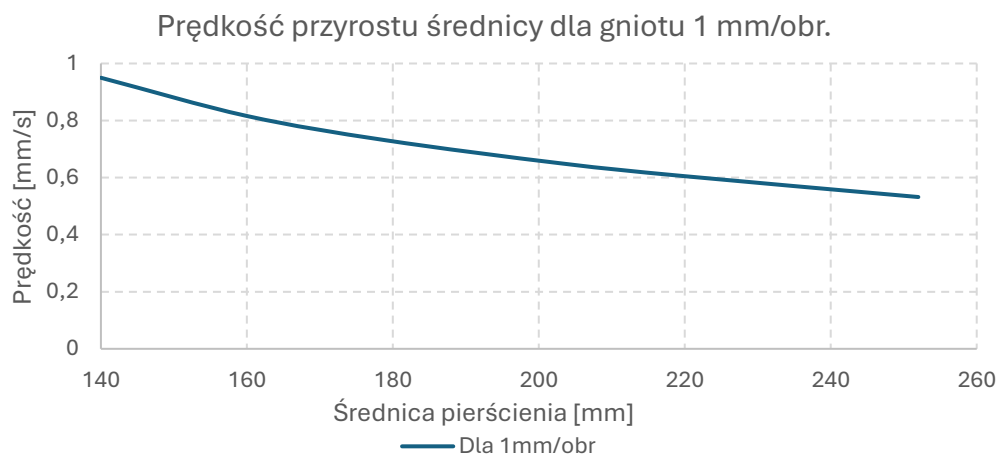
konieczna była znajomość prędkości przemieszczania się trzpienia, którą wyznaczono przy założeniu, że proces odbywa się przez zadawanie przez trzpień kształtujący stałego gniotu przypadającego na 1 obrót pierścienia oraz przy zachowaniu zasady stałej objętości. Do wyznaczenia tych wartości wykorzystano opracowany w Łukasiewicz - PIT na potrzeby innego projektu arkusz kalkulacyjny. Do obliczeń wyznaczono cztery wartości gniotu:

- 0,7 mm/1 obrót pierścienia,
- 1 mm/1 obrót pierścienia,
- 2 mm/1 obrót pierścienia,
- 4 mm/1 obrót pierścienia.

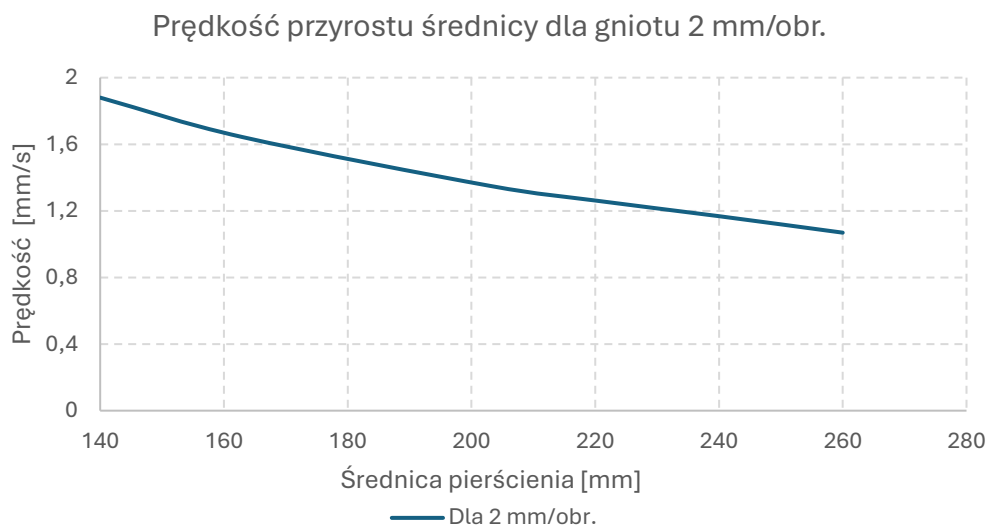
Na podstawie przeprowadzonych w arkuszu kalkulacyjnym obliczeń wyznaczono prędkości przyrostu średnicy pierścienia przedstawione w postaci krzywych na rysunkach 33-36.



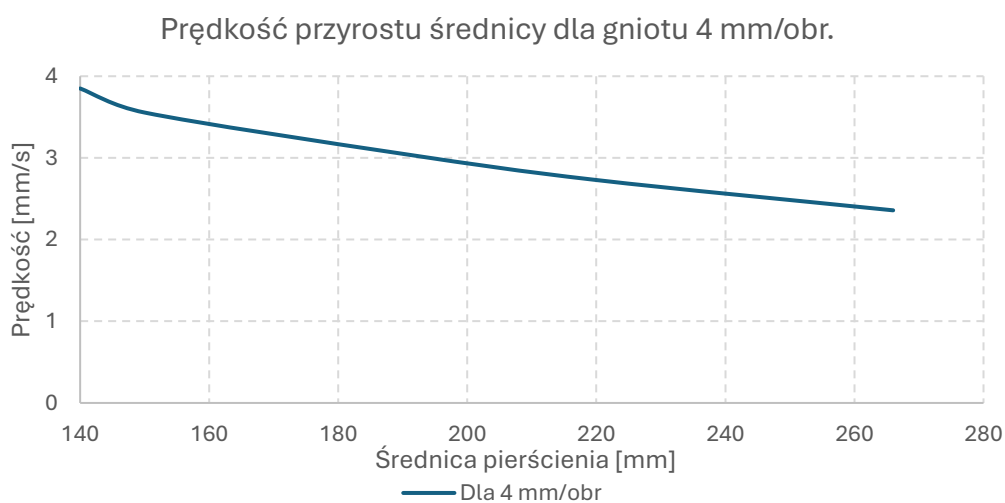
Rys. 33. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 0,7 mm na obrót kształtowanego pierścienia



Rys. 34. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 1 mm na obrót kształtowanego pierścienia



Rys. 35. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 2 mm na obrót kształtowanego pierścienia



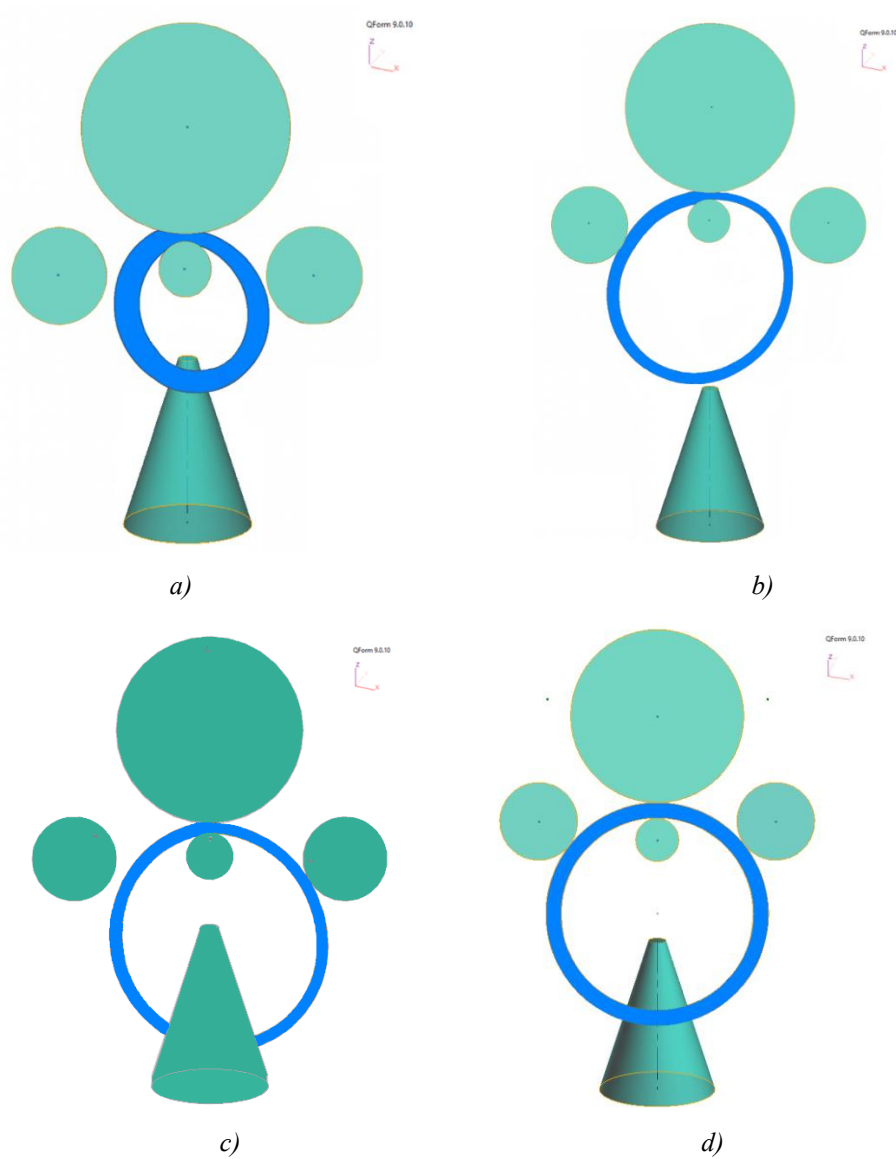
Rys. 36. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 4 mm na obrót kształtowanego pierścienia

Uzyskane krzywe prędkości przyrostu średnicy pierścienia zaimportowano do programu symulacyjnego w postaci tabelarycznej.

6.2. Wyniki symulacji numerycznych

Efektorem przyjętych założeń w badaniach symulacji numerycznych procesu walcowania powinno być uzyskanie założonej średnicy pierścienia (230 mm) o prawidłowym kształcie geometrycznym przekroju poprzecznego ścianki. Na Rys. 37

przedstawiono wyniki symulacji numerycznych dla zmiany geometrii pierścieni w zależności od różnych wartości zadawanego gniotu podczas pojedynczego obrotu pierścienia.



Rys. 37. Widok geometrii pierścieni otrzymanych z symulacji numerycznych procesu walcowania z różnymi wartościami gniotów (prędkościami przemieszczania się trzpienia): a) 4 mm/1 obr. pierścienia; b) 2 mm/obr. pierścienia; c) 1 mm/obr. pierścienia; d) 0,7 mm/obr pierścienia;

Wstępne badania numeryczne dla założonego zakresu prędkości przemieszczenia się trzpienia wykazały, że w zakresie $4 \div 1$ mm/ 1 obrót pierścienia prędkości przemieszczania się trzpienia, następuje utrata prawidłowej geometrii kształtowanego pierścienia. Na rys. 37a, następuje wyraźne wciskanie się trzpienia walcarki w kształtowany pierścień, co jest wynikiem zbyt dużej prędkości przemieszczania trzpienia. Podobnie wciskanie trzpienia, choć nie tak wyraźne, można zaobserwować na rysunku

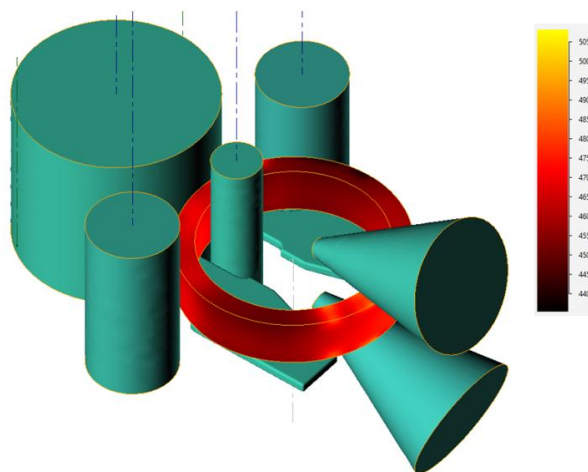
37b, 37c, dodatkowo widać przemieszczanie się materiału pierścienia na boki podczas kształtowania pierścienia. Może być to wynikiem, nadal zbyt dużej prędkości przemieszczania trzpienia lub zbyt dużej prędkości obrotowej na walcach stożkowych. Poprawny kształt pierścienia uzyskano przy prędkości kształtowania 0,7 mm/1 obrót pierścienia, rysunek 37d.



Rys. 38. Przekrój pierścienia otrzymanego dla prędkości przemieszczenia trzpienia 0,7 mm/1 obrót pierścienia.

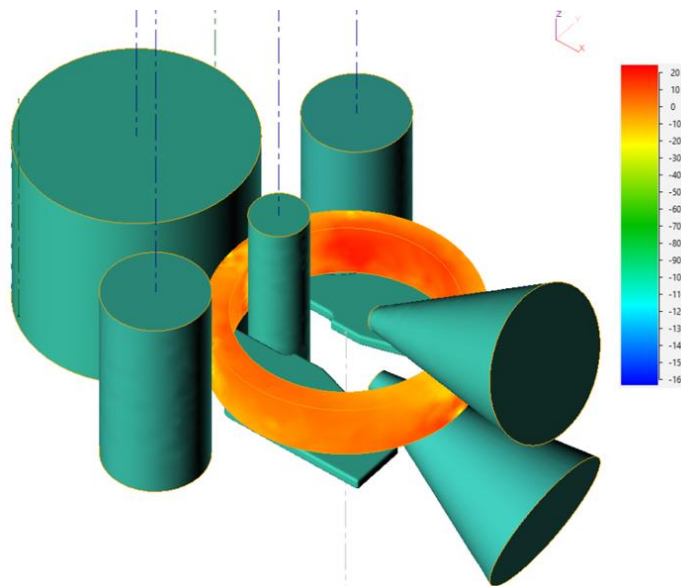
Na Rys. 38 przedstawiono przekrój otrzymanego pierścienia dla przemieszczenia trzpienia 0,7 mm/1 obr., na którym można zaobserwować niewielką wklęsłość na powierzchniach czołowych, zwane „rybim ogonem”. Pomiar wysokości 49,32 mm i szerokości 17,37 mm jest zbliżony do założeń, które przyjęto na etapie ustalania parametrów wejściowych, czyli stała wysokość 50 mm i szerokość 18 mm.

Na Rys. 39 i Rys. 40 przedstawiono przykładowe wyniki otrzymane ze wstępnej analizy numerycznej procesu kształtowania, odpowiednio rozkład temperatury oraz naprężenia średniego.



Rys. 39. Rozkład temperatury pierścienia dla prędkości przemieszczenia trzpienia 0,7 mm/1 obrót.

Wyniki symulacji pokazują spadek temperatury podczas procesu kształtowania do 440°C na koniec procesu kształtowania. Natomiast naprężenia średnie dochodzą maksymalnie do 163 MPa.



Rys. 40. Rozkład naprężeń średnich pierścienia dla prędkości przemieszczania trzpienia 0,7 mm/1 obrót
Przeprowadzone badania numeryczne wykazały, że najistotniejszym parametrem procesu walcowania jest prędkość przemieszczania trzpienia, która powinna być mniejsza niż 1 mm/1 obrót. Część wyników z modelowania może być zastosowana, zarówno w badaniach z wykorzystaniem trzpienia prostego, jak i podczas pracy trzpienia pochylonego.

7. Wstępne próby walcowania pierścieni

Kolejnym etapem prac było przeprowadzenie badań wstępnych procesu walcowania pierścieni na walcierce laboratoryjnej, na podstawie wcześniej wykonanych symulacji numerycznych. Dane wejściowe do procesu zostały przeliczone do postaci krzywek cyfrowych i zaimplementowane do systemu sterowania walcarki. W tym systemie ruch walców opisany jest przez wyznaczenie punktów docelowych, do których walec musi przemieścić się w określonym czasie trwania procesu kształtowania. Aktualnie sterowanie odbywa się poprzez zdefiniowanie czterech charakterystycznych punktów krzywej przemieszczenia dla danego walca. Wartości tych punktów obliczono z wykorzystaniem podstawowych zależności kinematycznych, co umożliwiło określenie wymaganej drogi przemieszczenia trzpienia kształtującego w zadanym przedziale czasu. Badania wstępne przeprowadzono na wsadach pierścieniowych ze stopu aluminium EN AW-6082 o wymiarach początkowych $\phi 140 \times 50$ mm. Przed rozpoczęciem procesu

materiał był nagrzewany w piecu oporowym do temperatury 480 °C i wygrzewany przez co najmniej 40 minut w celu wyrównania rozkładu temperatury w całej objętości próbki (Rys. 41).



Rys. 41. Piec laboratoryjny Nabertherm z programowalnym schematem nagrzewania

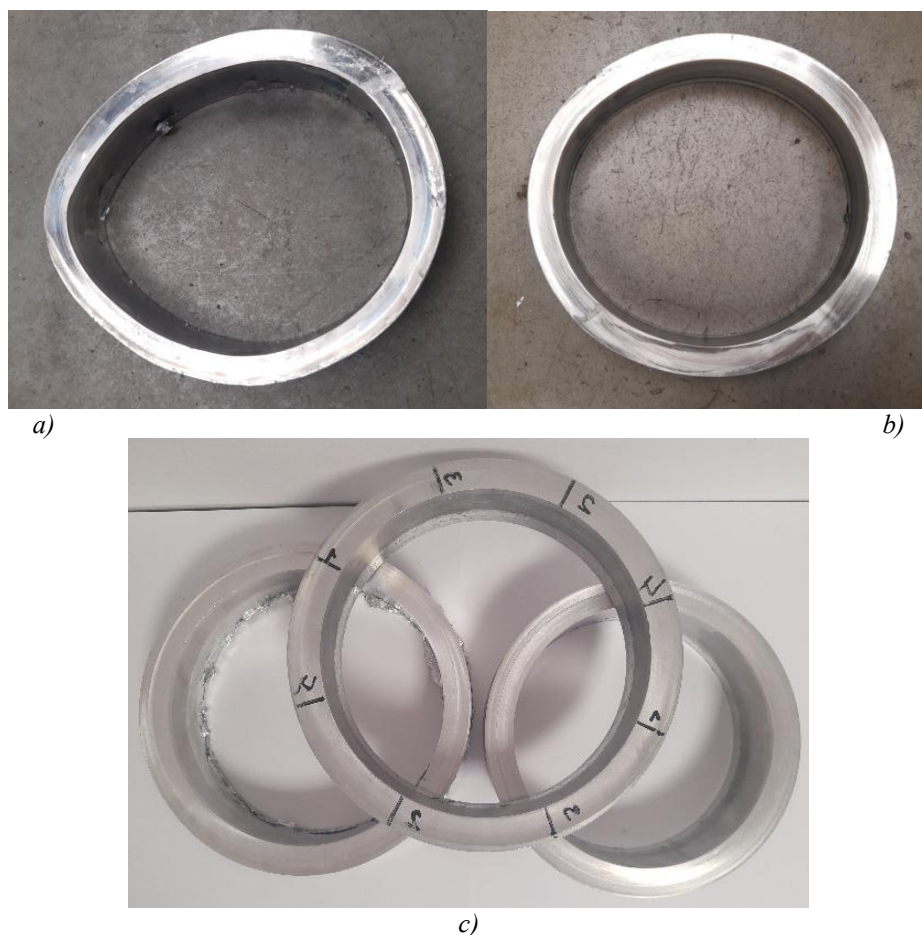
Następnie próbki poddano walcowaniu z zachowaniem stałej wysokości pierścienia oraz redukcją grubości ścianki, co pozwoliło na weryfikację poprawności założeń przyjętych do symulacji numerycznych.

W tabeli 2 zestawiono parametry procesu, które wprowadzono do systemu sterowania walcarki podczas badań wstępnych.

Tabela 2 Parametry cyklu badań wstępnych

Np.	Prędkość obrotowa walca głównego [mm/obr]	Gniot [mm/1 obr]	Kąt ustawienie trzpienia kształtującego	Czas procesu [s]
1	38,2	0,7	0°	40
2	38,2	0,5	0°	60
3	38,2	0,4	0°	70

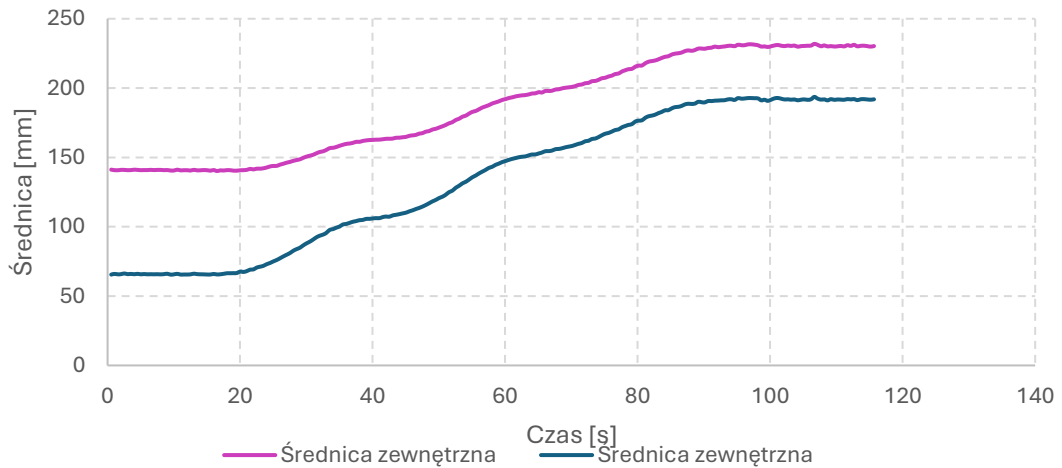
Na Rys. 42 przedstawiono przykładowe pierścienie otrzymane w wyniku przeprowadzonych prób.



Rys. 42. Zdjęcia pierścieni otrzymane z badań wstępnych: a) pierścień 1, b) pierścień 2 c) pierścieni 3 zgodnie z tabelą 2

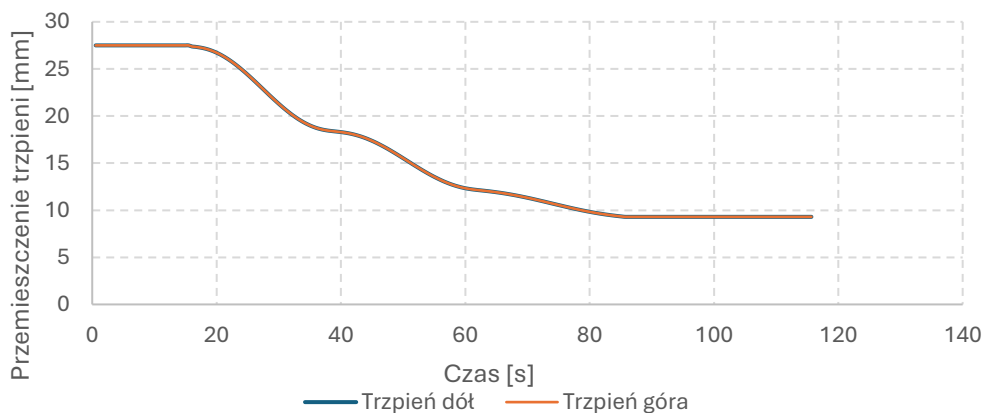
W próbach 1 i 2 odpowiednio Rys. 42a, Rys. 42b uzyskano wyroby o nieprawidłowej geometrii, co wynikało z nadmiernej prędkości przemieszczania trzpienia kształtującego. Powodowało to lokalne wciskanie się trzpienia w materiał wsadowy i zaburzenie równomierności procesu odkształcenia. Poprawny kształt pierścienia (Rys. 42c) uzyskano dopiero przy parametrach odpowiadających gniotowi 0,4 mm/obr i czasie procesu 70 s, przy prędkości obrotowej walca głównego 38,2 mm/obr. Efektem badań wstępnych były pierścienie o średnicy końcowej 230 mm i wysokości 50 mm, które stanowiły punkt wyjścia do dalszych badań doświadczalnych. Parametry stosowane dla pierścienia nr 3 przyjęto do dalszych badań doświadczalnych.

Urządzenie pozwoliło na zbieranie szeregu danych dotyczących obciążeń i przemieszczeń w czasie rzeczywistym podczas pracy maszyny. Na Rys. 43, Rys. 44, Rys. 45, Rys. 46 przedstawiono odpowiednio: zmiany średnic wewnętrznej i zewnętrznej pierścienia, przemieszczenie trzpienia, wartości momentu generowane na trzpieniu oraz walcu głównym w czasie dla pierścienia nr 3.



Rys. 43. Wykres zmiany średnicy w czasie

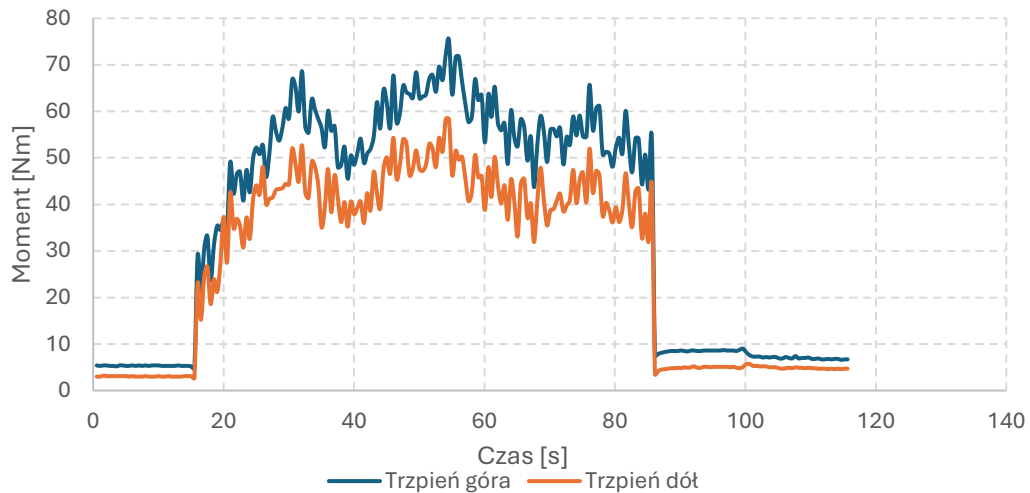
Wykres na Rys. 43 przedstawia zmianę średnicy zewnętrznej (krzywa niebieska) i wewnętrznej (krzywa różowa) podczas procesu kształtowania. Można zaobserwować przyrost średnicy w wyniku przemieszczania się trzpienia do wartości 230 mm na średnicy zewnętrznej i 191 mm na średnicy wewnętrznej, co odpowiada redukcji szerokości pierścienia z 40 mm do 19,5 mm.



Rys. 44. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie

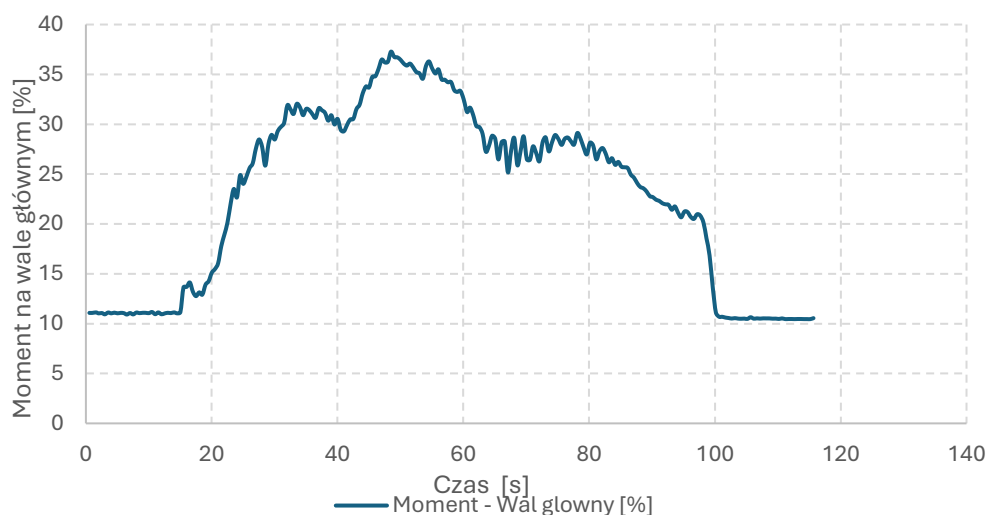
Z wykresu (Rys. 44) wynika, że trzpień kształtujący w trakcie procesu walcowania wykonał drogę w ruchu liniowym o około 18 mm w czasie 70 s potwierdzając przyjęte wytyczne dla trwania procesu. Początek wykresu to czas ok 16 s, w którym narzędzia z umieszczonym wsadem pierścieniowy ustawiają się (dojeżdżają) do pozycji startowej. Natomiast dla 86 s następuje zakończenie dalszego ruchu trzpienia, w tym momencie rozpoczyna się kalibracji, który trwa ok. 20 s. W czasie kalibracji ukształtowany pierścień wykonuje dodatkowe obroty, które mają za zadanie wyrównanie

średnicy, jeśli są odchylenie wymiarowe oraz eliminuje możliwość powstania wad powierzchniowych przy gwałtownym zakończeniu procesu kształtowania.



Rys. 45. Wykres zmiany momentu na trzpieniu w czasie

Na wykresie Rys. 45 przedstawiono moment obrotowy mierzony w górnej (krzywa niebieska) i dolnej (krzywa pomarańczowa) części trzpienia w procesie walcowania pierścienia. Niewielki moment na początku krzywej wynika z ograniczonego kontaktu trzpienia z wsadem (początek procesu). Wraz ze wzrostem przemieszczenia trzpienia moment rośnie – powierzchnia styku i siła tarcia zwiększają się, a materiał ma wyższy opór odkształcenia. W połowie procesu kształtowania (ok. 54 s) moment osiąga maksimum ok. 75,3 Nm – to odpowiada największym oporom plastycznym i warunkom kontaktu trzpienia. Następnie widać stopniowy spadek momentu, w miarę jak pierścień zwiększa średnicę, a powierzchnia styku trzpienia maleje. Różnica momentu między górą i dołem trzpienia wynika głównie z odkształcenia skrętnego trzpienia wzdłuż jego długości podczas przenoszenia momentu generowanego przez kontakt z materiałem wsadowym.



Rys. 46. Wykres zmiany obciążenia momentem wyrażona w % na wale głównym w czasie

Na Rys. 46 przedstawiającym obciążenie momentem na wale głównym, można zauważyć podobnie do wykresu zmiany momentu trzpienia, że moment rośnie wraz z przemieszczeniem się trzpienia. W połowie procesu osiąga najwyższą wartość 36 % (ok 1350 Nm), a następnie zaczyna maleć.

Otrzymane pierścienie poddano pomiarom geometrii, gdzie zmierzono średnicę zewnętrzną i grubość ścianki. W Tabeli 3 zaprezentowano wyniki pomiarów, które wykonano w 4 położeniach na obwodzie pierścienia co 45°.

Tabela 3 Zestawienie pomiarów przykładowego pierścienia w technologii trzpienia prostego

Kąt pomiaru średnicy	Średnica zewnętrzna [mm]	Grubość ścianki [mm]
0°	230,35	18,95
45°	230,19	18,91
90°	231,08	19,04
135°	230,96	18,95

Wyniki pomiarów potwierdziły, że opracowana technologia kształtowania umożliwiła ukształtowanie pierścieni z użyciem trzpienia prostego, co pozwoliło na przejście do badań doświadczalnych z różnym ustawieniem trzpienia.

8. Badania doświadczalne walcowania pierścieni dla procesu z różnym ustawieniem trzpienia

Badania wstępne wykazały, że pierścień bez wad geometrycznych można otrzymać dla procesu kształtowania, gdzie przyjęto gniot 0,4 mm/1obr. pierścienia, w

czasie 70 s. z prędkością obrotową walca głównego 38,2 mm/obr. i temperaturą pierścienia wsadowego 480°C. Dlatego te parametry przyjęto jako bazowe do przeprowadzenia badań doświadczalnych. Do procesu kształtowania wprowadzono dwie kolejne zmienne w celu sprawdzenia ich wpływu na proces kształtowania pierścieni:

- redukcja wysokości o 5 mm i 10 mm, (odpowiednio 10% i 20%);
- ustawienie trzpienia kształtującego 0° (ustawienie pionowe), pochylonego o- 2°, 4° i 6°.

W Tabeli 4 przedstawiono zestawienie parametrów cyklu badań, dla których przeprowadzono badania eksperymentalne.

Tabela 4 Parametry cyklu badań doświadczalnych

Prędkość obrotowa walca głównego [obr/min]	Gniot [mm/1 obr]	Kąt ustawienie trzpienia kształtującego	Redukcja wysokości pierścienia kształtującego [mm]		Czas procesu [s]
			5	10	
38,2	0,4	0°	5	10	70
38,2	0,4	2°	5	10	70
38,2	0,4	4°	5	10	70
38,2	0,4	6°	5	10	70






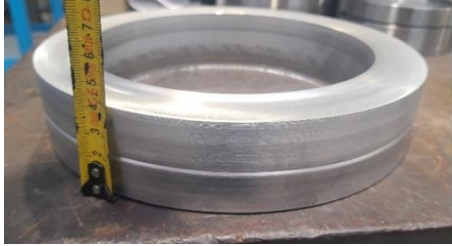


8.1. Wyniki badań doświadczalnych

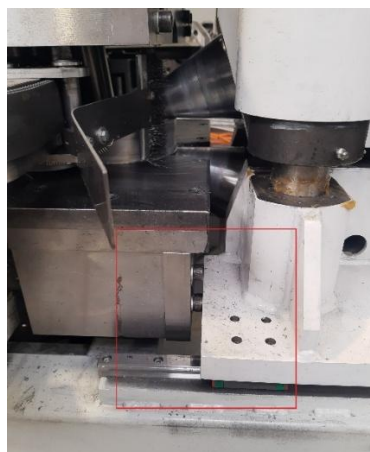
W Tabeli 5 przedstawiono zestawienie zdjęć pierścieni po procesie kształtowania dla trzpienia prostego i pod różnym kątem z redukcją wysokości 5 mm oraz 10 mm z czasem procesu kształtowania 70s.

Na przedstawionych zdjęciach można zaobserwować pierścienie bez widocznych wad geometrycznych przy redukcji wysokości o 5 mm. Przy redukcji o 10 mm widać wgłębienie na powierzchni cylindrycznej pierścienia. Jest to efektem zbyt dużej siły tarcia między walcami stożkowymi, a kształtowanym pierścieniem, przez co materiał ma ograniczoną możliwość płynięcia w kierunku obwodowym, co skutkuje zawijaniem się materiału na zewnętrznej powierzchni pierścienia (wada ta nazywana jest „cavity”).

W przypadku pierścienia kształtowanego z trzpieniem pod kątem 6° i redukcją wysokości 5 mm konieczne było zatrzymanie procesu ze względu na kolizję narzędzi (Rys. 47).

Tabela 5 Przykładowe pierścienie uzyskane po procesie walcowania w walcarce laboratoryjnej przy prędkości przemieszczenia trzpienia 0,4 mm/obr. pierścienia

Kąt	Redukcja wysokości 5 mm	Redukcja wysokości 10 mm
0°		
2°		
4°		
6°	 <p data-bbox="507 1451 737 1482">Proces przerwano</p>	



Rys. 47. Widok narzędzi podczas kształtowania pierścienia z trzpieniem ustawionym pod kątem 6° - widoczna kolizja narzędzi

W trakcie procesu kształtowania urządzenie za pomocą czujnika optycznego szczytuje zmiany średnicy zewnętrznej pierścienia, przez co system sterowania przesuwając ruchem liniowym zespół walców stożkowych, dlatego wraz ze wzrostem średnicy następuje odsunięcie walców stożkowych od osi walca głównego. W przypadku pierścienia kształtowanego pod kątem 6° nie doszło do znacznego wzrostu średnicy zewnętrznej pierścienia, aby walce stożkowe mogły się odsunąć. Równocześnie dolna belka zespołu trzpienia wysuwała się w celu przyjęcia zadanej pozycji umożliwiającej trzpieniowi pochylenie 6° . Dwa opisane czynniki, mogły spowodować zderzenie korpusu walców stożkowych z dolną belką, dlatego proces przerwano.

W pierwotnym planie badań przewidziano trzy grupy ustawień trzpienia kształtującego: położenie proste (0°), dodatnie pochylenie do $+7^\circ$ i ujemne pochylenie do -7° . Do ostatecznej realizacji części doświadczalnej wytypowano kąty dodatnie $+2^\circ$, $+4^\circ$ i $+6^\circ$ oraz analogicznie ujemne -2° , -4° i -6° . Już podczas wstępnych prób z ujemnym pochyleniem stwierdzono jednak, że interakcja trzpienia z wewnętrzną powierzchnią pierścienia prowadzi do jego unoszenia i wypychania ku górze, co zaburza strefę kontaktu z walcem głównym, destabilizuje proces i generuje realne ryzyko kolizji z walcami stożkowymi oraz uszkodzenia narzędzi. Z przyczyn bezpieczeństwa odstąpiono zatem od kontynuowania eksperymentów w zakresie kątów ujemnych, przy czym należy podkreślić, że tego typu ustawienie mogłoby okazać się właściwe dla pierścieni o profilu złożonym, gdzie asymetria przekroju sprzyja stabilizacji materiału.

8.2. Badania kształtowania pierścienia z trzpieniem wahliwym podczas walcowania

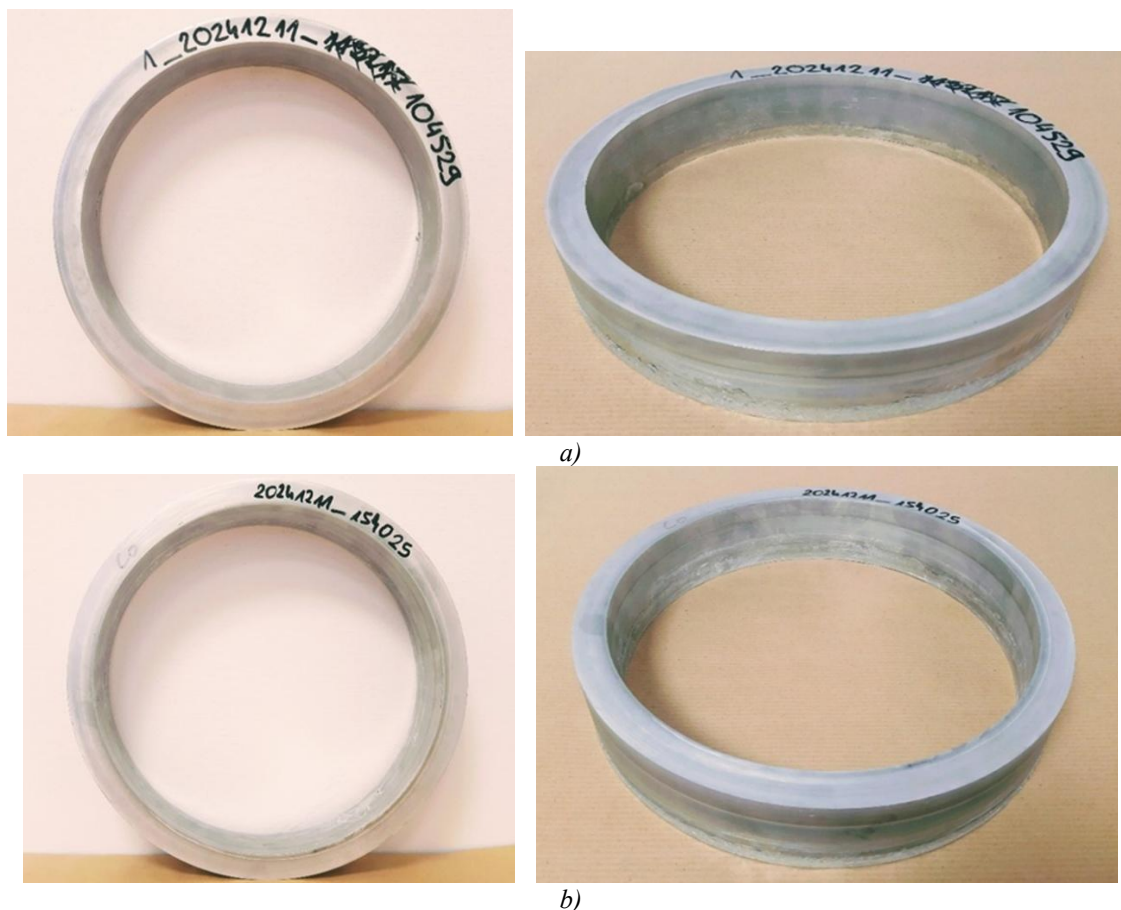
W celu uzupełnienia programu badawczego i pozyskania danych porównawczych wprowadzono dodatkowo tryb pracy trzpienia z ruchem wahliwym w dwóch zakresach amplitudy: $\pm 1^\circ$ oraz $\pm 3^\circ$. Oznacza to, że w przebiegu pełnego obrotu wału wirtualnego następuje ruch naprzemienny napędu górnego i dolnego trzpienia, który w ten sposób naprzemiennie naciska na kształtowany pierścień powodując stałe zmiany w rozkładzie sił kształtowania.

Materiałem wsadowym tak jak we wcześniejszych badaniach był stop aluminium 6082 o średnicy $\varnothing 140$ mm, otworze o średnicy $\varnothing 60$ mm i wysokości 50 mm. Temperatura pierścienia wsadowego 480°C . Dla procesu przyjęto:

- prędkość obrotowa walca głównego 38,2 mm/obr.;

- gniot 0,4 mm/1 obr ;
- czas procesu kształtowania 70 s;
- redukcja wysokości 5 mm;
- okres wahania trzpienia w czasie trwania procesu kształtowania $\pm 1^\circ$ i $\pm 3^\circ$.

Na Rys. 48a i Rys. 48b przedstawiono przykładowe pierścienie otrzymane przez kształtowanie z trzpieniem w ruchu wahliwym, odpowiednio dla $\pm 1^\circ$ i $\pm 3^\circ$.



Rys. 48. Przykładowe pierścienie otrzymane przez kształtowanie z trzpieniem w ruchu wahliwym dla a) $\pm 1^\circ$ oraz b) $\pm 3^\circ$

Pierścienie otrzymane metodą kształtowania z trzpieniem poruszającym się ruchem wahliwym mają poprawną geometrię, a powierzchnia walcowa jest bez widocznych wad.

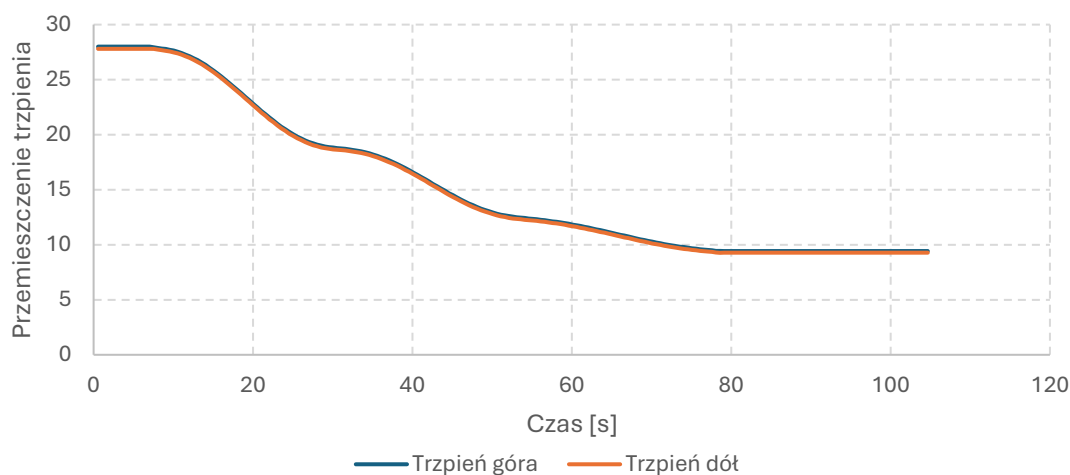
8.3. Analiza wyników badań doświadczalnych

W czasie badań procesu walcowania na walcach laboratoryjnej zebrano dane systemu sterującego, dzięki którym można porównać takie dane jak, zależności czasowe przemieszczenia trzpienia, zmiany średnic wewnętrznej i zewnętrznej pierścienia, a także momenty generowane na trzpieniu walca głównego, oraz walcach stożkowych. W dalszej

części będą rozważane dane tylko dla pierścieni o poprawnej geometrii (gniot 0,4 mm, redukcja wysokości 5 mm, czas odkształcania 70 s, kąt trzpienia 0°, 2° i 4°.

Analiza krzywych przemieszczenia trzpienia

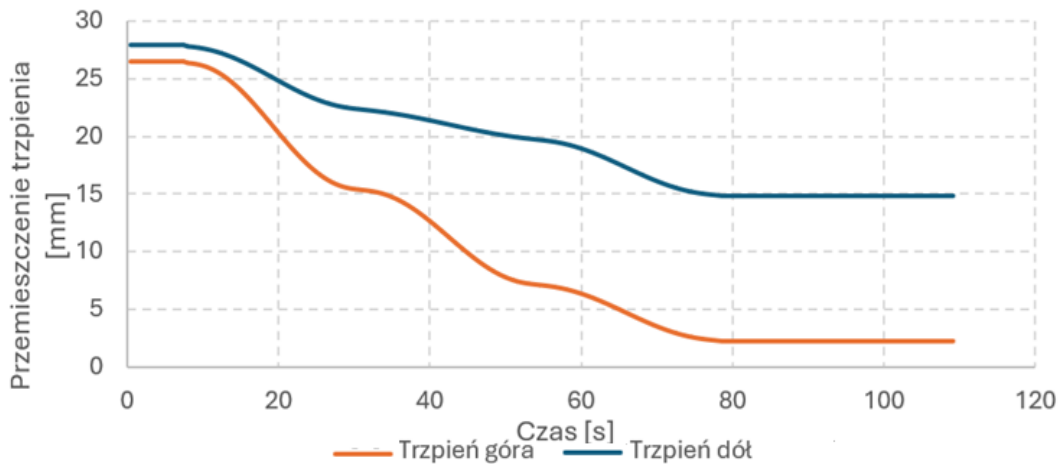
Na Rys. 49 ÷ Rys. 53 przedstawiono wykresy przemieszczenia trzpienia w czasie odpowiednio dla kątów 0°, 2° i 4° oraz trzpienia wahliwego $\pm 1^\circ$ i $\pm 3^\circ$.



Rys. 49. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla trzpienia pochylenia o kąt 0°

Wykres przemieszczenia dla górnej i dolnej części trzpienia przebiegają tak samo, co wynika z ustawienia trzpienia niepochyłonego - w pozycji pionowej - 0°. W trakcie procesu walcowania trzpień przemieścił się o około 18 mm w czasie 70 s potwierdzając przyjęte wytyczne dla trwania procesu. Początek wykresu ok 10 s to czas ,w którym narzędzia z umieszczonym wsadem pierścieniowym ustawiają się do pozycji startowej. Do ok. 80 s trwa proces kształtowania, po czym następuje zatrzymanie trzpienia i rozpoczyna się kalibracja pierścienia, która trwa ok. 20 s. W czasie kalibracji ukształtowany pierścień wykonuje dodatkowe obroty, które mają za zadanie skorygowanie średnicy, jeśli są jakieś odchylenie oraz eliminuje możliwość powstania wad powierzchniowych przy gwałtownym zakończeniu procesu kształtowania.

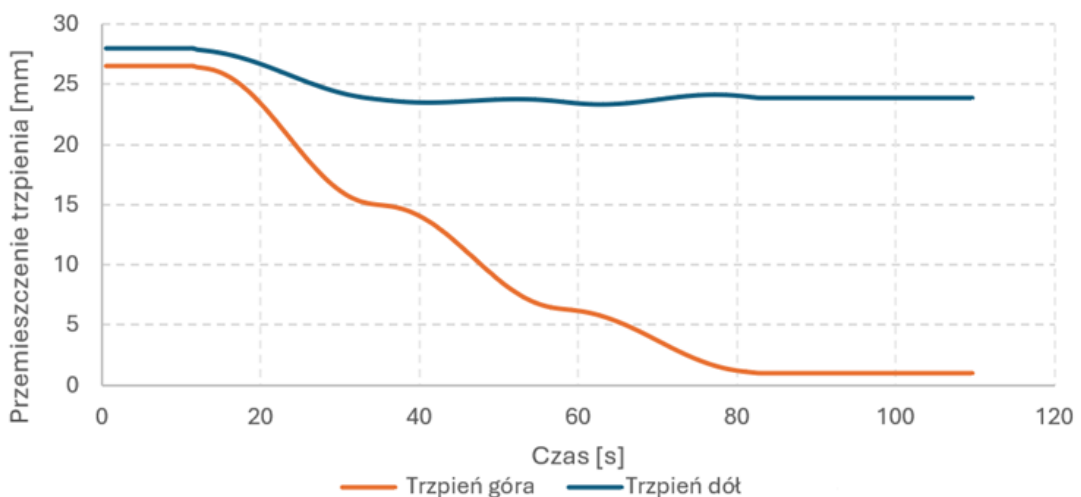
Na Rys. 50 przedstawiono przemieszczenie trzpienia w czasie dla kąta pochylenia 2°.



Rys. 50. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla kąta pochylenia 2°

W początkowym etapie procesu przemieszczenie górnej i dolnej części trzpienia jest podobne, to etap ustawienia narzędzi i trwa ok. 10 s. Następnie rozpoczyna się proces kształtowania trwający ok. 70 s, po którym jest 20 s proces kalibracji. Dolna belka, w której zamocowany jest trzpień kształtujący w trakcie procesu walcowania przemieszcza się o około 13 mm w czasie 70 s (linia niebieska), górne przemieszczenie trzpienia (linia pomarańczowa) jest większe w stosunku do dolnego (o 13 mm), aby w końcowym etapie osiągnąć zadany kąt 2°.

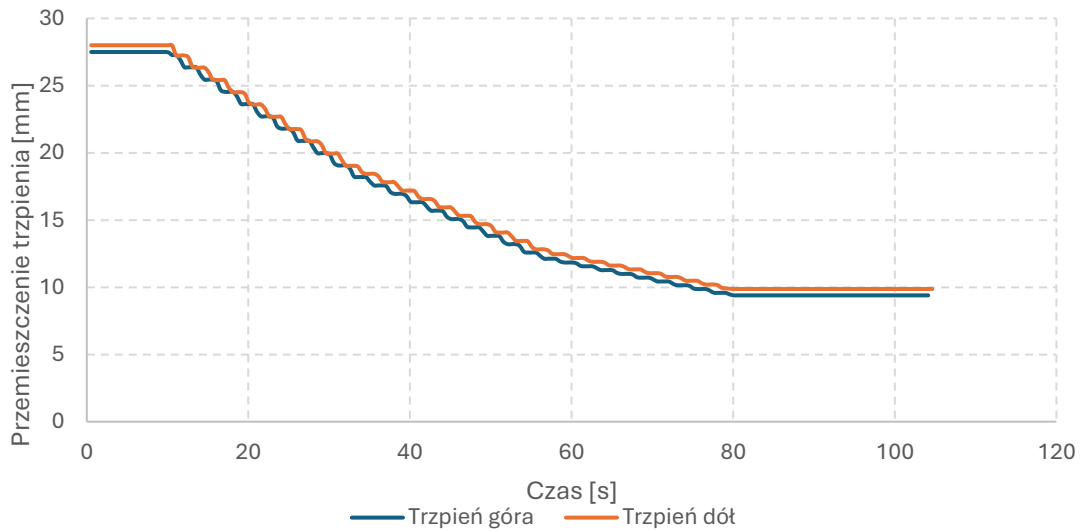
Rys. 51 przedstawia przemieszczenie trzpienia dla kąta pochylenia 4°.



Rys. 51. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla kąta pochylenia 4°

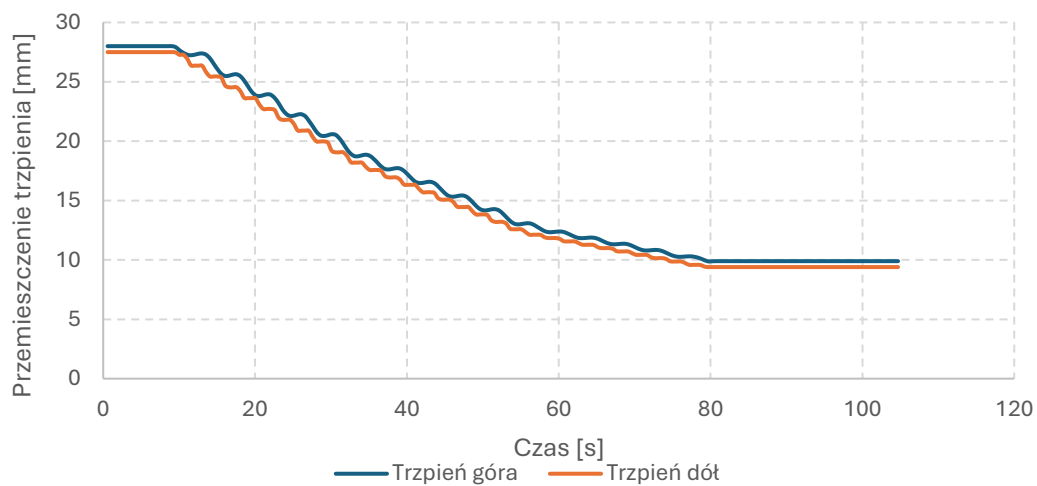
Przemieszczenie górnej części i dolnej części trzpienia przez pierwsze 10 s jest stałe, etap ustawienia się narzędzi. Kolejne 70 s to proces kształtowania, po którym jest 20 s kalibracji. Dolna belka, w której zamocowany jest trzpień kształtujący w trakcie procesu walcowania przemieszcza się o około 4 mm w czasie 70 s (linia niebieska),

natomiast górne przemieszczenie trzpienia (linia pomarańczowa) jest większe w stosunku do górnego (o 23 mm), aby w końcowym etapie osiągnąć zadany kąt 4° .



Rys. 52. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla wahliwego ruchu trzpienia o $\pm 1^\circ$

Na Rys. 52 przemieszczania się trzpienia dla wahliwego ruchu trzpienia o $\pm 1^\circ$, początkowe 10s jest to czas ustawienia narzędzi. Czas kształtowania wynosi 70 sekund oraz ok. 20 s pozostałego czasu, stanowi kalibrację kształtu pierścienia. Wykresy przemieszczenia się górnej i dolnej części trzpienia są równoległe i charakteryzują się „schodkowym” przebiegiem, który obrazuje wahliwy ruch trzpienia o $\pm 1^\circ$ podczas procesu.



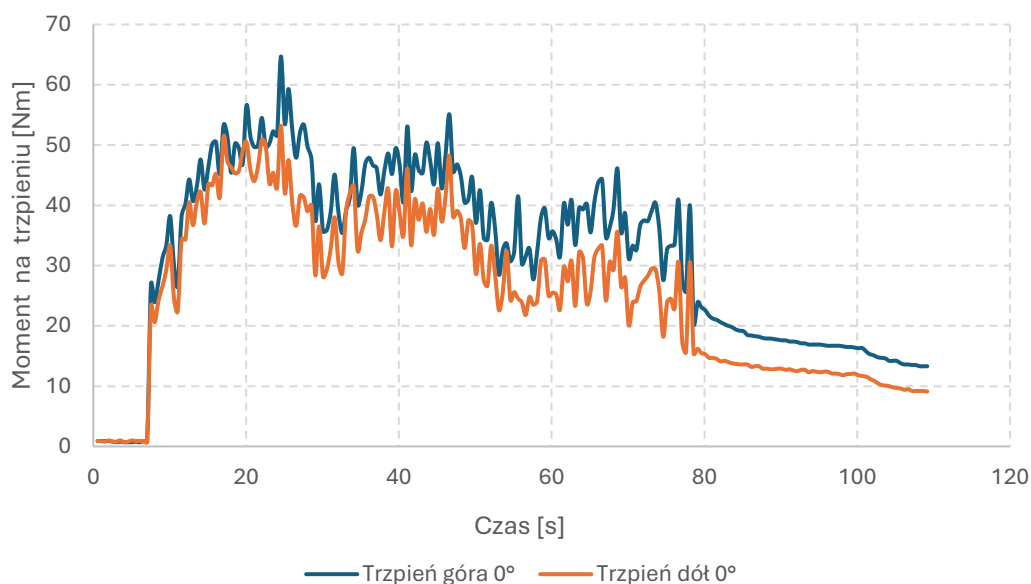
Rys. 53. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla wahliwego ruchu trzpienia o $\pm 3^\circ$

Przebieg przemieszczania się trzpienia ruchem wahliwym o $\pm 3^\circ$ jest podobny do poprzedniego wykresu (Rys. 53). Występuje etap ustawienia narzędzi (10s),

kształtowania (70s) oraz kalibracji pierścienia (ok. 20s). Wykres jest charakterystyczny dla ruchu wahliwego o „schodkowym” przebiegu, ale z okresem ruchu trzpienia co 3° .

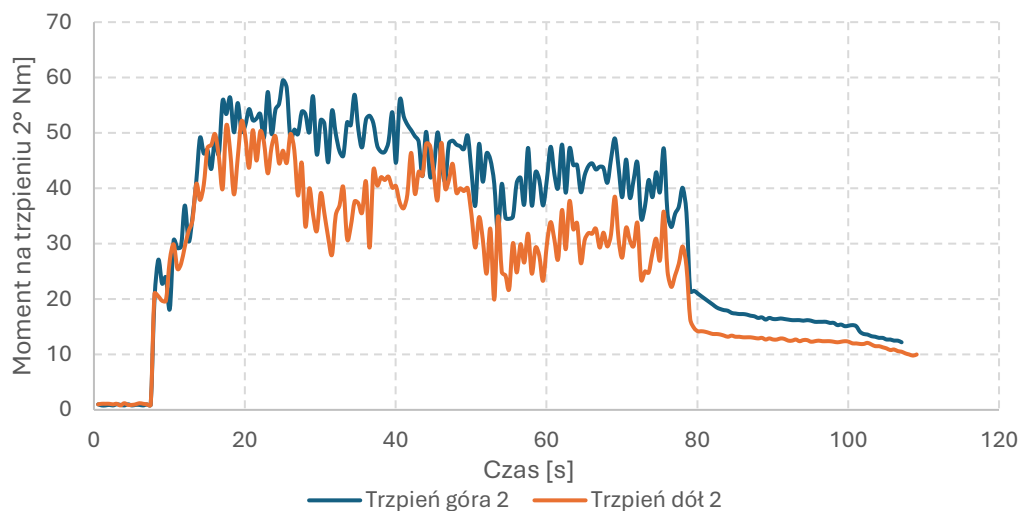
Analiza wykresów rozkładu momentów na trzpieniu

Na Rys. 54 ÷ Rys. 58 przedstawiono krzywe zmian momentu na trzpieniu odpowiednio dla kąta pochylenia 0° , 2° i 4° oraz ruchu wahliwego 1° i 3° .



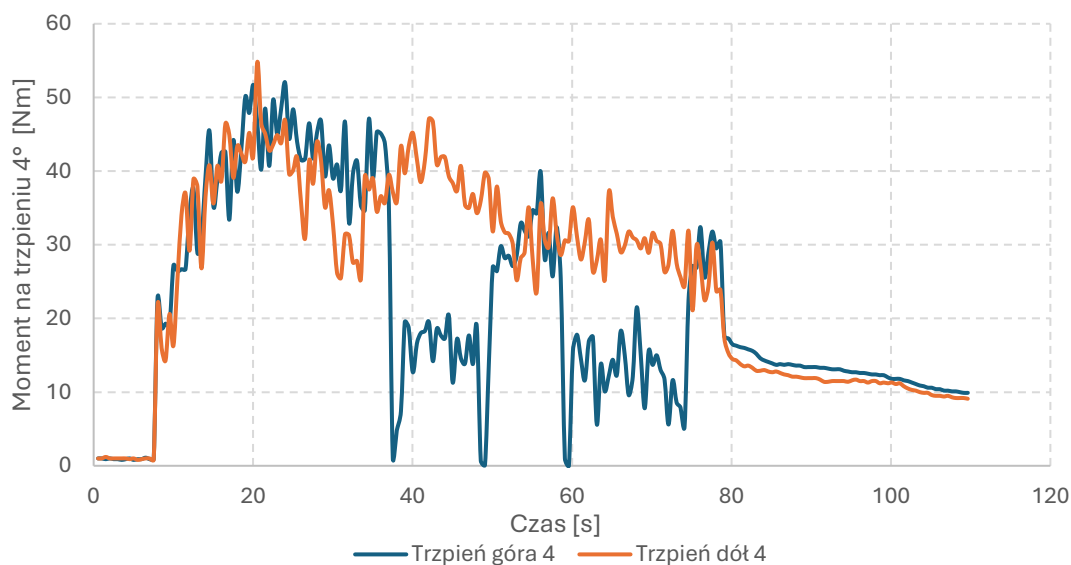
Rys. 54. Wykres zmiany momentu na trzpieniu (pochylenie 0°) w czasie

Wykres zmiany momentu na trzpieniu w czasie (Rys. 54) dla obu krzywych wskazuje równoległy przebieg obciążenia napędu górnej i dolnej części trzpienia, jaki występuje przy jego stałym pionowym ustawieniu. W początkowym zakresie odkształcania następuje wzrost momentu do wartości maksymalnej 64,7 Nm (trwa to ok. 15s), następnie w fazie intensywnego odkształcania (25–80s), następuje jego spadek spowodowany zmniejszeniem powierzchni kontaktu trzpienia z materiałem w wyniku redukcji wysokości pierścienia. Wartości momentu dla obu części trzpienia są różne – górna część trzpienia ma wyższą wartość o około 5-10 Nm.



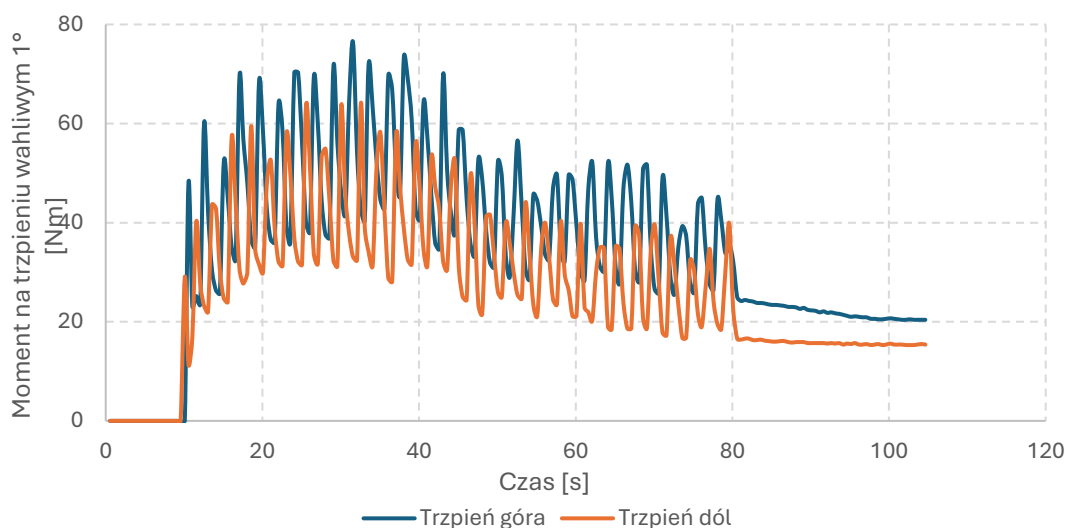
Rys. 55. Wykres zmiany momentu na trzpieniu (pochylenie 2°) w czasie

Rys. 555 przedstawia wykres zmian momentu dla trzpienia pochylonego o kąt 2°. Krzywa niebieska (górze trzpienia) i pomarańczowa (dół trzpienia) mają podobny kształt, występuje szybkiego wzrostu po kontakcie trzpienia z materiałem (8–18 s). Potem jest faza intensywnego kształtowania (18-80 s) dla krzywej niebieskiej (górze trzpienia) przebieg ustalony z oscylacjami i tendencją spadkową. Natomiast dla krzywej pomarańczowej (dół trzpienia) na krzywej widać powtarzające się spadki i wzrosty, które wynikają z stopniowej redukcji wysokości pierścienia (mniejszy kontakt trzpienia kształtującego z materiałem), z wyraźnymi oscylacjami. Na końcu szybki spadek momentu po zakończeniu walcowania (ok. 80 s). Maksymalna wartość momentu dla krzywej niebieskiej wynosi 59,5 Nm w 25 s procesu oraz dla krzywej pomarańczowej 52,1 Nm w 19 s. Różnica wartości momentu góra – dół trzpienia wynika z asymetrycznego obciążenia, kontaktu wywołanego pochyleniem 2°.



Rys. 56. Wykres zmiany momentu na trzpieniu (pochylenie 4°) w czasie

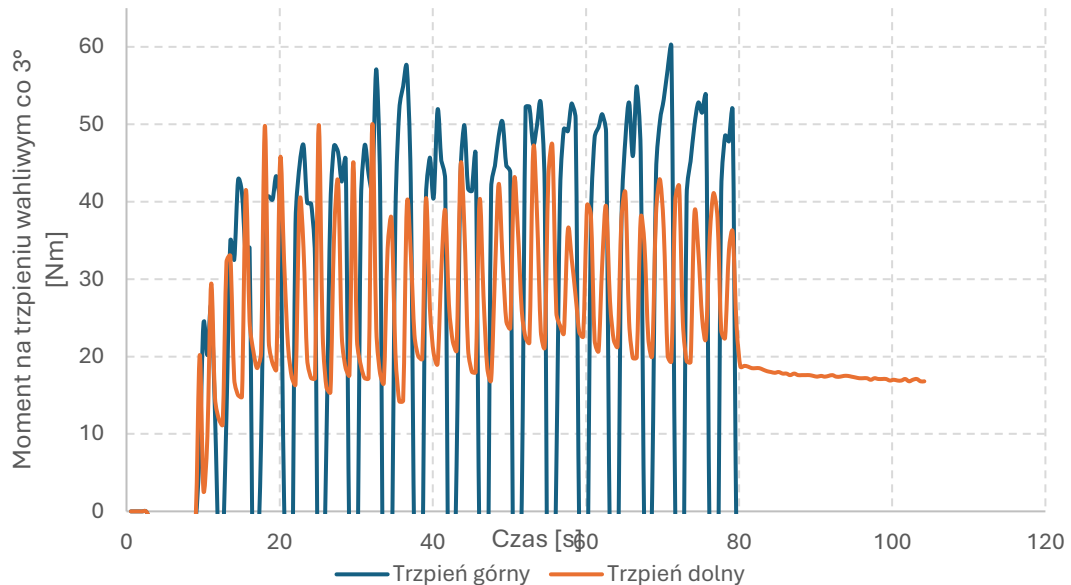
Na Rys. 56 przedstawiono krzywe zmiany momentu na trzpieniu dla kąta pochylenia 4° . Początkowo (do ok. 25 s) oba przebiegi momentu dla górnej i dolnej części trzpienia mają podobny charakter jak dla pochylenia 0° oraz 2° i osiągają maksymalną wartość momentu ok. 54,8 Nm w ok. 20 s po czym zaczyna się trend spadkowy. Po 35 s moment dla górnej części trzpienia gwałtownie spada i staje się niestabilny (występują duże wahania momentu, chwilami nawet spadki do wartości zerowej świadczącej o braku kontaktu między trzpieniem a odkształcanym materiałem), podczas gdy moment dla dolnej części trzpienia utrzymuje w miarę ciągły przebieg. Koniec procesu występuje po ok. 80 s wówczas obie krzywe spadają i ponownie mają zbliżone wartości. Różnica momentu między górną i dolną częścią trzpienia wynika z faktu, że materiał jest głównie odkształcany przez dolną część trzpienia.



Rys. 57. Wykres zmiany momentu na trzpieniu – ruch wahliwy $\pm 1^\circ$ w czasie

Na Rys. 57 przedstawiono zmianę momentu na trzpieniu dla ruchu wahliwego $\pm 1^\circ$ w czasie, gdzie w fazie początkowej (0–10 s) moment na trzpieniu jest bliski zeru, co odpowiada fazie ustawienia narzędzi. Po 10 s następuje szybki wzrost wartości momentu w wyniku kontaktu trzpienia z materiałem. W fazie kształtowania (ok. 10–75s) moment dla górnej i dolnej części trzpienia utrzymuje się na podwyższonym poziomie (maksymalnie góra trzpienia 76,4 Nm, dół 63,6 Nm), z wyraźnymi cyklicznymi wahaniami. Zmienność momentu wynika z ruchu wahliwego trzpienia o 1° , który powoduje okresowe zmiany warunków kontaktu w strefie odkształcania. Moment na trzpieniu górnym osiąga wyższe wartości o ok. 10 Nm, niż na trzpieniu dolnym. Wraz z końcem procesu walcowania (ok. 75–110 s) moment stopniowo maleje, co wskazuje na

zmniejszenie kontaktu między trzpieniem a materiałem. Charakter krzywej wskazuje na stabilny i powtarzalny przebieg procesu po osiągnięciu stanu ustalonego.

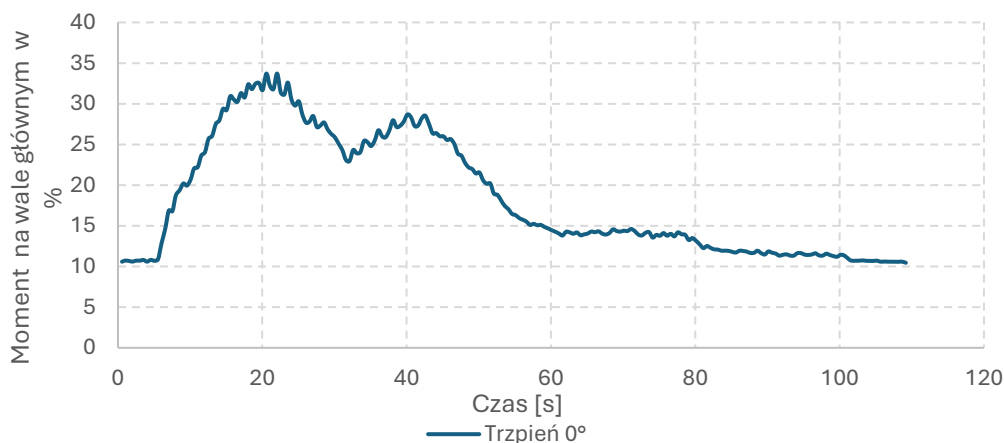


Rys. 58. Wykres zmiany momentu na trzpieniu – ruch wahliwy $\pm 3^\circ$ w czasie

Podobnie jak we wcześniej opisywanych krzywych na Rys. 58 w początkowej fazie (0–10s) moment jest mały – trzpień nie znajduje się jeszcze w pełnym kontakcie z pierścieniem. Po około 10 s następuje szybki wzrost momentu, co oznacza początek właściwego odkształcania materiału. W fazie kształtowania z ruchem wahliwym trzpienia co 3° (10–80 s) obserwuje się cykliczne, silne wahania momentu. Trzpień górny wykazuje większą amplitudę momentu (spadek od 50 Nm do 0), natomiast trzpień dolny utrzymuje się głównie w zakresie dodatnim (ok. 20–40 Nm). Zmienność momentu jest wynikiem okresowego odchyłania trzpienia, które powoduje naprzemienne zwiększanie i zmniejszanie ramienia działania siły w strefie kontaktu. Większa amplituda momentu zarejestrowanego w górnej części trzpienia, wynika również z zmniejszającego się kontaktu w dolnej części trzpienia z materiałem (dłuższe ramię działania siły).

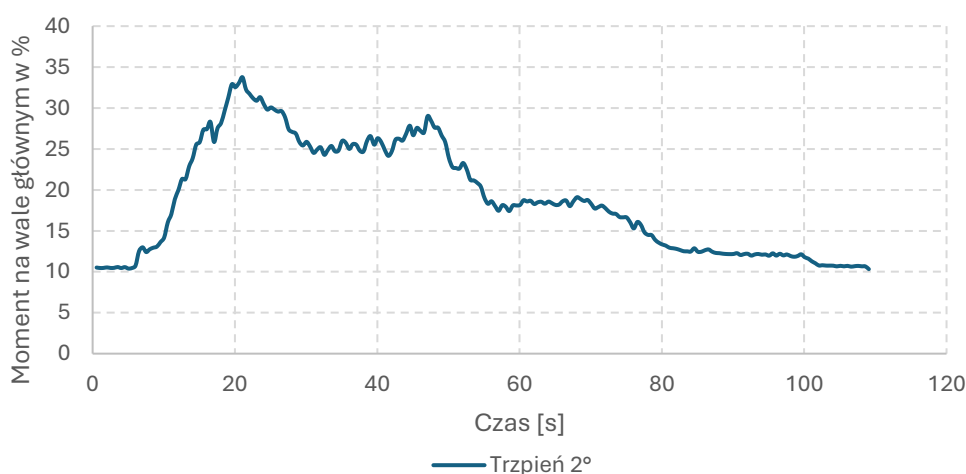
Analiza przebiegu krzywych obciążenia momentem wału głównego.

Na Rys. 59 ÷ Rys. 63 przedstawiono odpowiednio wykresy dla pierścieni z kątem 0° , 2° i 4° oraz ruchu wahliwego $\pm 1^\circ$, $\pm 3^\circ$.



Rys. 59. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % (dla trzpienia niepochyłonego)

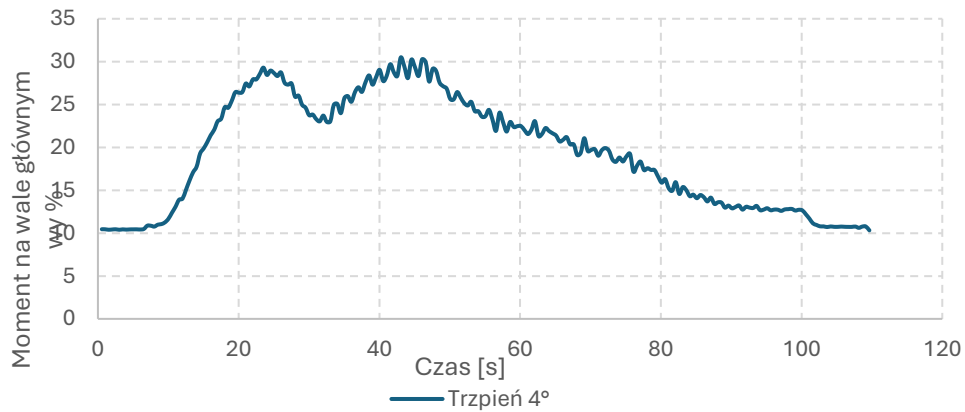
Na wykresie zmiany momentu na wale głównym dla trzpienia niepochyłonego (Rys. 59) obciążenia momentem na wale głównym, można zauważyć podobnie do wykresu zmiany momentu trzpienia, że moment rośnie wraz z przemieszczeniem się trzpienia. Osiąga najwyższą wartość 33 % w ok. 20 s, po czym maleje (22 %) i znowu rośnie (28 %). Ponowny wzrost wartości wynika z intensywnej redukcji wysokości kształtowanego pierścienia. Następnie ulega obniżeniu do 13% w wyniku zmniejszenia powierzchni kontaktu (zmiany wysokości pierścienia). Dla pierścienia bez redukcji wysokości nie obserwowano tego spadku, gdyż nie zmieniała się powierzchnia kontaktu walca z odkształcanym materiałem. Wahania momentu w strefie maksymalnych obciążeń są niewielkie, co świadczy o równomiernym rozkładzie sił w układzie narzędzi. Zanik obciążenia po zakończeniu procesu następuje płynnie, z powrotem do wartości resztkowych odpowiadających tarcia w układzie.



Rys. 60. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia pochyłonego o 2°

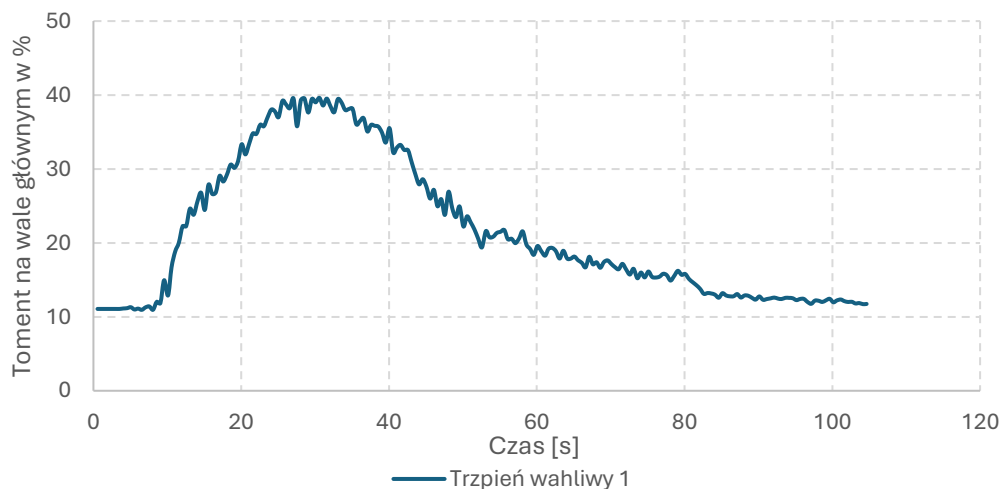
Przebieg momentu dla trzpienia pochyłonego o 2° (Rys. 60) na wale głównym charakteryzuje się łagodnym narastaniem, osiągnięciem wartości maksymalnej na

poziomie około 32% momentu, po czym zaczyna maleć do 12 % w wyniku zmniejszenia powierzchni kontaktu (zmiany wysokości pierścienia). Wahania momentu w strefie maksymalnych obciążeń są niewielkie, co świadczy o równomiernym rozkładzie sił w układzie narzędzi. Brak wyraźnych skoków wartości momentu wskazuje, że asymetryczny rozkład nacisków może stabilizować rozkład sił w procesie. Na zakończenie procesu następuje płynne obniżenie momentu do wartości początkowych.



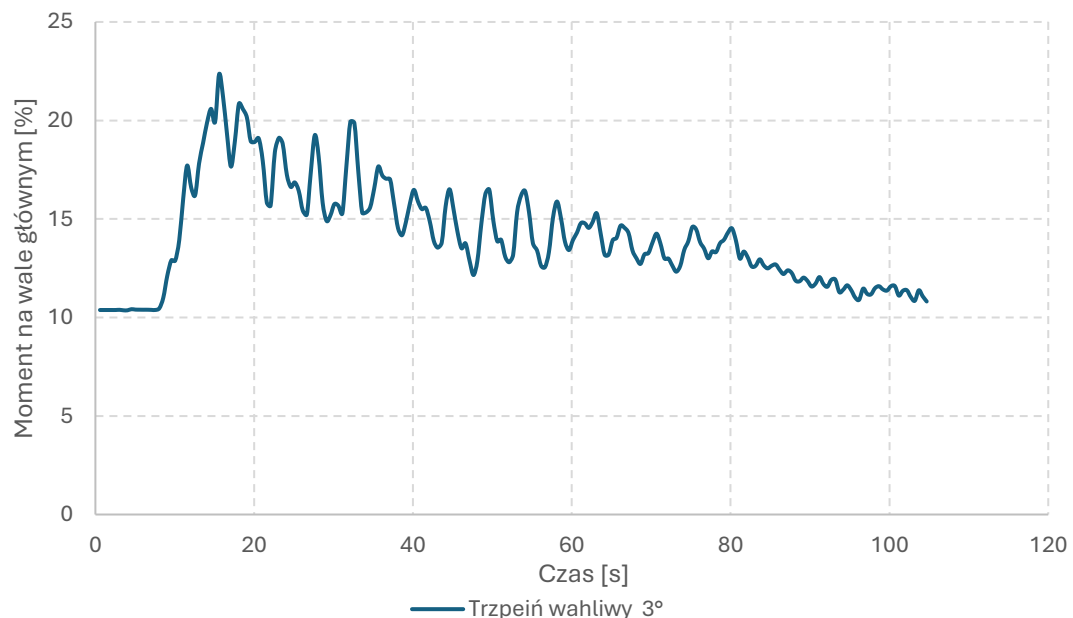
Rys. 61. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia pochyłego o 4°

Przy większym kącie pochylenia trzpienia (4°) wartość maksymalna momentu (Rys. 61) wynosi ok. 30% i jest zbliżona do wariantu z trzpieniem z kątem pochylenia 0° , tu jednak przebieg obciążenia cechuje się znacznie większą niestabilnością w fazie roboczej. Obserwowane oscylacje momentu świadczą o dominacji jednej strefy kontaktu trzpienia z materiałem i cyklicznym odciążaniu przeciwnej strony. Taki stan pracy zwiększa nierównomierność procesu oraz ryzyko lokalnych przeciążeń w układzie narzędzi.



Rys. 62. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia wahliwego $\pm 1^\circ$

Na wykresie (Rys. 62) przedstawiono zmianę momentu na wale głównym w funkcji czasu podczas walcowania pierścienia z zastosowaniem trzpienia wahliwego $\pm 1^\circ$. W początkowej fazie procesu moment utrzymuje się na niskim poziomie, co odpowiada etapowi nawiązywania kontaktu narzędzi z materiałem. Następnie obserwuje się jego wyraźny wzrost, osiągający maksymalne wartości w zakresie 35–40%, co jest wynikiem intensywnego odkształcania materiału oraz redukcji wysokości pierścienia w trakcie procesu. W trakcie procesu moment stopniowo maleje, co związane jest ze zmniejszeniem strefy kontaktu odkształcanego materiału z walcem. Końcowa stabilizacja momentu na poziomie około 10% wskazuje na zakończenie etapu kształtowania i koniec intensywnego oddziaływania narzędzi na materiał, co potwierdza prawidłowy i stabilny przebieg procesu walcowania z ruchem wahliwym $\pm 1^\circ$.



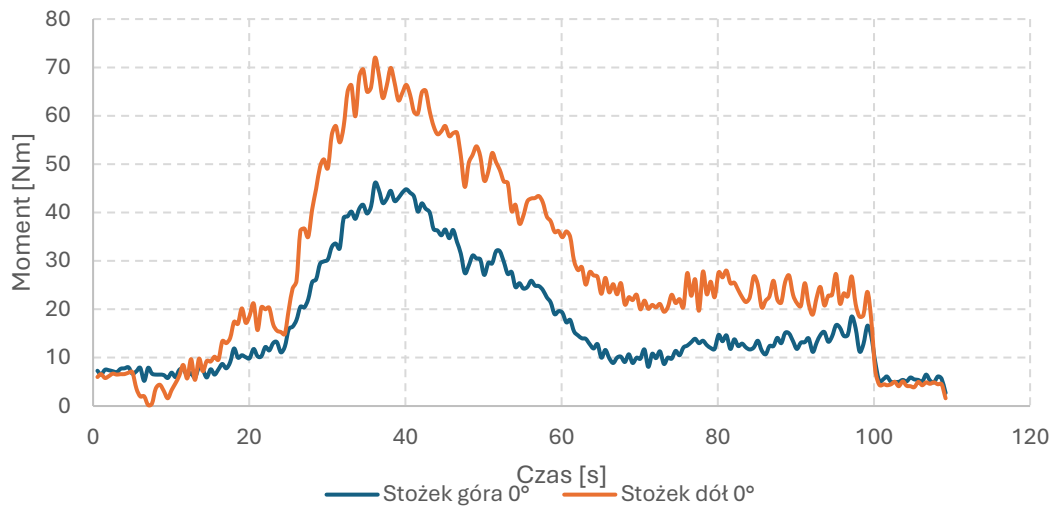
Rys. 63. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia wahliwego $\pm 3^\circ$

Wykres na Rys. 63 przedstawia zmiany momentu na wale głównym z zastosowaniem trzpienia wahliwego $\pm 3^\circ$. Przebieg krzywej wskazuje, że początkowa faza procesu charakteryzuje się szybkim wzrostem momentu, który po około 20 sekundach osiąga wartość maksymalną rzędu 22%. W dalszej części procesu obserwuje się wyraźne oscylacje wartości momentu, utrzymujące się z zauważalną regularnością, aż do końcowej fazy walcowania. Wahania te są wynikiem okresowych zmian kontaktu pomiędzy narzędziami a odkształcanym pierścieniem, co jest bezpośrednią konsekwencją cyklicznego wychylenia trzpienia wahliwego. Średnia wartość momentu po osiągnięciu maksimum ulega stopniowemu obniżeniu, stabilizując się w przedziale 10–12% w

końcowym etapie procesu. Charakterystyczny falisty przebieg momentu jest cechą typową dla procesu z trzpieniem wahlwym i potwierdza jego dynamiczny wpływ na kształtowanie pierścienia.

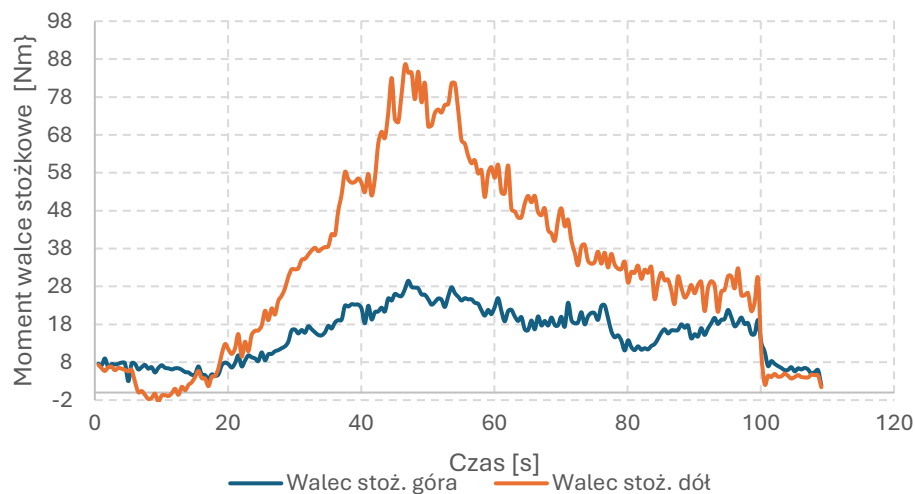
Analiza krzywych momentów na walcach stożkowych.

Wykresy przebiegu momentów na walcach stożkowych przedstawiono na Rys. 64 ÷ Rys. 66 odpowiednio dla procesu kształtowania z trzpieniem pod kątem 0° , 2° , 4° .



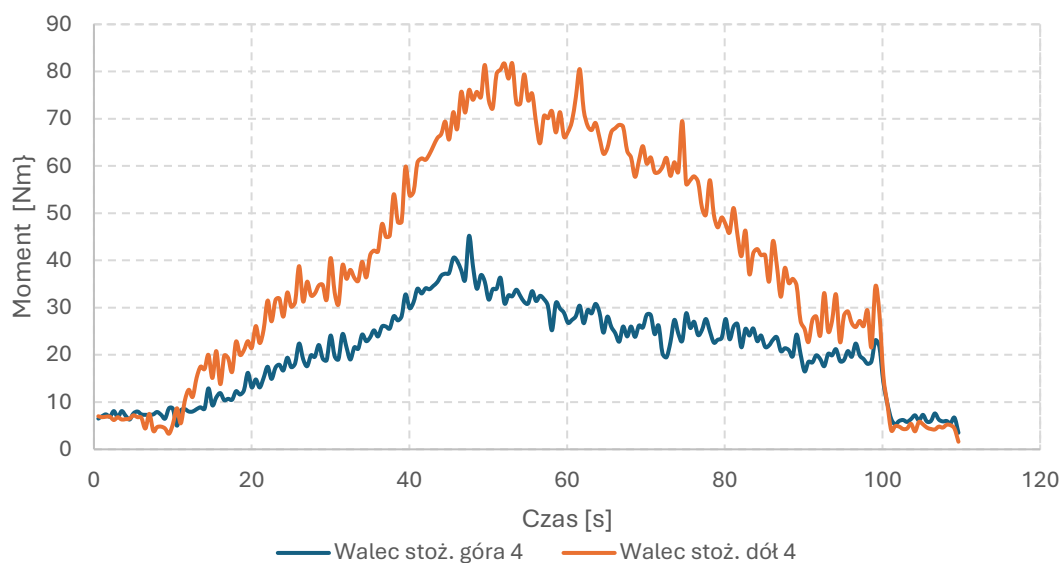
Rys. 64. Wykres momentu na walcach stożkowych dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 0°

Moment dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 0° (Rys. 64) na walcu dolnym osiąga znacznie wyższe wartości maksymalne (ok. 70 Nm), niż na walcu górnym (ok. 45 Nm), co może być spowodowane niższą temperaturą części dolnej pierścienia, w wyniku odprowadzania ciepła przez stół walcarki. Po zakończeniu procesu momenty dla obu walców wracają do początkowych wartości resztkowych.



Rys. 65. Wykres momentu na walcach stożkowych dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 2°

Dla kąta pochylenia trzpienia 2° dysproporcja między wartością momentu walca górnego i dolnego dodatkowo się powiększa (Rys. 65) – dolny walec osiąga wartości nawet powyżej 80 Nm, podczas gdy górny utrzymuje się na poziomie ok. 20 Nm, co może być spowodowane niższą temperaturą części dolnej pierścienia, w wyniku odprowadzania ciepła przez stół walcarki. Przebieg momentu dolnego walca jest wyraźnie niestabilny, z licznymi pikami, co odzwierciedla nierównomierny kontakt z materiałem. Górny walec pełni w tej konfiguracji bardziej funkcję stabilizującą, przejmując mniejszą część obciążenia.



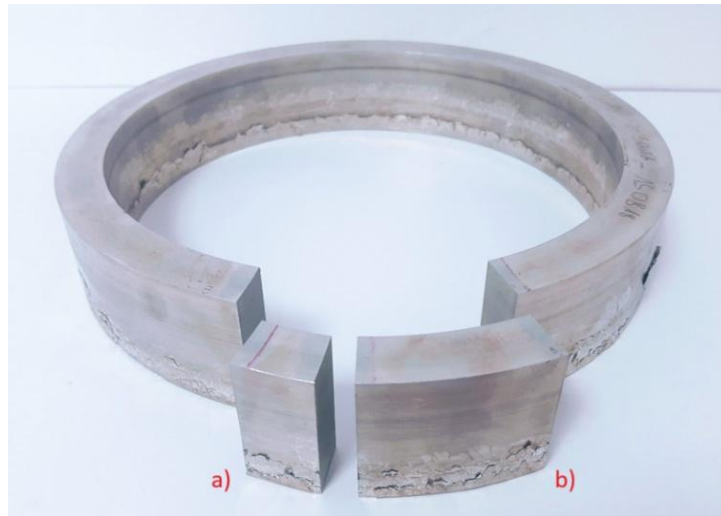
Rys. 66. Wykres momentu na walcach stożkowych dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 4°

Przy większym pochyleniu trzpienia 4° (Rys. 66) widać nadal przewagę momentu dolnego walca (ok. 80 Nm), co może być spowodowane niższą temperaturą części dolnej pierścienia, w wyniku odprowadzania ciepła przez stół walcarki. Jednocześnie krzywa górnego walca jest wyraźnie bardziej podniesiona (nawet do 35–40 Nm). Oznacza to, że większy kąt pochylenia zmienia rozkład obciążeń – górny walec zaczyna aktywniej uczestniczyć w przenoszeniu momentu. Niemniej jednak przebiegi obu walców są obciążone licznymi oscylacjami, co wskazuje na wzrost niestabilności procesu przy tak dużym odchyleniu trzpienia.

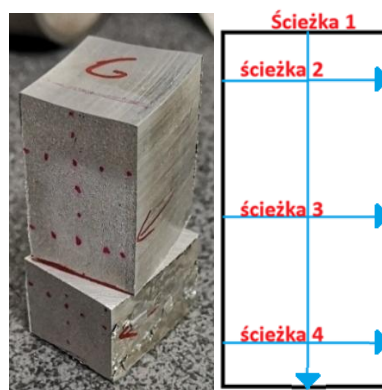
8.4. Pomiary twardości

Badania rozkładu twardości wykonano metodą Vickersa dla przykładowego pierścienia wykonanego dla różnych ustawień trzpienia (kąt pochylenia 0° , 2° i 4°). Z pierścieni wycięto próbki, jak pokazano na Rys. 67, kierunek i ścieżki pomiarów

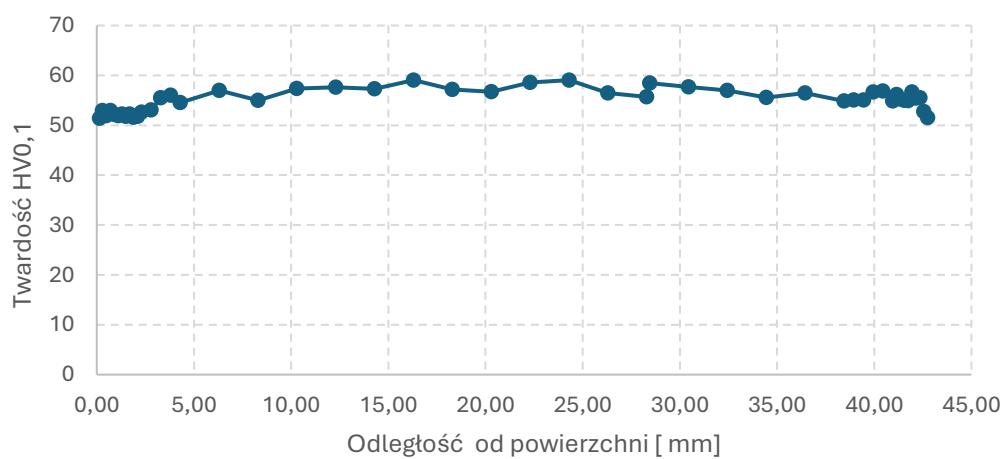
pokazano na Rys. 68. Na Rys. 69 i Rys. 70 przedstawiono wyniki pomiarów HV 0,5 dla pierścienia wykonanego w technologii trzpienia niepochlonego.



Rys. 67. Wycięte próbki do realizacji: a) pomiarów twardości, b) badań mikrostruktury

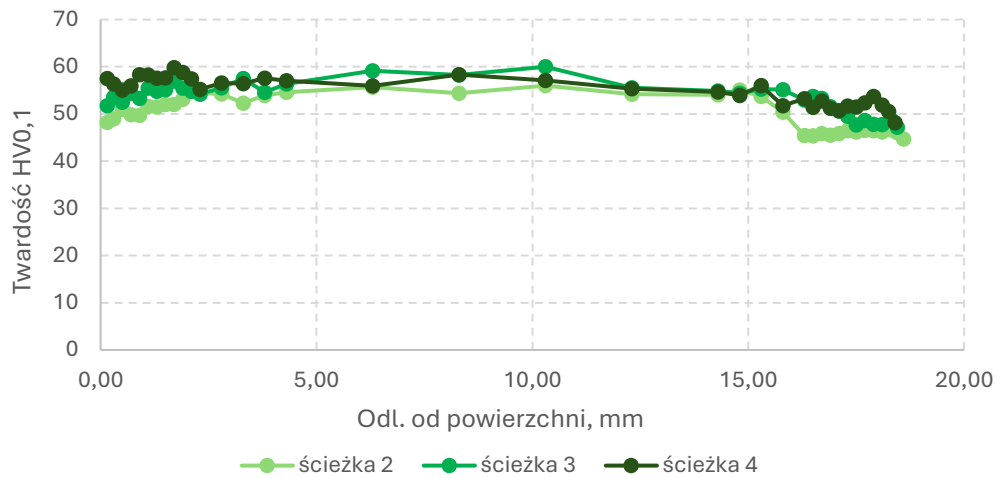


Rys. 68. Próbka z zaznaczonymi ścieżkami i kierunkiem pomiaru twardości



Rys. 69. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia przez całą wysokość próbki ścieżka 1 – trzpień o kącie pochylecia 0°

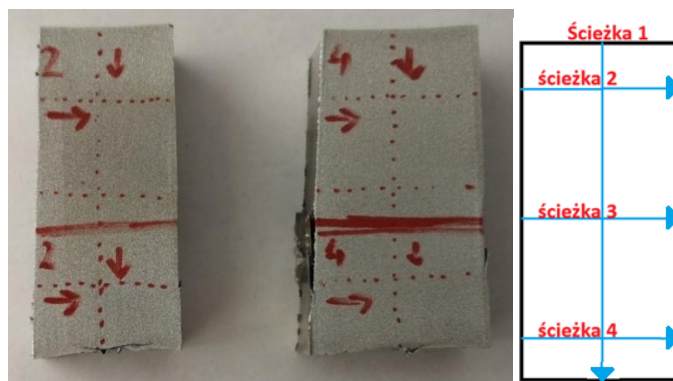
Pomiar rozkładu twardości dla trzpienia o kącie pochylenia 0° wykonany przez środek pierścienia według ścieżki 1 przez całą wysokość, jest równomierny, jedyne większe odchylenia widać na brzegach próbki.



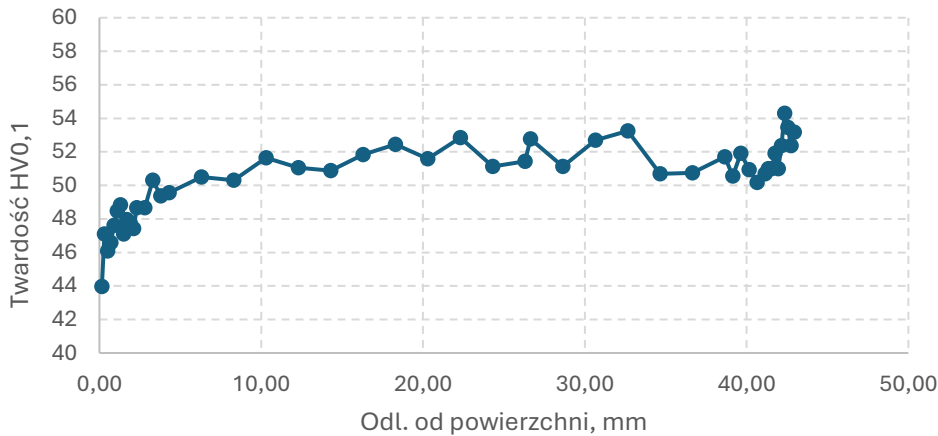
Rys. 70. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia przez szerokość według ścieżki 2, 3 i 4 - trzpień o kącie pochylenia 0°

Pomiar rozkładu twardości dla pobranej próbki pokazuje, że dla ścieżki 2, 3, 4 są podobne trendy: twardość rośnie od powierzchni od strony trzpienia (około 55HV0,1), stabilizuje się w środkowym zakresie (około 60 HV0,1), a następnie spada w miejscu kontaktu z wałcem głównym (około 50HV0,1). Centralna część próbki (4–14 mm) ma najbardziej jednorodną i umiarkowanie wysoką twardość, jest to strefa najbardziej stabilna sugerując efektywną warstwę użytkową. Niższe twardości przy powierzchni mogą wskazywać na przeciążenie cieplne (np. szybkie wychłodzenie powierzchni przy kontakcie z chłodniejszymi wałcami albo/ oraz wolne chłodzenie rdzenia), które nie pozwoliło na równomierne wykształcenie mikrostruktury.

Również dla pierścieni wykonanych w technologii trzpienia wychylnego wykonano pomiary rozkładu twardości, zgodnie z przedstawionymi na Rys. 71 ścieżkami pomiaru.

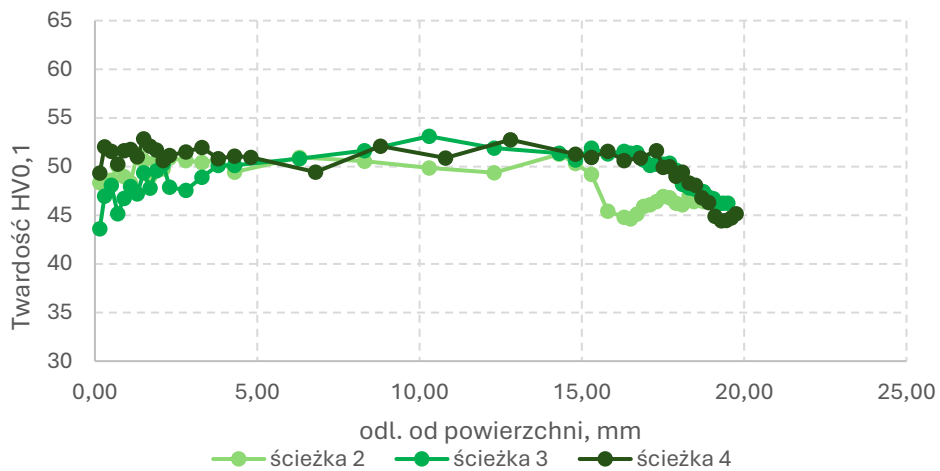


Rys. 71. Próbki z zaznaczonymi ścieżkami i kierunkiem pomiaru twardości



Rys. 72. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia przez całą wysokość według ścieżki 1 trzpień pochylony o kąt 2°

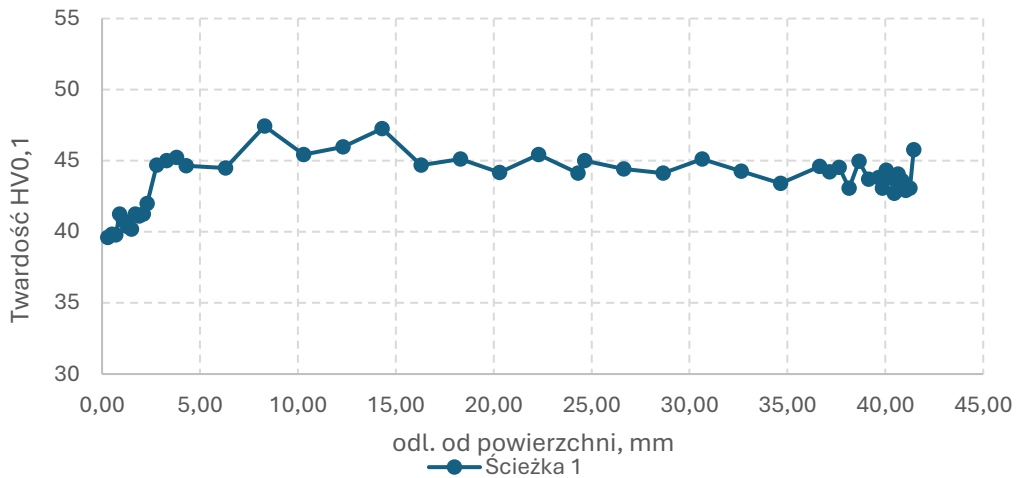
Pomiar rozkładu twardości dla trzpienia pochylony o kąt 2° wykonany przez środek pierścienia według ścieżki 1 przez całą wysokość, jest bardzo zastanawiający, gdyż rośnie od góry - powierzchni próbki (około 45HV 0,1) do dolnej powierzchni (około 52HV 0,1). Może to być w tym przypadku spowodowane np. dłuższym pozostawieniem próbki na walcu.



Rys. 73. Rozkład twardości próbki wykonany na przekroju pierścienia przez szerokość pasma według ścieżki 2, 3 i 4 - trzpień wychylony o kąt 2°

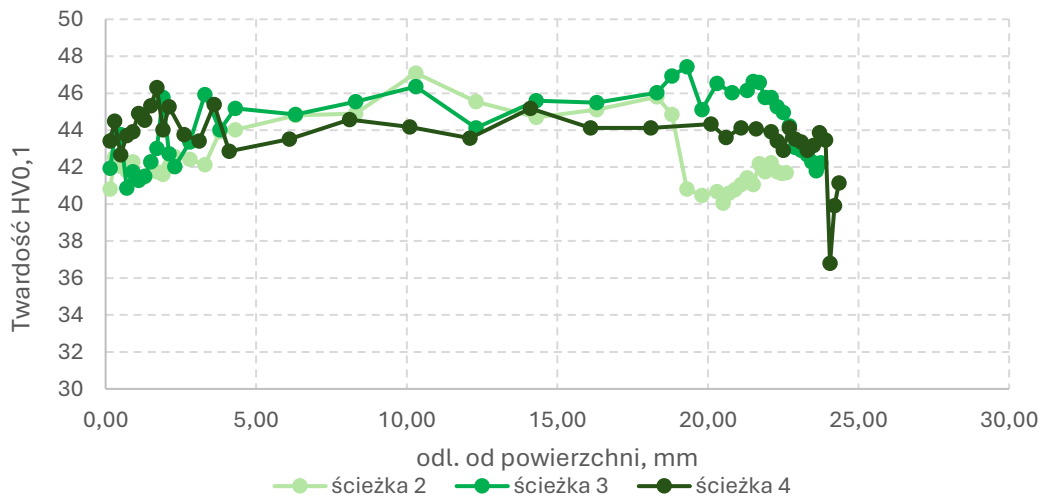
Pomiar rozkładu twardości wykonany na różnych wysokościach przez grubość pierścienia pokazuje niższe wartości niż w przypadku pierścienia kształtowanego trzpieniem o kącie pochylenia 0°. Jednocześnie ścieżki pomiarów 2, 3, 4 wykazują podobny trend: twardość rośnie w początkowej odległości od powierzchni kontaktu z trzpieniem (strona lewa wykresu), stabilizuje się w środkowym zakresie, a następnie zaczyna spadać w odległości 16–18 mm od miejsca kontaktu z walcem głównym.

Centralna część próbki (4–14 mm) ma najbardziej jednorodną i umiarkowanie wysoką twardość.



Rys. 74. Rozkład twardości próbki wykonany na przekroju pierścienia przez całą wysokość według ścieżki 1 - trzpień wychylony o kąt 4°

Pomiar rozkładu twardości dla trzpienia o kącie pochylenia 4° wykonany przez środek pierścienia według ścieżki 1 przez całą wysokość, jest równomierny, jedyne większe odchylenia widać na brzegach próbki.

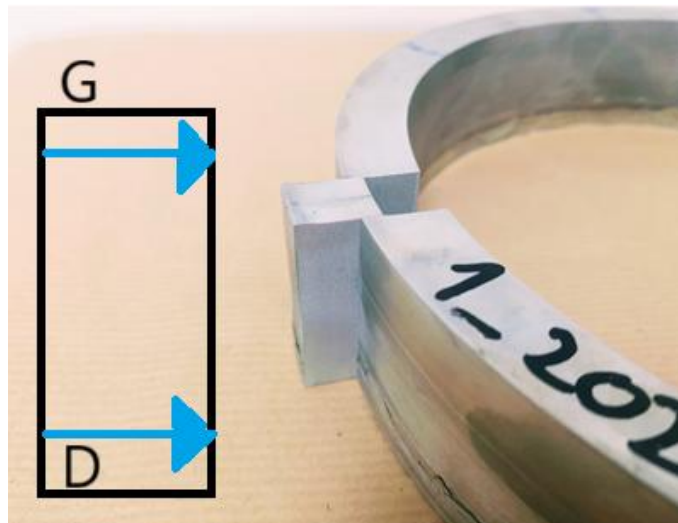


Rys. 75. Rozkład twardości próbki wykonany na przekroju pierścienia przez szerokość pasma według ścieżki 2, 3 i 4 trzpień wychylony o kąt 4°

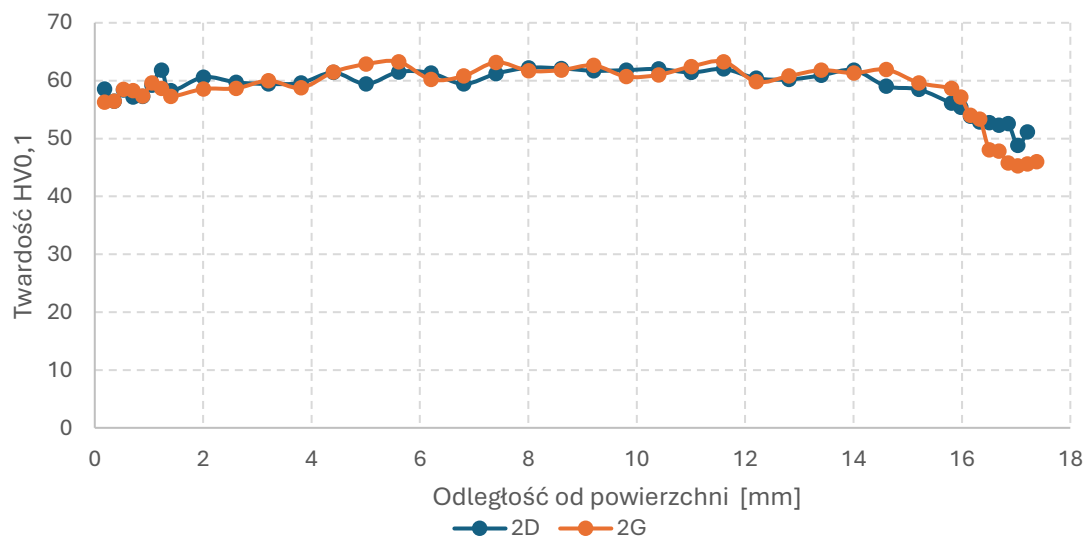
Pomiar rozkładu twardości wykonany na różnych wysokościach przez grubość pierścienia pokazuje wartości najniższe ze wszystkich próbek. Wynika to z faktu, jak wykazały późniejsze badania mikrostrukturalne, że proces rekrytalizacji zaszedł w większej objętości materiału niż dla pozostałych pierścieni. Podobnie jak w wcześniejszych próbkach ścieżki pomiarów 2, 3, 4 wykazują podobny trend: twardość

rośnie w początkowych milimetrach od powierzchni, stabilizuje się w środkowym zakresie, a następnie spada w okolicach 18–25 mm (w miejscu kontaktu z walcem głównym). Centralna część próbki (4–18 mm) ma najbardziej jednorodną wysoką twardość. Obserwowane jest zmiękczenie w strefie kontaktu z walcem głównym.

Na rysunkach (Rys. 77 i Rys. 78) przedstawiono wyniki pomiarów twardości dla próbek otrzymanych z pierścieni kształtowanych z trzpieniem wahliwym $\pm 1^\circ$ i $\pm 3^\circ$. Po analizie wcześniejszych pomiarów twardości, zdecydowano, o wykonaniu pomiarów dla dwóch ścieżek jak na Rys. 76.



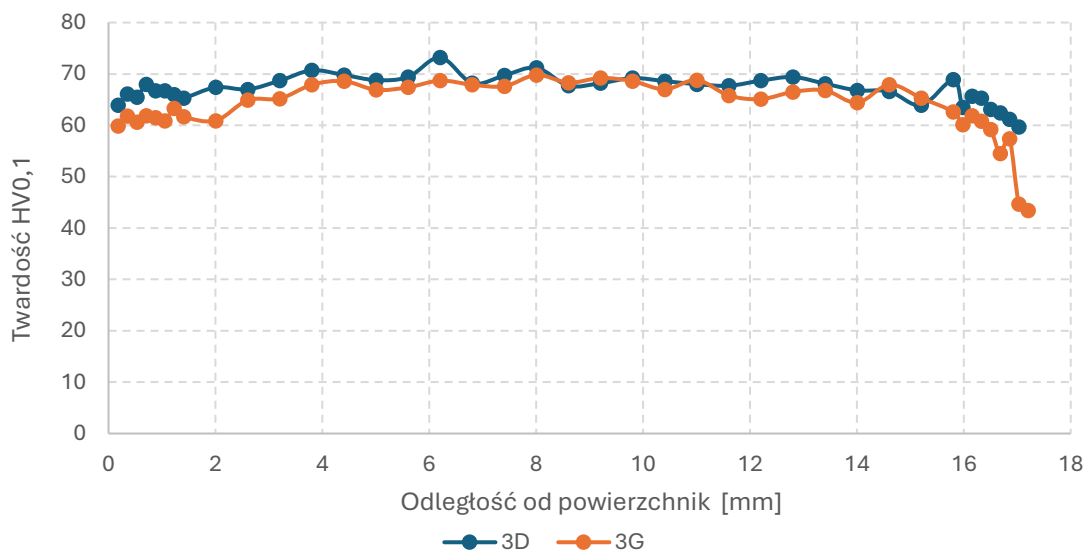
Rys. 76. Wycięta próbka do realizacji pomiarów twardości wraz ze schematem ścieżek pomiaru



Rys. 77. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia kształtowanego z trzpieniem wahliwym $\pm 1^\circ$ w 2 miejscach pomiarowych.

Rozkład twardości w przekroju pierścienia kształtowanego z trzpieniem wahliwym $\pm 1^\circ$ wykazuje wysoką jednorodność pomiędzy ścieżkami pomiarowymi

prorowadzonymi od strony wewnętrznej (kontakt z trzpieniem) do strony zewnętrznej (kontakt z walcem głównym). Wartości twardości utrzymują się w zakresie 58–63 HV0,1, z niewielkimi różnicami między górą i dołem próbki, nieprzekraczającymi 2 HV. W środkowej części przekroju obserwuje się nieznaczny wzrost twardości do około 62–64 HV, natomiast w pobliżu powierzchni zewnętrznej występuje łagodny spadek do poziomu 54–57 HV. Uzyskany pierścień wskazuje na równomierne warunki odkształcenia i chłodzenia wzdłuż wysokości pierścienia, przy lokalnym zmiękczeniu w strefie kontaktu z walcem głównym.



Rys. 78. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia kształtowanego z trzpieniem wahlwym $\pm 3^\circ$ w 2 miejscach pomiarowych.

Rozkład twardości w przekroju pierścienia kształtowanego z trzpieniem wahlwym 3° charakteryzuje się niewielkim zróżnicowaniem między ścieżkami pomiarowymi prowadzonymi od strony wewnętrznej (kontakt z trzpieniem) ku zewnętrznej (kontakt z walcem głównym). Wartości twardości utrzymują się w zakresie 65–72 HV0,1, przy czym ścieżka dolna (niebieska) wykazuje nieco wyższe wartości w całym przekroju. W środkowej strefie obserwuje się lokalny wzrost twardości do około 74 HV, natomiast w rejonie powierzchni zewnętrznej następuje wyraźny spadek do poziomu 58–60 HV. Profil wskazuje na skuteczne umocnienie materiału w warstwach środkowych i jego częściowe zmiękczenie w obszarze kontaktu z walcem głównym.

Podsumowanie pomiarów twardości

Na podstawie wyników pomiarów twardości metodą Vickersa (HV0,5 i HV0,1) wykonanych dla pierścieni walcowanych przy różnych ustawieniach trzpienia pod kątem

(0° 2° , 4°) oraz wahliwego ($\pm 1^\circ$ i 3°), stwierdzono istotne zróżnicowanie rozkładu twardości w zależności od geometrii narzędzia i stopnia odkształcenia materiału.

Dla pierścienia walcowanego z trzpieniem prostym (0°) rozkład twardości na przekroju przez całą wysokość był stosunkowo równomierny, z nieznacznymi odchyleniami przy powierzchniach czołowych. W przekroju przez szerokość pasma obserwowano charakterystyczny trend: wzrost twardości w początkowych milimetrach od powierzchni, stabilizację w zakresie środkowym (ok. 4–14 mm) oraz spadek w rejonie kontaktu z walcem głównym (16–18 mm). Strefa centralna wykazywała najbardziej jednorodną i umiarkowanie wysoką twardość, stanowiąc obszar najbardziej korzystnych właściwości użytkowych. Obniżenie twardości przy powierzchni zewnętrznej mogło wynikać z efektów cieplnych – różnicy w szybkości chłodzenia między powierzchnią a rdzeniem.

W przypadku pierścieni walcowanych z trzpieniem pochylonym (2° i 4°) wartości twardości były niższe niż dla trzpienia prostego, co sugeruje mniejszy stopień umocnienia materiału. Mimo to zachowany został podobny charakter rozkładu twardości – z maksimum w części środkowej próbki i obniżeniem przy powierzchni kontaktu z walcem. Dla pierścienia o najmniejszym stopniu odkształcenia (4°) uzyskano najniższe wartości twardości w całym przekroju, późniejsze badania potwierdziły, że jest efekt rekrytalizacji.

Pierścienie walcowane z zastosowaniem trzpienia wahliwego ($\pm 1^\circ$ i $\pm 3^\circ$) wykazały wyraźnie bardziej jednorodny rozkład twardości w porównaniu do poprzednich wariantów. Dla kąta $\pm 1^\circ$ wartości twardości utrzymywały się w zakresie 58–63 HV_{0.1}, z niewielkimi różnicami pomiędzy ścieżkami pomiarowymi. Środkowa strefa przekroju wykazywała lokalny wzrost twardości do ok. 62–64 HV, natomiast przy powierzchni zewnętrznej występował łagodny spadek do 54–57 HV. Wyniki te wskazują na równomierne warunki odkształcenia i chłodzenia oraz efektywne rozłożenie naprężeń wzdłuż wysokości pierścienia.

Najwyższe wartości twardości (65–72 HV_{0.1}) odnotowano dla pierścienia walcowanego z trzpieniem wahliwym $\pm 3^\circ$, co świadczy o intensywniejszym umocnieniu materiału. W środkowej części przekroju zarejestrowano lokalny wzrost do ok. 74 HV, a przy powierzchni zewnętrznej spadek do 58–60 HV. Otrzymany profil twardości sugeruje skuteczne umocnienie warstw środkowych, z lokalnym zmiękczeniem w strefie kontaktu z walcem głównym, typowym dla obszarów o podwyższonej temperaturze i dużej intensywności tarcia.

Podsumowując, zastosowanie trzpienia wahliwego w procesie walcowania pierścieni ze stopu 6082 pozwala uzyskać bardziej jednorodny rozkład twardości i wyższe wartości średnie niż w przypadku trzpienia prostego lub pochylonego statycznie. Najlepsze właściwości mechaniczne osiągnięto dla kąta wychylenia $\pm 3^\circ$, co wskazuje, że dynamiczne ustawienie trzpienia sprzyja równomiernemu rozkładowi odkształcenia plastycznego oraz efektywnemu umocnieniu stopu aluminium.

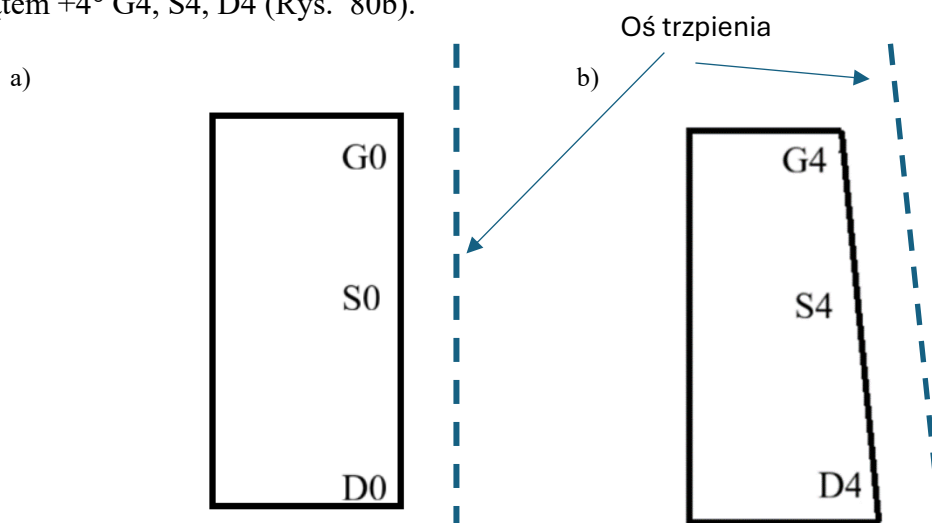
9. Wyniki obserwacji mikrostruktury

Badania przeprowadzono na odcinkach pierścienia kształtowanego w procesie walcowania na trzpieniu w stanie odkształconym. Próbkki do badań zostały wycięte zgodnie jak na Rys. 79.



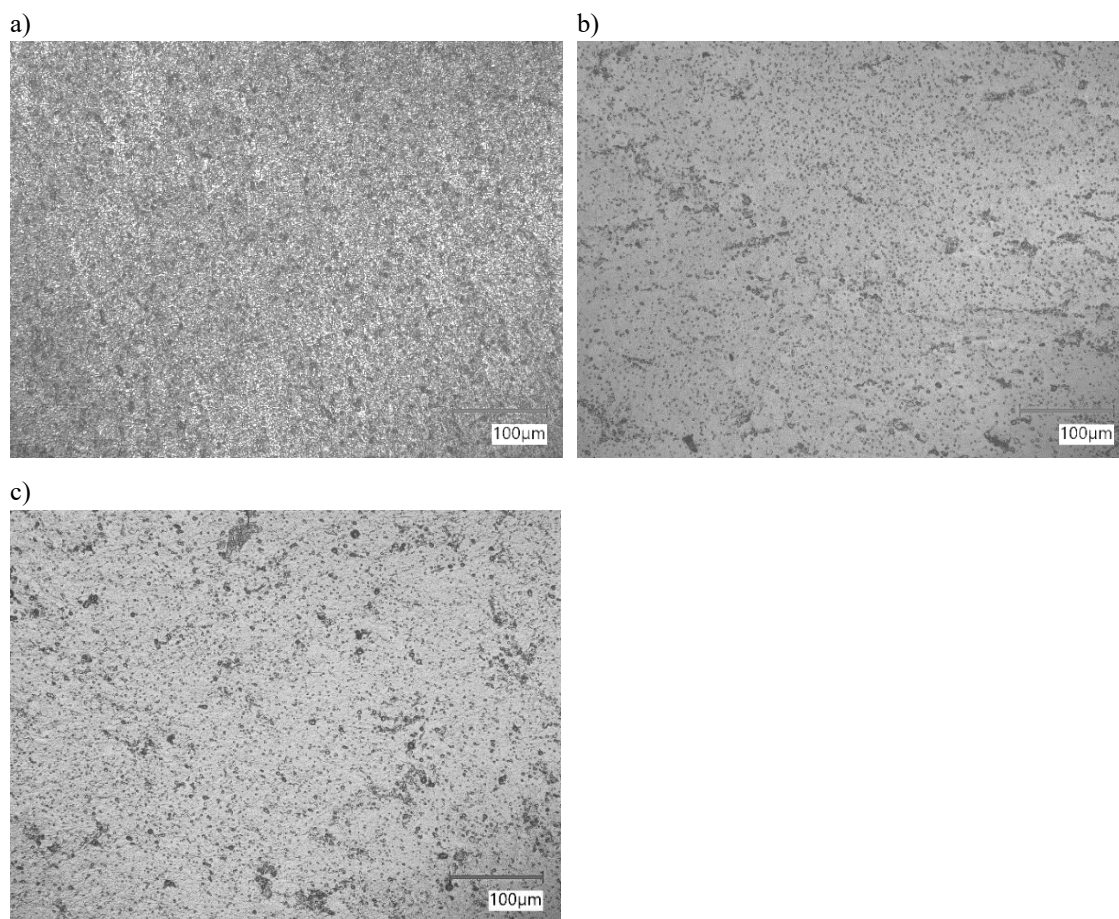
Rys. 79. Pierścień z wyciętymi próbkami do badań

Badania wykonano dla próbek wyciętych z trzech stref górnej, środkowej i dolnej oznaczonych jako G, S, D. Próbkki oznaczono odpowiednio dla pierścienia wytworzonego za pomocą trzpienia niewychylonego G0, S0, D0 (Rys. 80a) oraz trzpienia wychylonego pod kątem $+4^\circ$ G4, S4, D4 (Rys. 80b).



Rys. 80. Przekrój poprzeczny próbek z zaznaczonymi miejscami badań mikrostruktury wytworzonej za pomocą a) trzpienia niewychylonego oraz b) trzpienia wychylonego pod kątem $+4^\circ$

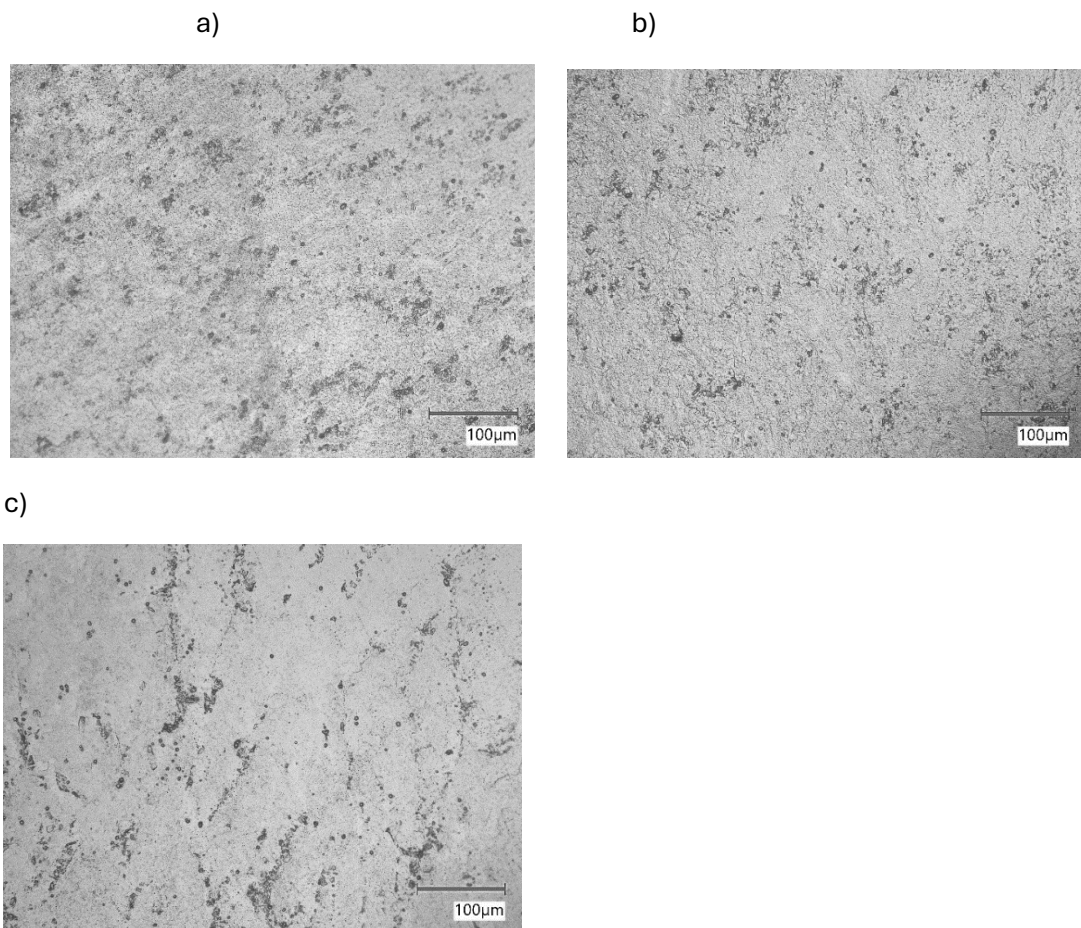
Z przekroju wzdłużnego próbek przygotowano próbki do badań twardości, a także do analizy SEM i TEM. Do analiz TEM cienkie folie przygotowano poprzez obustronne (od góry oraz dołu) szlifowanie, a następnie elektropolerowanie z użyciem automatycznej polerki elektrolitycznej TenuPol-5 oraz wycinanie specjalną gilotyną próbki $\varnothing 3$ mm. Proces pocieniania elektrolitycznego prowadzono w odczynniku 330 ml HNO₃ + 660 ml metanolu CH₃OH, aż do uzyskania otworu w centralnej części próbki. Obserwacje badanych próbek prowadzono przy użyciu transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) TECNAI G20 X Twin z przystawką EDS i detektorem HAADF. Analiza chemiczna oraz dyfrakcja punktowa posłużyły do identyfikacji faz w badanych stopach. Dyfrakcje punktowe rozwiązano za pomocą oprogramowania Sleeve 5+ korzystając z bazy PDF5+ z 2025 r.



Rys. 81. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia pod kątem 0° a) góra b) środek oraz c) dół próbki.

Na Rys. 81 i Rys. 82 przedstawiono mikrostruktury z mikroskopii optycznej odpowiednie dla próbek kształtowanych za pomocą trzpienia niewychylonego oraz trzpienia wychylonego pod kątem $+4^\circ$. Na mikroskopie optycznym trudno ujawnić granicę ziaren, natomiast widoczne są wydzielina szczególnie ich rozłożenie. Dla próbek

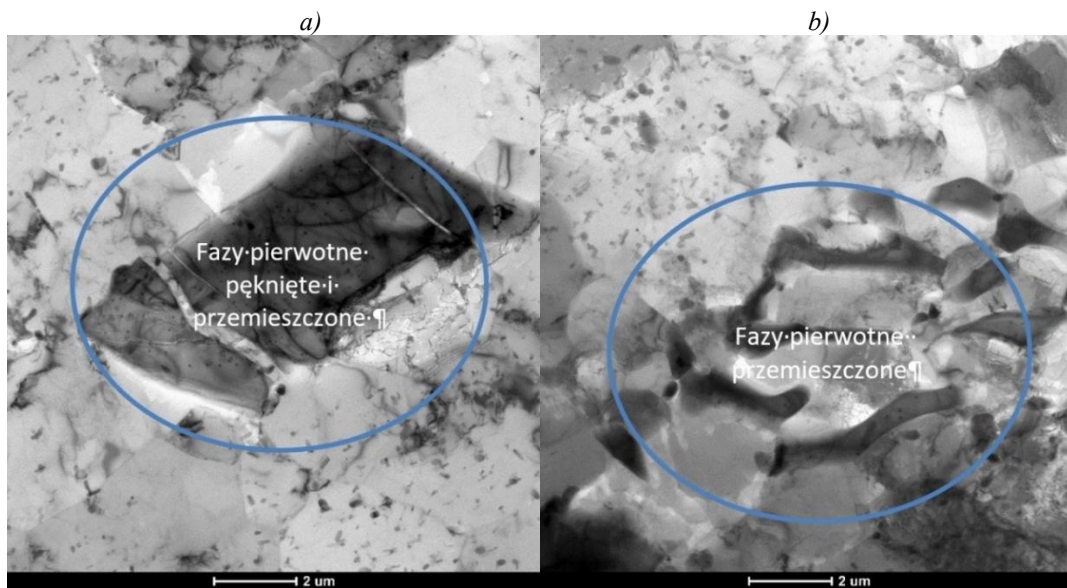
kształtowanej za pomocą trzpienia niewychylonego rozkład wydzieleni jest bardzo równomierny, nie ma śladów nierównej deformacji. Temperatura wsadu wynosi 480°C, dlatego należy sądzić, że materiał w pełni uległ zdrowieniu lub rekrystalizacji. Różnica pomiędzy górną częścią próbki a dolną może wynikać z faktu, że dolna część może szybciej ulegać schłodzeniu ze względu na dłuższy kontakt ze stołem walcarki niż część górna. Dla wyrobu walcowanego za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem +4°, można zauważyć znaczną różnicę w mikrostrukturze pomiędzy częścią górną i dolną jak również w stosunku do mikrostruktury pierścienia walcowanego trzpieniem niewychylnym. W górnej części próbki widoczne jest ułożenie wydzieleni w pasmach nachylonych pod kątem około 45° w stosunku do osi próbki. Jest to efekt nierównomiernego odkształcenia próbki na wysokości, gdyż trzpień wychylony pod kątem +4° powoduje, że materiał bardziej jest odkształcany w górnej części próbki i powoduje płynięcie materiału pod kątem do dolnej części próbki.



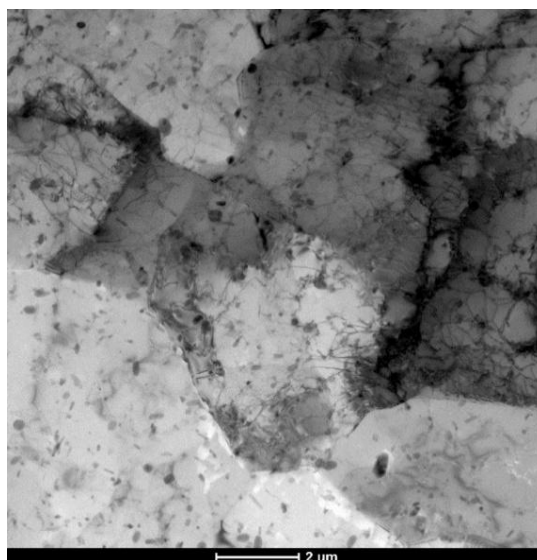
Rys. 82. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 4° a) góra b) środek oraz c) dół próbki.

9.1. Wyniki badań mikrostruktury w technice TEM dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°

Na mikroskopie TEM przebadano próbki z dolnej części pierścienia. W próbce wykazano występowanie pierwotnych wydzieli powstających w materiale w procesie odlewania. Nagrzewanie materiału do temperatury 480°C nie powoduje ich rozpuszczenia. Wydzielenia te są kruche, dlatego odkształcenie plastyczne powoduje ich pęknięcia Rys. 83a oraz w konsekwencji ich przemieszczanie Rys. 83b.



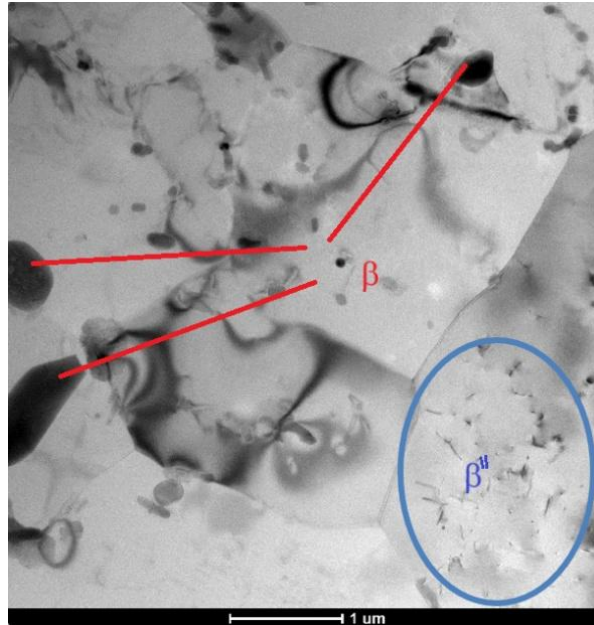
Rys. 83. Mikrostruktura wydzieli pierwotnych dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° a) pęknięte oraz b) przemieszczone



Rys. 84. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°

Pierścienie po walcowaniu były chodzone na powietrzu, dlatego mikrostruktura jest zbliżona do równowagowej po zdrowieniu i rekrytalizacji. Natomiast cykliczne

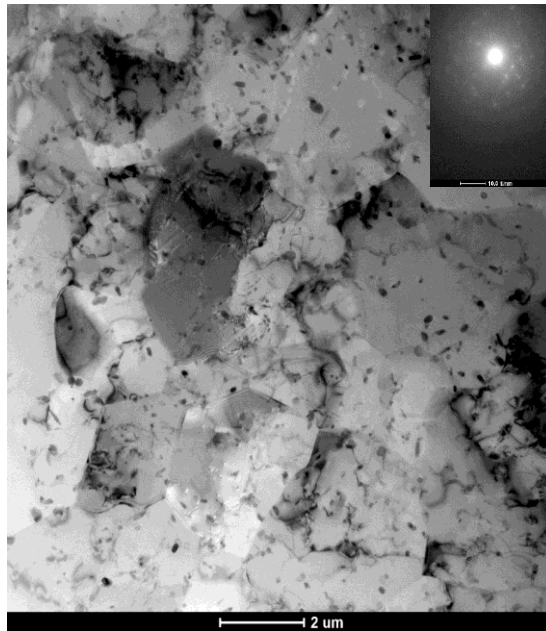
odkształcanie powodują, że trudno powiązać mikrostrukturę z wielkością odkształcenia w kolejnych cyklach. Oprócz silnego wyzdrowienia mikrostruktury są widoczne obszary podziarna, w których widoczne są pojedyncze dyslokacje, najczęściej ułożone wzdłuż kierunku poślizgu. Zauważa się też efekty spiętrzenia dyslokacji na wydzielinach zlokalizowanych na granicy ziarna lub podziarna (Rys. 84).



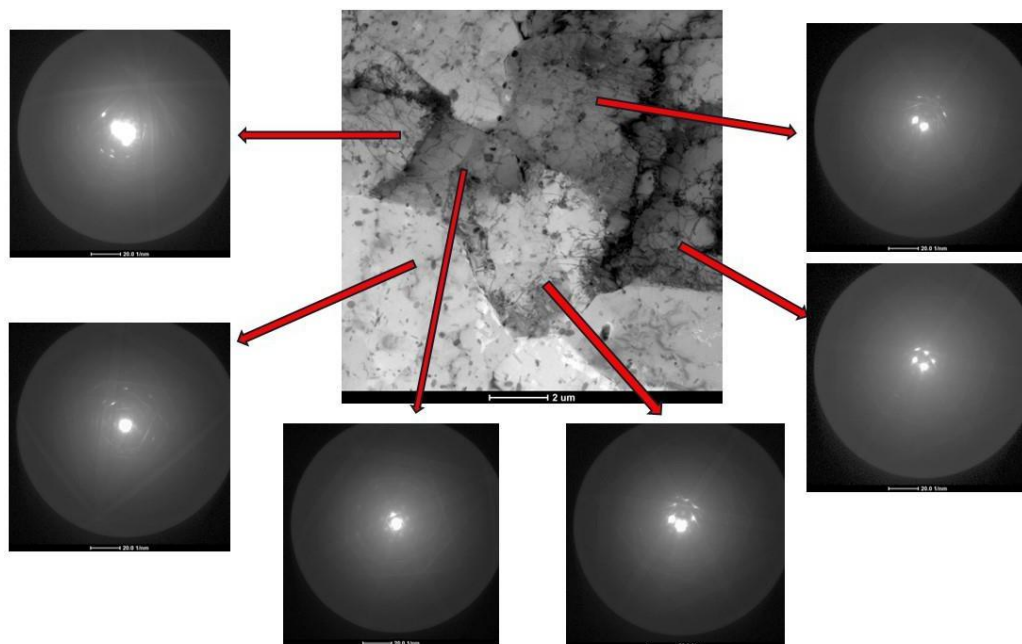
Rys. 85. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°

Próbki były chłodzone na powietrzu, więc należało się spodziewać wydzielenia fazy β , które rzeczywiście występowały (Rys. 85). Natomiast dużym zaskoczeniem była obecność w mikrostrukturze wydzielenia fazy β'' , która wydzieliła się głównie podczas starzenia. Może to być związane z faktem, że w dolnej części próbki następuje szybkie jej chłodzenie w obszarze kontaktu ze stołem walcarki.

Na Rys. 86 widoczna jest mikrostruktura z wykonaną dyfrakcją punktową z tego obszaru. Dyfrakcja wskazuje na niewielki rozrzut orientacji ziarna w stopie. Na tej podstawie można wnioskować, że w mikrostrukturze po zadanym odkształceniu na gorąco i chłodzeniu na powietrzu tworzą się wąskokątowe granice. W stopach aluminium są to granice podziarn. Widoczna jest duża ilość wydzielenia fazy β .

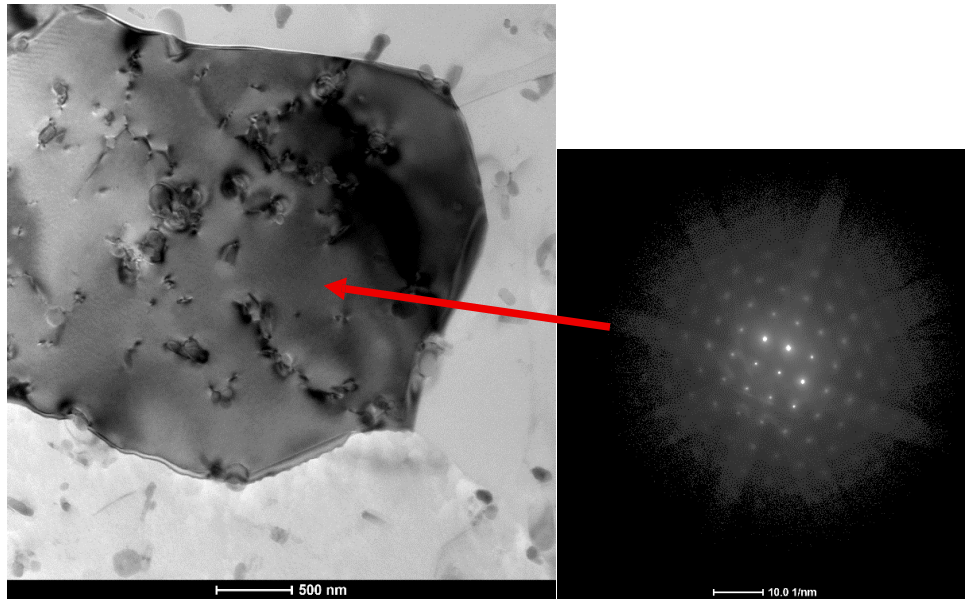


Rys. 86. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° obraz uzyskany w jasnym polu z dyfrakcją z tego obszaru



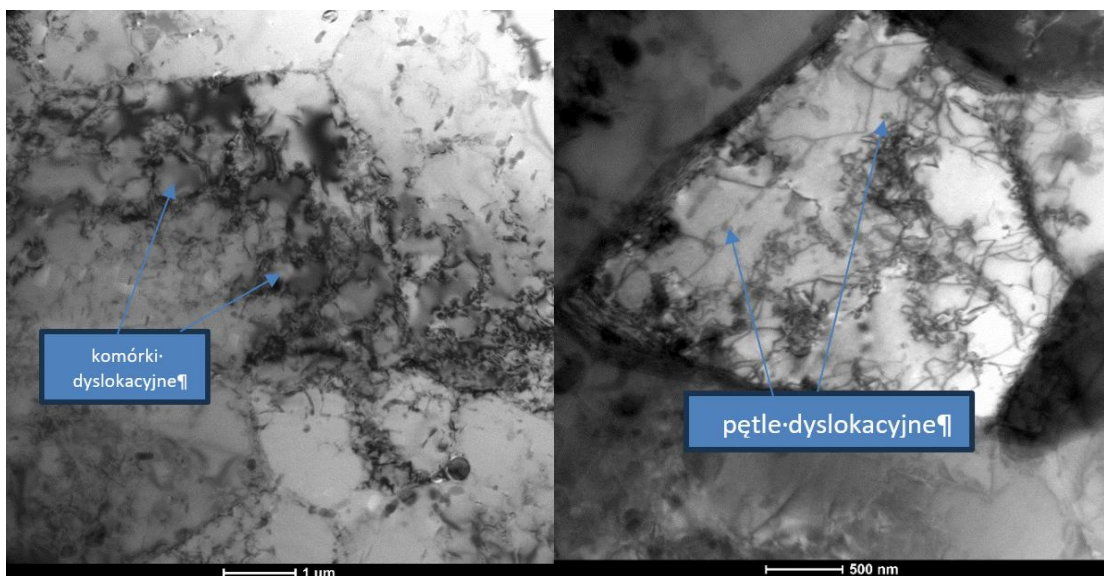
Rys. 87. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° obraz uzyskany w jasnym polu z dyfrakcją linii Kikuchi'ego z poszczególnych podziarn

Podobne wyniki uzyskano wykonując dyfrakcje liniami Kikuchi'ego (Rys. 87) z poszczególnych podziarn, które stają się coraz bardziej wyraźne, co świadczy o intensywnym przebiegu procesu zdrowienia i rekrytalizacji. Rozrzut orientacji występuje wokół osi pasa (prawdopodobnie jest to oś $[110]$). Można też zaobserwować tworzenie się granicy szerokokątowej.



Rys. 88. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° obraz uzyskany w jasnym polu z dyfrakcją linii $[100]$ z obszaru podziarna.

Z Rys. 88 wynika, że wydzielenia fazy β mogą osiągnąć duże rozmiary, ponieważ faza ta jest krucha i średniej twardość obniża ona odkształcalność stopu i może prowadzić do jego pęknięcia podczas odkształcania.



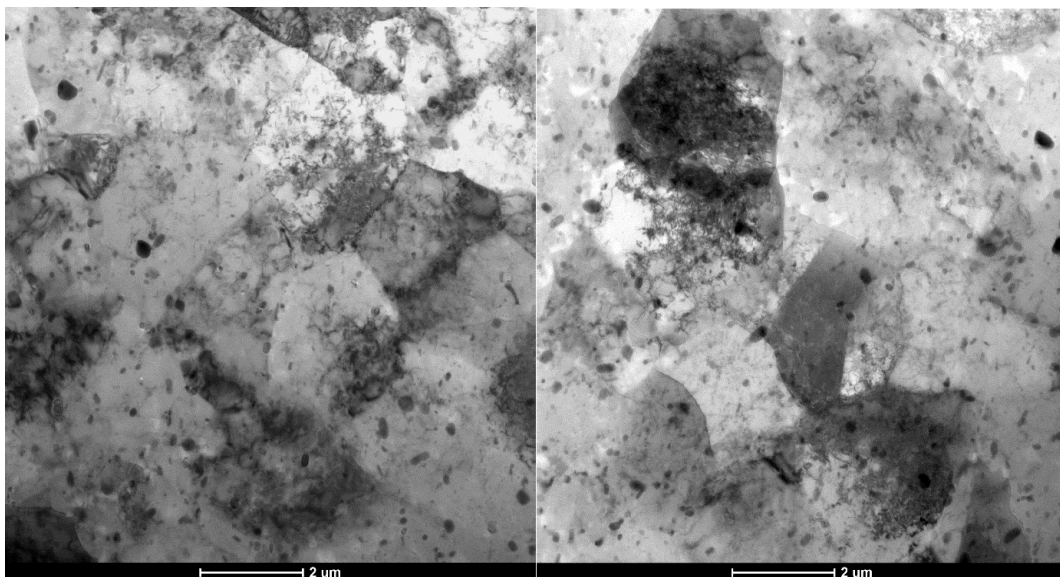
Rys. 89. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia niewychylonego

W odkształconym pierścieniu procesy odbudowy mikrostruktur przebiegają w bardzo zróżnicowany sposób np. na Rys. 85 i Rys. 88 występują obszary bardzo mocno wyzdrowienie podczas gdy są miejsca, gdzie obserwuje się miejscowe efekty związane z wpływem odkształcenia plastycznego na mikrostrukturę. Lokalnie dochodzi do zwiększenia gęstości dyslokacji w ziarnach i ich przegrupowania. Tworzą się nieregularne układy komórek dyslokacyjnych. Dochodzi do tworzenia układów granic

szerokokątowych. Dyslokacje przybierają splątane układy, obecne są pętle dyslokacyjne (Rys. 89).

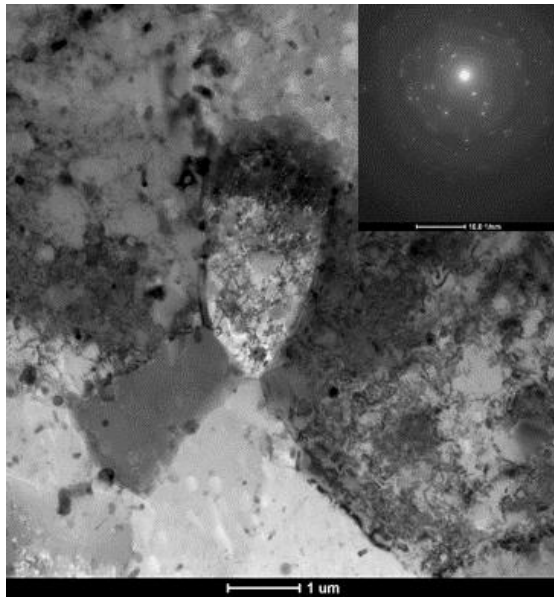
9.2. Wyniki badań mikrostruktury w technice TEM dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 4°

W próbce z dolnej części pierścienia kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego, która jest mocniej odkształcona od próbki kształtowanej za pomocą trzpienia niewychylonego są widoczne efekty większego odkształcenia plastycznego. Skutki odkształcenia plastycznego odzwierciedlają się w postaci występowania w mikrostrukturze wyraźnych obszarów o dużej i bardzo dużej gęstości dyslokacji. Dyslokacje gromadzą się zarówno wewnątrz jak i na granicach ziarn/podziarn. Zaczynają tworzyć się wąskokątowe granice a także konfiguracje podwójnych ścianek dyslokacyjnych. Zaczynają też kształtować się komórkowe układy dyslokacji (Rys. 90).

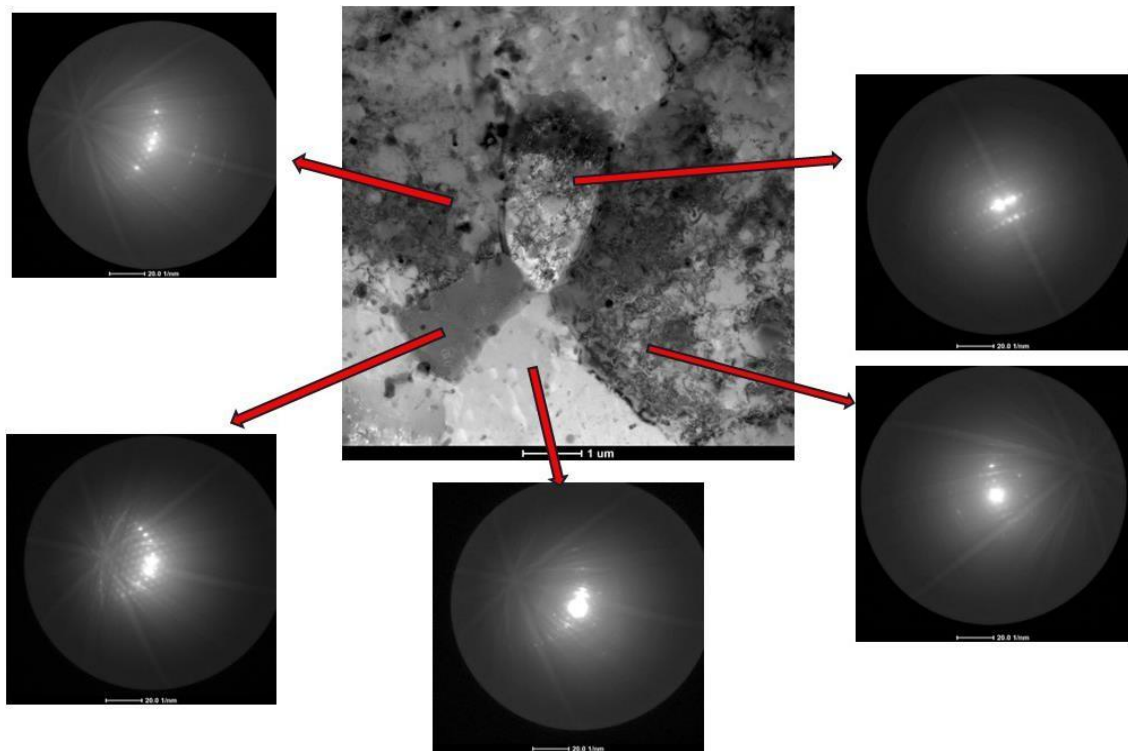


Rys. 90. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 4°

W próbce z dolnego obszaru widoczny jest większy rozrzut orientacji na obrazie dyfrakcji punktowej z tego obszaru (Rys. 91). Ponadto zaobserwowano wyraźną różnicę w orientacji na części dyfrakcji liniami Kikuchi'iego, co może oznaczać granice dużego kąta (Rys. 92).

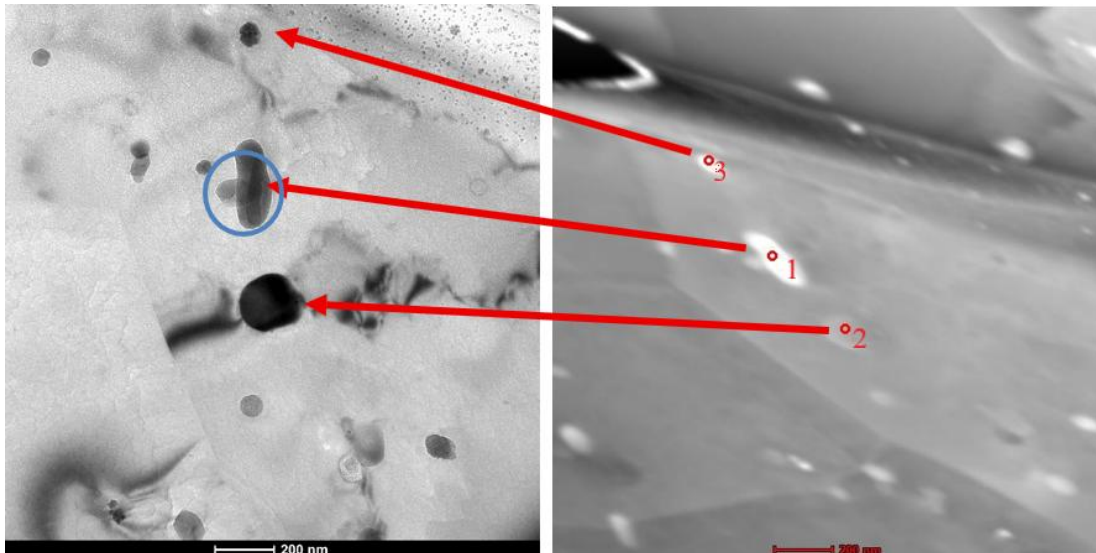


Rys. 91. Obraz uzyskany w jasnym polu oraz dyfrakcja z tego obszaru dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°

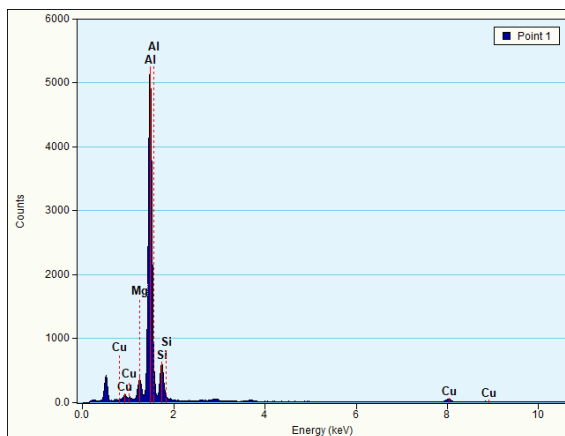


Rys. 92. Obraz uzyskany w jasnym polu wraz z dyfrakcją linii Kikuchi'ego z poszczególnych podziarn.

Przeprowadzono dokładną analizę wydzielań (Rys. 93). Z analizy fazowej wykonanej na podstawie składu chemicznego (Rys. 94) oraz analizy dyfrakcyjnej (Rys. 95), wynika, że w mikrostrukturze występują wydzielenia fazy β - Mg_2Si . Na podstawie obserwacji mikrostruktury zarówno pierścieni kształtowanych trzepaniem wychylnym pod kątem 4° i niewychylnym wydzielenia fazy β są dominującymi w zastosowanych warunkach chłodzenia.



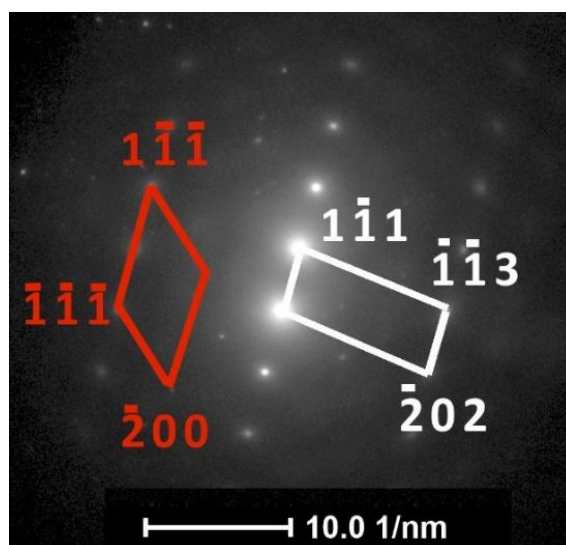
Rys. 93. Wydzielenie w mikrostrukturze w próbce kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego



Point 1

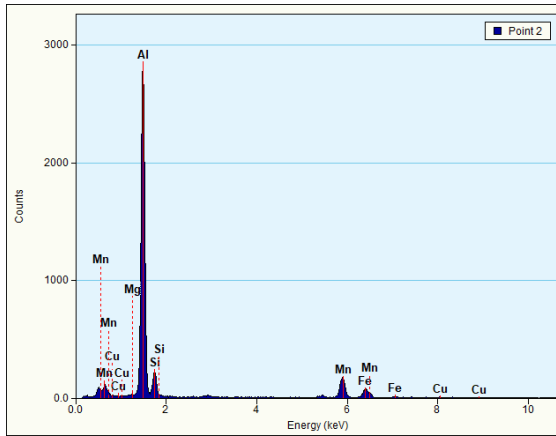
Element	Weight%	Atomic
% Mg(K)	4.82	5.40
Al(K)	83.71	84.46
Si(K)	9.65	9.35
Cu(K)	1.80	0.77

Rys. 94. Analiza EDS składu chemicznego wydzielenia 1 z Rys. 93.



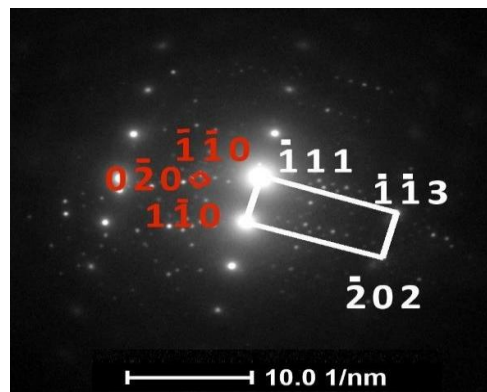
Rys. 95. Dyfrakcja z wydzielenia 1 z Rys. 93, aluminium (kolor biały) Mg_2Si (kolor czerwony).

Zaobserwowano również wydzielenia fazy żelazowej α (Rys. 96 oraz Rys. 97). Należy zaznaczyć, że fazy α AlSiFe ($\text{Al}_{193.38}\text{Cu}_{6.02}\text{Fe}_{24}\text{Si}_{16.2}$) może być zastępowane przez wydzielenia fazy AlMnSi, gdyż Mn z Fe się podmienia. Dyfrakcja dla oby faz jest taka sama, gdyż mają tę sama krystalografie (parametry komórki) a inną stechiometrię.



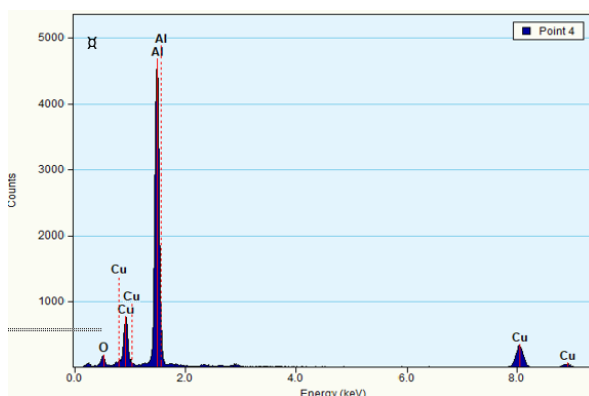
Point 2		
Element	Weight%	Atomic
% Al(K)	80.37	86.89
Si(K)	5.30	5.51
Cr(K)	0.49	0.28
Mn(K)	10.58	5.62
Fe(K)	3.23	1.69

Rys. 96. Analiza EDS składu chemicznego wydzielenia 1 z Rys. 93



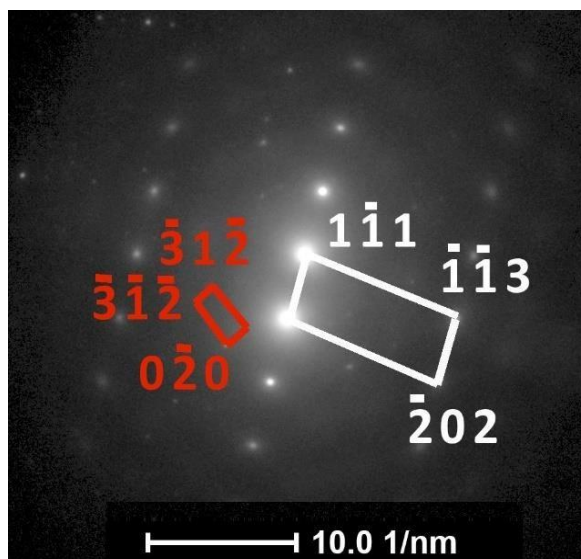
Rys. 97. Dyfrakcja z wydzielenia 2 z Rys. 93, aluminium (kolor biały) $\text{Al}_{193.38}\text{Cu}_{6.02}\text{Fe}_{24}\text{Si}_{16.2}$ (kolor czerwony).

Dużym zaskoczeniem było znalezienie wydzielenia fazy θ - Al_2Cu , gdyż w składzie chemicznym jest tylko 0,055% Cu, natomiast są one bardzo drobne (Rys. 98 oraz Rys. 99).



Point 2		
Element	Weight%	Atomic
% Al(K)	81.69	91.31
Cu(K)	18.30	8.68

Rys. 98. Analiza EDS składu chemicznego wydzielenia 1 z Rys. 93



Rys. 99. Dyfrakcja z wydzielenia 2 z Rys. 93, aluminium (kolor biały) Al_2Cu (kolor czerwony) (kolor czerwony).

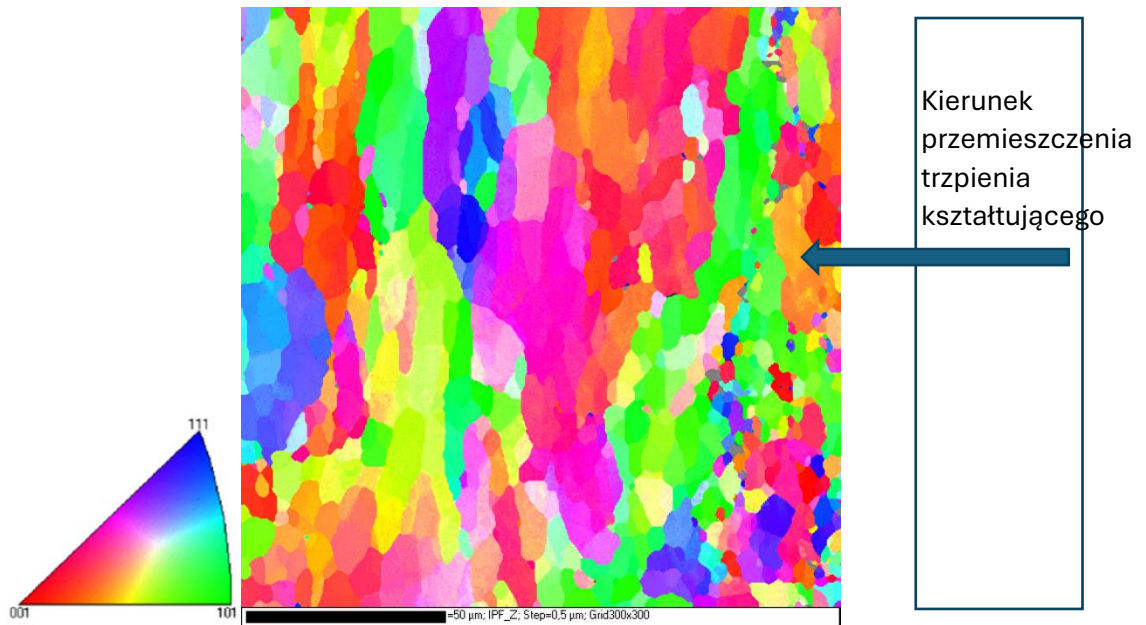
9.3. Badania EBSD pierścieni odkształconych

Badania zostały wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego firmy Jeol, model: Jeol SEM JSM 6480 z przystawką do badań EBSD w systemie HKL technology, backscateter preampfiler K.E developments LTD. Oprogramowanie do wizualizacji map i pól biegunowych wykorzystane do analizy wyników EBSD zawartych w pakiecie oprogramowania HKL Channel 5 od Oxford Instruments tj. Flamenco - oprogramowanie sterujące, TANGO- oprogramowanie do wizualizacji i analizy map, Salsa - oprogramowanie do ODFs, Mambo-oprogramowanie do tworzenia pól biegunowych.

Przedmiotem analizy były dwa metalograficzne zglądy ze stopu Al6082 o sygnaturze D0 i D4 z Rys. 80, to znaczy z dolnej części pierścienia kształtowanej odpowiednio za pomocą trzpienia niewychylonego oraz wychylonego o kąt 4° .

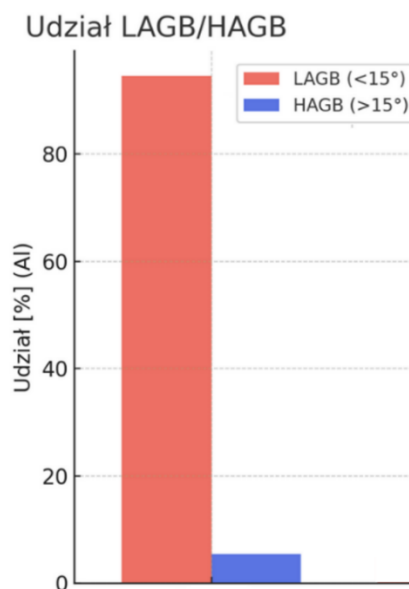
W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki dla próbek D0. Na odwrotnej figurze biegunowej widoczne są dwa charakterystyczne obszary związane z występowaniem dwóch podstawowych orientacji ziarna $\langle 101 \rangle$ oraz $\langle 001 \rangle$ (Rys. 100). Ziarna są wydłużone w prostopadłym do przemieszczania się trzpienia kształtującego. Wielkość ziarna jest bardzo zróżnicowana od bardzo dużych ziaren o średnicy zstępczej około 45 mm, które są wydłużone. Ich wygląd oraz granice wąskokątowe, świadczą o tym, że ulegały one głównie procesowi zdrowienia dynamicznego. W mikrostrukturze pojawiają się też drobne ziarna głównie o orientacji $\langle 111 \rangle$, ich wielkość oraz szerokawe

granice świadczą, że najprawdopodobniej powstały one w efekcie rekrytalizacji dynamicznej.



Rys. 100. Mapa EBSD obrazująca mikrostrukturę aluminium Al 6082 kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 0° . Odpowiadająca mapie odwrotna figura biegunowa.

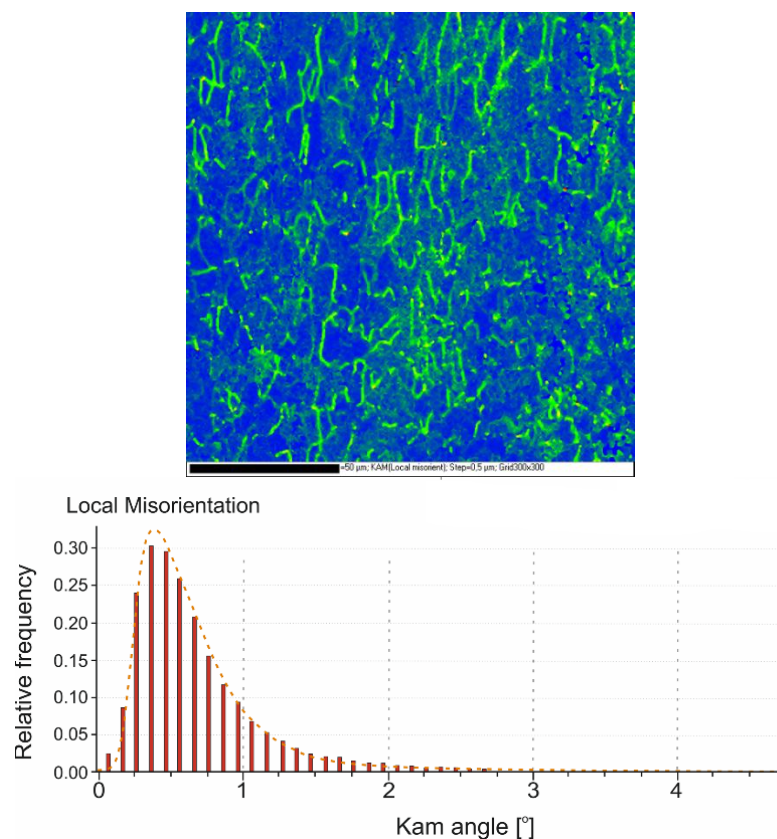
Na Rys. 101 przedstawiono udział granic szerokokątowych charakteryzujących się kątem dezorientacji powyżej 15° oraz granic wąskokątowych mających kąt dezorientacji mniejszy od 15° , świadczący o dominacji granic pierwszego rodzaju.



Rys. 101. Rozkład udziału granic szerokokątowych i wąskokątowych dla pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 0°

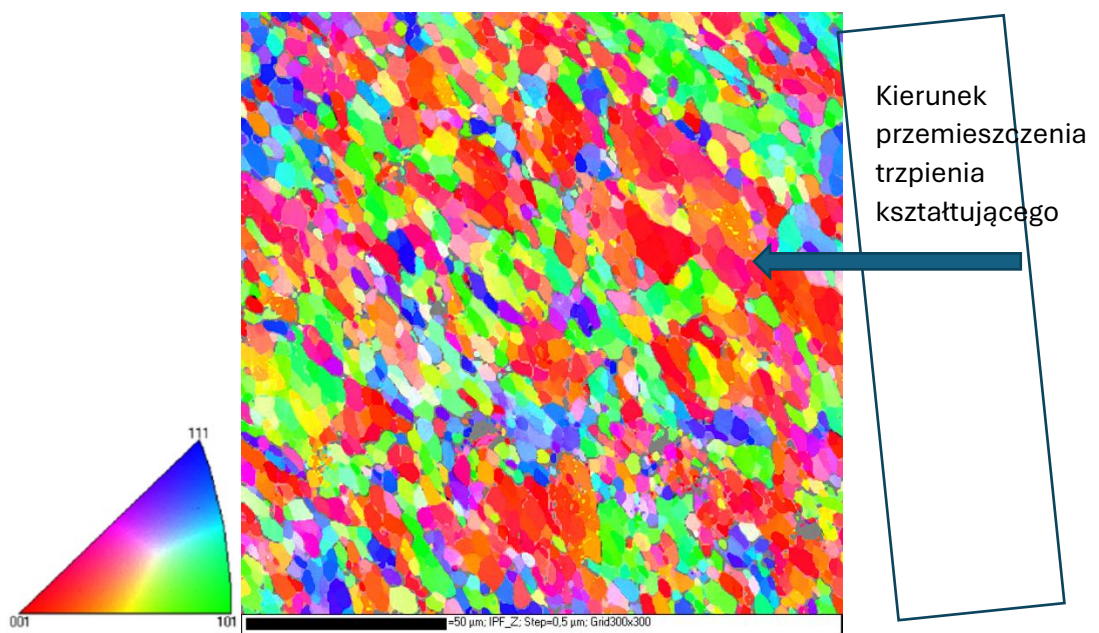
Wraz ze wzrostem odkształcenia widoczny jest wzrost gęstość dyslokacji geometrycznie niezbędnych (GDNs). Podczas odkształcania materiałów, na skutek poślizgu dyslokacji wewnątrz ziaren, następuje spiętrzanie się oraz akumulacja dyslokacji w pobliżu granic ziaren. Miejsca te stanowią obszary o ograniczonej podatności na odkształcenia. Występują one najczęściej pomiędzy odkształcającymi się ziarnami, gdzie obroty sieci krystalicznej obserwowane są w niewielkiej odległości od granic ziaren [83]. Gęstość dyslokacji geometrycznie niezbędnych jest powiązana z wielkością kąta dezorientacji wyznaczane na podstawie parametru KAM (z ang. Kernel Average Misorientation) z map orientacji krystalograficznej EBSD. Parametr KAM reprezentuje wartość lokalnego odkształcenia, zatem im wyższa jest wartość tego parametru tym obserwowane są wyższe wartości lokalnego odkształcenia.

Obszary, gdzie wartość parametru KAM osiąga najwyższe wartości pokrywają się z obszarami o najwyższej gęstości dyslokacji geometrycznie niezbędnych. Na Rys. 102 zamieszczono rozkład współczynnika KAM, który świadczy o niskiej gęstości dyslokacji geometrycznie niezbędnych, co dowodzi przy założeniu dużego odkształcenia plastycznego o intensywnych procesach zdrowienia i rekrytalizacji dynamicznej.



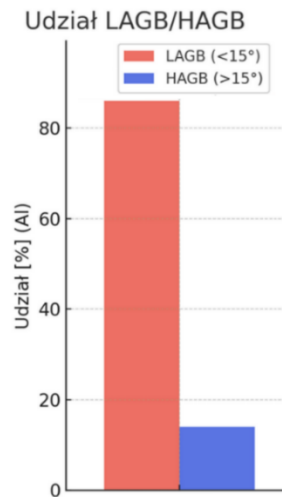
Rys. 102. Rozkład wielkości parametru KAM dla pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 0°.

Następnie przebadano próbki z miejsca D4, czyli kształtowane za pomocą trzpienia pochylonego o kąt 4° , dla którego stopień odkształcenia jest znacznie większy niż dla miejsca D0 (pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia niewychlanego). Na odwrotnej figurze biegunowej widoczne są również dwa charakterystyczne obszary związane z występowaniem dwóch podstawowych orientacji ziarna $\langle 101 \rangle$ oraz $\langle 001 \rangle$ (Rys. 103). W tym przypadku jednak ziarna są znacznie mniejsze o podobnej średnicy zastępczej wynoszącej około $10 \mu\text{m}$, co świadczy o zajściu pełnej rekrytalizacji. Natomiast widoczne jest kierunkowe ułożenie ziaren świadczące o płynięciu materiału pod kątem w wyniku kształtowania materiału za pomocą trzpienia wychylonego.



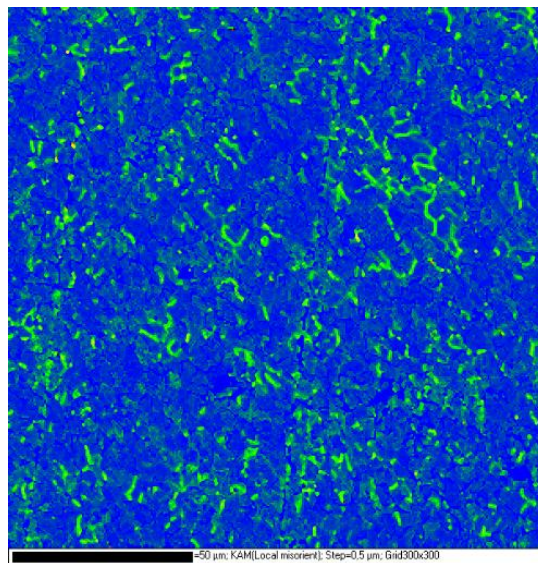
Rys. 103. Mapa EBSD obrazująca mikrostrukturę aluminium 6082 kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 4° . Odpowiadająca mapie odwrotna figura biegunowa.

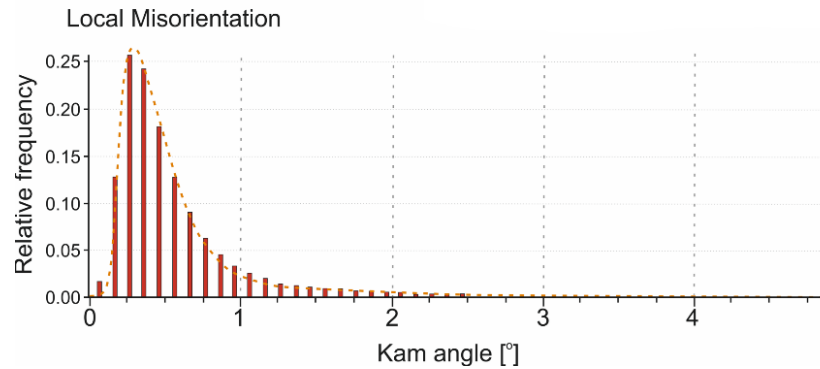
Na Rys. 104 przedstawiono udział granic szerokokątowych charakteryzujących się kątem dezorientacji powyżej 15° oraz granic wąskokątowych mających kąt dezorientacji mniejszy od 15° , świadczący o dominacji granic pierwszego rodzaju. W porównaniu do granic w próbce kształtowanej za pomocą trzpienia niewychylonego, jest widoczna znacznie większa ilość granic szerokokątowych, co jest efektem rekrytalizacji, podczas której powstają ziarna o dowolnej orientacji.



Rys. 104. Rozkład udziału granic szerokokątowych i wąskokątowych

Obszary, gdzie wartość parametru KAM osiąga najwyższe wartości pokrywają się z obszarami o najwyższej gęstości dyslokacji geometrycznie niezbędnych. Na Rys. 105 zamieszczono rozkład współczynnika KAM, który podobnie jak dla procesu kształtowania trzpieniem niewychylnym świadczy o niskiej gęstości dyslokacji geometrycznie niezbędnych, co dowodzi przy założeniu dużego odkształcenia plastycznego o intensywnych procesach zdrowienia i rekrytalizacji dynamicznej. Pomimo dość dużej różnicy w wielkości ziarna dla kształtowania za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 4° i niewychylanego uzyskano zbliżone rozkłady wartości KAM, przy czym bardziej jednorodne są one dla kształtowania trzpieniem wychylnym, co wynika z faktu bardziej jednorodnej mikrostruktury.





Rys. 105. Rozkład wielkości parametru KAM pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego

10. Potencjał wdrożeniowy opracowanej metody

W ramach przygotowań do wdrożenia procesu technologicznego walcowania pierścieni ze stopu aluminium 6082 opracowano zestaw parametrów operacyjnych umożliwiających wytwarzanie wyrobów o dużych średnicach przy jednoczesnym zapewnieniu stabilnych warunków kształtowania materiału. Proces realizowano z wykorzystaniem wsadów o wymiarach 160×60 mm oraz 160×50 mm, przy przyjętym gnioście 0,4 mm/obr i całkowitym czasie trwania cyklu równym 280 s. Dla wsadu o wysokości początkowej 60 mm zaplanowano redukcję wysokości o 15 mm, natomiast dla wsadu 50 mm wykonano dwa warianty obróbki – z redukcją wysokości odpowiednio o 10 mm oraz o 15 mm. Dobór tych parametrów umożliwił uzyskanie pierścieni o średnicach zewnętrznych 360 mm, 380 mm oraz 420 mm, które stanowią wyroby reprezentatywne przeznaczone do prezentacji możliwości technologicznych opracowanego procesu potencjalnym odbiorcom. Na Rys. 106 przedstawiono otrzymane pierścienie: a) 360 mm, b) 380 mm, c) 420 mm.



b) pierścień $\phi 360$ mm

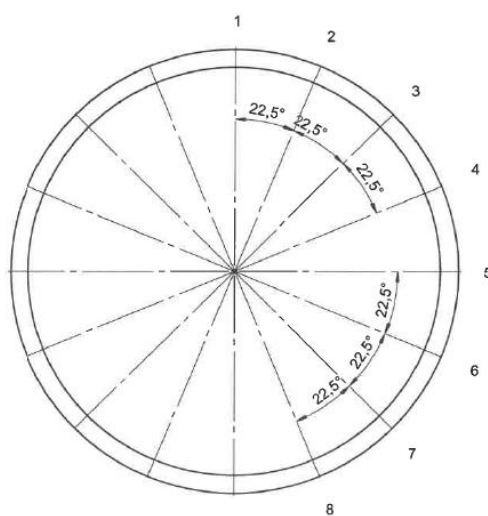
b) pierścień $\phi 360$ mm



c) pierścień $\phi 420$ mm

Rys. 106. Pierścienie - reprezentacyjne

Pierścień o największej średnicy (420 mm) wzbudził szczególne zainteresowanie ze strony potencjalnego odbiorcy. W związku z wcześniejszymi doświadczeniami, obejmującymi występowanie zjawisk takich jak krzywienie, utrata osiowości oraz zmiany wymiarów geometrycznych po procesach toczenia i długotrwałego sezonowania, klient zwrócił szczególną uwagę na konieczność przeprowadzenia weryfikacji stabilności wymiarowej wyrobu. W tym celu jeden z pierścieni został przekazany do odbiorcy, gdzie poddano go obróbce mechanicznej w zakresie wymiarów zewnętrznych, a następnie procesowi sezonowania. W tabeli przedstawiono wymiary wyjściowe pierścienia oraz pomiary wykonane już po obróbce i sześciomiesięcznym sezonowaniu (Tabela 6). Pomiary wykonano według schematu przedstawionego na rysunku Rys. 107.



Rys. 107. Schemat przeprowadzania pomiarów wytworzonych pierścieni

Tabela 6 wyników pomiarów dla pierścienia nie obrabionego oraz po sezonowaniu (6 miesięcy)

Pomiar	Wymiar pierścienia			Wymiary po sezonowaniu	
	Φ 422	Φ 367	46	Φ 422	Φ 422
1A	422,9	387,5	46,5	421,25	388,25
1B	422,3	387,2		421,29	388,38
2A	422,9	387,5	46,5	421,2	388,4
2B	422,3	387,1		421,33	388,43
3A	423,0	387,5	46,5	421,22	388,31
3B	422,5	387,3		421,3	388,41
4A	423,5	387,7	46,5	421,14	388,23
4B	422,6	387,4		421,14	388,32
5A	423,2	387,8	46,7	421,07	388,21
5B	422,8	387,6		421,1	388,23
6A	422,9	387,5	46,7	421,03	388,22
6B	422,6	387,3		421,04	388,17
7A	422,7	387,3	46,7	421,1	388,25
7B	422,3	387,1		421,05	388,19
8A	422,7	387,4	46,7	421,18	388,3
8B	422,3	387,1		421,18	388,29

Analiza wyników pomiarów pierścienia o średnicy nominalnej 420 mm wykazała, że zarówno średnice wewnętrzne, jak i zewnętrzne, a także wysokość elementu zachowały wysoką stabilność wymiarową po zakończeniu procesu sezonowania. Zmiany geometryczne odnotowane po sześciu miesiącach są niewielkie. Odchyłki pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi nie przekraczają kilku setnych milimetra, co świadczy o równomiernym rozkładzie naprężeń i stabilnym zachowaniu materiału w całym obwodzie pierścienia.

Uzyskane rezultaty potwierdzają wysoką stabilność wymiarową pierścieni ze stopu aluminium 6082 po obróbce skrawaniem i długotrwałym sezonowaniu. Niewielkie różnice w wymiarach wskazują na prawidłowy przebieg procesów relaksacji naprężeń

szczątkowych, co gwarantuje możliwość dalszej obróbki oraz zastosowania wyrobu w warunkach przemysłowych, zgodnie z wymaganiami potencjalnych odbiorców.

11. Podsumowanie i wnioski końcowe

Rozprawa dotyczy opracowania i analizy procesu walcowania pierścieni ze stopu aluminium EN AW-6082 z wykorzystaniem nowatorskiej walcarki laboratoryjnej z wychylnym trzpieniem kształtującym. Celem badań było określenie wpływu kąta pochylenia trzpienia na przebieg walcowania, stabilność procesu oraz właściwości geometryczne i materiałowe uzyskiwanych pierścieni. Zastosowano kompleksową metodykę obejmującą symulacje numeryczne MES, eksperymenty laboratoryjne oraz analizy mikrostruktury i twardości materiału.

Konstrukcja walcarki z wychylnym trzpieniem: Laboratoryjna walcarka pierścieniowa składa się z pięciu głównych zespołów: zespołu walca głównego, zespołu trzpienia kształtującego, zespołu walców stożkowych (osiowych), zespołu walców centrujących oraz korpusu maszyny. Walec główny osadzony jest w sztywnej ramie stalowej i napędzany jest silnikiem o mocy 15 kW poprzez przekładnię, co zapewnia dostateczny moment do odkształcania pierścienia. Najważniejszym elementem innowacyjnym jest zespół trzpienia kształtującego – trzpień (pełniący rolę walca wewnętrznego) zamocowany w łożyskowanych oprawach umożliwiających jego wychylanie o zadany kąt dzięki połączeniu z tulejami ślizgowymi. Trzpień sprzężony jest z układem dwóch niezależnych napędów liniowych (góry i dołu), co pozwala sterować jednocześnie jego ruchem osiowym (dosuw do materiału) oraz wychyleniem kątowym w trakcie procesu. Sam trzpień obraca się w trakcie walcowania na dwurzędowych łożyskach baryłkowych zapewniających mu sztywne podparcie podczas obciążeń. Zespół walców stożkowych (jeden od góry, drugi od dołu pierścienia) służy do regulacji wysokości pierścienia – dolny walec stożkowy przesuwany się po prowadnicach liniowych napędzany śrubą, zaś górny po prowadnicach walcowych napędzany przez mechanizm śrubowy. Napęd został tak dobrany aby, aby nacisk walca górnego wynosił maksymalnie 80 kN. Dwa przeciwległe walce centrujące utrzymują obracający się pierścień we właściwej pozycji – są one zamocowane do korpusu walca głównego i przemieszczają się za pomocą napędzanych śrub, podążając za zwiększającą się średnicą pierścienia. Cała konstrukcja odznacza się wysoką sztywnością, co minimalizuje ugięcia podczas obciążeń. Wprowadzenie regulowanego pochylenia trzpienia (oraz możliwości jego oscylacji) stanowi zasadniczą innowację zwiększającą sterowalność procesu –

rozwiązanie to pozwala kompensować lokalne różnice obciążenia i modyfikować rozkład odkształceń, ograniczając wady wynikające z asymetrycznego kontaktu między narzędziami. Projekt walcarki został objęty ochroną patentową (patent nr 243823 na „Walcarkę do walcowania pierścieni i sposób walcowania pierścieni”. Doktorantka jest jego współautorem). Stanowisko to umożliwia wychyłanie trzpienia w szerokim zakresie kątów – konstrukcyjnie od około -7° do $+7^\circ$ – jak również realizację cyklicznego ruchu wahliwego trzpienia w trakcie walcowania. Walcarka jest wyposażona w układ pomiarowy rejestrujący w czasie rzeczywistym przemieszczenia narzędzi oraz siły i momenty działające na walec i trzpień, co pozwala na dokładną analizę zjawisk zachodzących podczas kształtowania pierścienia.

W celu lepszego poznania procesu przed badaniami eksperymentalnymi przeprowadzono modelowanie MES w programie QForm z wykorzystaniem dedykowanego modułu Ring Rolling dla trzpienia w pozycji pionowej (kąt pochylenia trzpienia wynosił 0°). Wstępne badania numeryczne dla założonego zakresu prędkości przemieszczenia się trzpienia wykazały, że w zakresie jego przemieszczenia się $4 \div 1$ mm/1 obrót pierścienia, następuje utrata prawidłowej geometrii kształtowanego pierścienia. Następuje wówczas wyraźne wciskanie się trzpienia walcarki w kształtowany pierścień, co jest wynikiem zbyt dużej jego prędkości przemieszczania. Dodatkowo widać było przemieszczanie się materiału pierścienia na boki podczas kształtowania pierścienia. Poprawny kształt pierścienia uzyskano przy prędkości kształtowania $0,7$ mm/1 obrót pierścienia. Uzyskano wówczas z symulacji finalną średnicę zewnętrzną ok. 230 mm (zgodnie z założeniem) przy zachowaniu wysokości 50 mm. Grubość ścianki zmalała z ~ 40 mm do ok. 18 mm, co odpowiada oczekiwanemu efektowi procesu. Te wyniki posłużyły do wyznaczenia parametrów procesu w eksperymentach – zdecydowano się na wolny posuw trzpienia ($\sim 0,7$ mm na obrót) oraz brak redukcji wysokości w celu zapewnienia stabilnego kształtowania pierścieni. Wyniki symulacji pokazały również spadek temperatury pierścienia podczas procesu kształtowania od 480 do 440 °C.

Następnym etapem były badania eksperymentalne dla trzpienia niepochyłonego z zachowaniem stałej wysokości pierścienia oraz redukcją grubości ścianki, co pozwoliło na weryfikację poprawności założeń przyjętych do symulacji numerycznych. Poprawny kształt pierścienia uzyskano dopiero przy parametrach odpowiadających przemieszczeniu trzpienia $0,4$ mm/obr i czasie procesu 70 s, przy prędkości obrotowej walca głównego $38,2$ mm/obr. Efektem badań wstępnych były pierścienie o średnicy

końcowej około 230 mm i wysokości 50 mm, które stanowiły punkt wyjścia do dalszych badań doświadczalnych.

Następnie do procesu kształtowania wprowadzono dwie kolejne zmienne w celu sprawdzenia ich wpływu na proces kształtowania pierścieni:

- redukcja wysokości o 5 mm i 10 mm, (odpowiednio 10% i 20%);
- ustawienie trzpienia kształtującego 0° (ustawienie pionowe), pochylonego o- 2° , 4° i 6° .

Badania wykazały, że pierścienie bez widocznych wad geometrycznych można uzyskać przy redukcji wysokości o 5 mm. Przy redukcji o 10 mm widać wgłębienie na powierzchni cylindrycznej pierścienia. Jest to efektem zbyt dużej siły tarcia między wałcami stożkowymi, a kształtowanym pierścieniem, przez co materiał ma ograniczoną możliwość płynięcia w kierunku obwodowym, co skutkuje zawijaniem się materiału na zewnętrznej powierzchni pierścienia (wada ta nazywana jest „cavity”). W przypadku pierścienia kształtowanego z trzpieniem pod kątem 6° konieczne było zatrzymanie procesu ze względu na kolizję narzędzi.

Przebieg momentu dla trzpienia pochylonego o 2° na wale głównym charakteryzuje się łagodnym narastaniem, osiągnięciem wartości maksymalnej na poziomie około 32% momentu, po czym zaczyna maleć do 12 % w wyniku zmniejszenia powierzchni kontaktu (zmiany wysokości pierścienia). Wahania momentu w strefie maksymalnych obciążeń są niewielkie, co świadczy o równomiernym rozkładzie sił w układzie narzędzi. Brak wyraźnych skoków wartości momentu wskazuje, że asymetryczny rozkład nacisków może stabilizować rozkład sił w procesie. Na zakończenie procesu następuje płynne obniżenie momentu do wartości początkowych.

Przy większym kącie pochylenia trzpienia (4°) wartość maksymalna momentu wynosi ok. 30% i jest zbliżona do wariantu z trzpieniem z kątem pochylenia 0° , tu jednak przebieg obciążenia cechuje się znacznie większą niestabilnością w fazie roboczej. Obserwowane oscylacje momentu świadczą o dominacji jednej strefy kontaktu trzpienia z materiałem i cyklicznym odciążaniu przeciwnej strony. Taki stan pracy zwiększa nierównomierność procesu oraz ryzyko lokalnych przeciążeń w układzie narzędzi.

Badania z trzpieniem wahlwym w czasie trwania procesu kształtowania o $\pm 1^\circ$ oraz $\pm 3^\circ$ wykazały możliwość uzyskania pierścienia o poprawnym kształcie. W przypadku oscylacji $\pm 3^\circ$ obserwuje się cykliczne, silne wahania momentu na trzpieniu. Trzpień górny wykazuje większą amplitudę momentu, natomiast trzpień dolny utrzymuje

się głównie w zakresie (ok. 20–40 Nm). Takie zmiany momentu nie rekomendują stosowania tak dużej amplitudy wahań trzpienia.

Po walcowaniu i ostudzeniu pierścieni przeprowadzono pomiary twardości oraz obserwacje mikrostruktury

Dla pierścienia walcowanego bez wychylenia trzpienia (0°) twardość wzdłuż wysokości była niemal stała – od powierzchni górnej do dolnej, z wyjątkiem stref przy samych krawędziach, gdzie twardość nieco spada. Podobnie było na szerokości pierścienia. Dla pierścienia z wychyleniem 2° odnotowano ogólnie nieco niższy poziom twardości w porównaniu z wariantem 0° . Co ciekawe, profil twardości wzdłuż wysokości próbki wykazał w tym przypadku lekki wzrost twardości od warstwy górnej do dolnej: od ok. 45 HV_{0,1} przy górnej powierzchni do ok. 52 HV_{0,1} przy dolnej powierzchni pierścienia. Taki nietypowy gradient tłumaczono zróżnicowanym chłodzeniem pierścienia po walcowaniu. Pomiar twardości przez grubość ścianki (na różnych wysokościach) dla wariantu 2° wykazał niższe bezwzględne wartości (rzędu 45–55 HV_{0,1}) niż dla 0° , zachowując podobny trend rozkładu – twardość rosła od wewnętrznej strony pierścienia do środka przekroju, po czym malała ku zewnętrznej stronie. Dla pierścienia wytworzonego z trzpieniem wychyleniem o 4° wartości twardości były najmniejsze na poziomie od 40 do 48 HV_{0,1}. Dla pierścieni wytworzonych za pomocą trzpienia wahlowego uzyskano bardziej jednorodne rozkłady twardości niż dla wcześniejszych prób oraz wyższe wartości. Dla trzpienia wahlowego $\pm 1^\circ$ uzyskano twardość z zakresu od 54 do 64 HV_{0,1} podczas gdy dla trzpienia wahlowego $\pm 3^\circ$ w zakresie 65–72 HV_{0,1}.

W odkształconym pierścieniu dla walcowanego bez wychylenia trzpienia (0°) procesy odbudowy mikrostruktur przebiegają w bardzo zróżnicowany sposób, występują obszary bardzo mocno wyzdrowienie podczas gdy są miejsca, gdzie obserwuje się miejscowe efekty związane z wpływem odkształcenia plastycznego na mikrostrukturę i efekty rekrytalizacji. Lokalnie dochodzi do zwiększenia gęstości dyslokacji w ziarnach i ich przegrupowania. Tworzą się nieregularne układy komórek dyslokacyjnych. Dominują procesy zdrowienia.

W mikrostrukturze pierścieni kształtowanych za pomocą trzpienia pochyłonego o kat 4° , dla którego stopień odkształcenia jest znacznie większy niż dla pierścieniu walcowanego bez wychylenia trzpienia zaobserwowano pełną rekrytalizację mikrostruktury. Widoczne jest kierunkowe ułożenie ziaren świadczące o płynięciu

materiału pod kątem w wyniku kształtowania materiału za pomocą trzpienia wychylonego.

Potencjał wdrożeniowy:

W ramach przygotowań do wdrożenia procesu technologicznego walcowania pierścieni ze stopu aluminium 6082 opracowano zestaw parametrów operacyjnych umożliwiających wytwarzanie wyrobów o dużych średnicach przy jednoczesnym zapewnieniu stabilnych warunków kształtowania materiału. Proces realizowano z wykorzystaniem wsadów o wymiarach 160×60 mm oraz 160×50 mm, przy przyjętym gnioście 0,4 mm/obr i całkowitym czasie trwania cyklu równym 280 s. Pierścień o największej średnicy (420 mm) wzbudził szczególne zainteresowanie ze strony potencjalnego odbiorcy.

Podsumowując, praca ma zarówno wymiar poznawczy, jak i praktyczny. Nowatorska walcarka z wychylnym trzpieniem zademonstrowała możliwość precyzyjnej kontroli procesu kształtowania pierścieni ze stopów lekkich w warunkach laboratoryjnych, co stanowi punkt wyjścia do wdrożenia tej metody w przemyśle. Pierścienie uzyskane nową metodą odznaczają się jednorodną mikrostrukturą i wysoką dokładnością wymiarową, spełniając wymagania wymagających sektorów. W przyszłości technologia ta może zostać rozwinięta o inteligentne systemy sterowania i skalowana do większych instalacji przemysłowych, umożliwiając elastyczną produkcję szerokiego asortymentu pierścieni o różnych rozmiarach i właściwościach. Rezultaty rozprawy dowodzą, że kontrola kąta pochylenia trzpienia jest efektywnym narzędziem poprawy procesu walcowania pierścieni, otwierając drogę do wdrożenia ulepszonej technologii w praktyce przemysłowej.

Literatura

- [1] R. Sypniewski, *Walcownictwo i ciągarstwo*, Wydawnictwo szkolne i pedagogiczne, Warszawa 1975 r , str.7-11
- [2] Erden Eru, Rajiv Sjiwpuri, A summary of ring rolling technology – Recent trends in machines, processes and production lines, *Int. J. Mach Tools Manufact.* Vol.32 No 3. Pp 379-398. 1992
- [3] Xuechao Li, Lianggang Guo, , Yifan Wang , and Lei Liang, Rolling paths design assisted by target-temperature driven intelligent FE simulation of radial-axial ring rolling; *Manufacturing Rev.* 6, 20 (2019) © X. Li et al., Published by EDP Sciences 2019 International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17-22

September 2017, Cambridge, United Kingdom
<https://doi.org/10.1051/mfreview/2019019>

- [4] G.A. Berti, L. Quagliato n , M. Monti, Set-up of radial–axial ring-rolling process: Process worksheet and ring geometry expansion prediction, *International Journal of Mechanical Sciences* , , August 2015, Pages 58-71, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.05.004>
- [5] <http://www.forgis.pl/pl/pierscienie-kuto-walcowane-91>
- [6] <https://www.alekvs.com/ring-rolling-for-bearing-rings-cold-to-radial-axial-forming/>
- [7] P. Surdacki, A. Gontarz , G. Winiarski , G. Samołyk; Research of the Tool Velocity and Product Shape Aspects, *Advances in Science and Technology Research Journal* 2021, 15(4), 352–363 <https://doi.org/10.12913/22998624/143269>
- [8] Lange, K. (1985). *Handbook of Metal Forming*. New York: McGraw-Hill.
- [9] J. M. Allwood, A. E. Tekkaya, T. F. Stanistreet: The Development of Ring Rolling Technology - Part 2: Investigation of Process. Behaviour and Production Equipment. *Steel Research International* 76(7): July 2005, s. 491-507
- [10] McInnesRolledRings.com; Guidebook to rolled rings
- [11] Julian M. Allwood, A. Erman Tekkaya, Timothy F. Stanistreet, “The Development of Ring Rolling Technology”, *Steel Research* 76(2):111-120 · February 2005
- [12] G. Moussa and J. B. Hawkyard, *Int. J. Mech. Sci.* 28, 841-851 (1986).
- [13] P. F. EganN, *Proc. 14th Int. Machine Too/Design and Research Conf.*, Manchester, U.K. Vol. 14, p. 759 (1973).
- [14] J.B. Hawkyard i in.: *Int. J. Mechanical Sciences*, 15 (1973), nr 11, 873-893.
- [15] A. Kluge: *Ringwalzen von Titanlegierungen*, RWTH Aachen, Aachen, 1997.
- [16] U. Koppers, et al.: *Stahl und Eisen*, 106 (1986), No. 14-15,789-795.
- [17] A. Lieb, H. Wiegels, R. Kopp: *Stahl und Eisen*, 110 (1990), No.9, 8387.
- [18] A. Lieb: *Minimierng von Formfehlern beim Ringwalzen*, RWTH Aachen, Aachen, 1992.
- [19] https://www.qform3d.com/products/qformringrolling?utm_source=chatgpt.com
- [20] <https://ec-e.pl/oprogramowanie/programy/simufact-forming>
- [21] Sun Zhi-chao, Yang He, Ou Xin-zhe, Thermo-mechanical coupled analysis of hot ring rolling proces, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 18(2008) 1216-1222
- [22] Li, X.; Guo, L.; Wang, F., On a Plastic Instability Criterion for Ultra-Large Radial-Axial Ring Rolling Process with Four Guide Rolls. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, vol 35, 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.07.026>
- [23] Lohmar, C.J. Cleaver, J.M. Allwood; The influence of constraint rolls on temperature evolution and distribution in radial ring rolling; *Journal of Materials Processing Technology* 282 (2020) 116663
- [24] Xinghui Han, Lin Hua i Siwei Yang; A novel polygonal ring rolling method; *Journal of Manufacturing Processes w roku 2020 (Vol. 59, s. 389–402)*.
- [25] Lin Hua, Jiadong Deng, Dongsheng Qian, Zhe Chen, Jun Shao; Effects of rolling curve on recrystallization evolution during hot radial-axial ring rolling of super lager alloy steel ring; *Procedia Manufacturing* 15 (2018) 72–80
- [26] Cristian Cappellini, Claudio Giardini , Sara Bocchi, A multi-objective optimization workflow of ring-rolling process parameters based on production energy

and time, *Procedia CIRP* Volume 122, 2024, Pages 683-688
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.095>

- [27] Dan Xie, Qiu-yue Ouyang, Luo-yu He, Wu-jiao Xu, Feed Curves for Controlling Ring Rolling Stability in Large-Scale Flat Ring Rolling Process Materials (Basel), 2023 Apr 26;16(9):3383. doi: 10.3390/ma16093383
- [28] Xie, Yu Wang, Qiuyue Ouyang, Luoyu He, Wujiao Xu, Analytical calculation model for radial-axial coordinated feed strategy in large-scale flat ring rolling based on ultimate bending moment, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 319, October 2023, 118072
- [29] Dan Xie, Yu Wang, Qiuyue Ouyang, Luoyu He, Wujiao Xu, Analytical calculation model for radial-axial coordinated feed strategy in large-scale flat ring rolling based on ultimate bending moment, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 319, October 2023, 118072
- [30] Dan Xie, Qiuyue Ouyang, Yu Wang, Luoyu He, Wujiao Xu, Radial-axial feeding process design for large-scale flat ring by quantitative estimation of ring roundness error, *Thin-Walled Structures*, Volume 189, August 2023, 110887
- [31] Mirko Gröper*, Marten Quadfasel, David Bailly, Gerhard Hirt, Rolling Eccentric Steel Rings on an Industrial Radial-Axial Ring Rolling Mill, *J. Manuf. Mater. Process.*2024, 8(2), 75;<https://doi.org/10.3390/jmmp8020075>
- [32] Xinglin Zhu, Erting Dong, Xiaomin Qiao, Dong Liu, Evaluation Methods and Coupled Optimization at Macro- and Micro-Scales for Profiled Ring Rolling of Inconel718 Alloy, *Materials* 2024, 17(18), 4538;<https://doi.org/10.3390/ma17184538>
- [33] Zhen Wei, He Jiang, Jianxin Dong, Effect of temperature and strain on microstructure evolution of GH4169 superalloy ring forging during ring rolling, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 1040, 23 September 2025, 183503
- [34] S. Pressas, Spyros Papaefthymiou, Dimitrios E. Manolakos, Evaluation of the roll elastic deformation and thermal expansion effects on the dimensional precision of flat ring rolling products: A numerical investigation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 117, May 2022, 102499
- [35] Xiaoluo Gu, Qianzhi Peng, Hongxing Lu, The Influence of Initial Billet Design on the Ring Rolling Deformation and Residual Stress Distribution of GH3044 Alloy, *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials (IJAMM)*
- [36] Wei Feng, Peng Zhao, Buckling Defect Optimization of Constrained Ring Rolling of Thin-Walled Conical Rings with Inner High Ribs Combining Response Surface Method with FEM, *Metals*2024, 14(4), 378;<https://doi.org/10.3390/met14040378>
- [37] Xuechao LI Lianggang GUO, Fengqi WANG, On a plastic instability criterion for ultra-large radial-axial ring rolling process with four guide Rolls, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 35, Issue 6, June 2022, Pages 391-406
- [38] Zhou J, Wang FL, Wang MH, Xu WJ (2011) Study on forming defects in the rolling process of large aluminum alloy ring via adaptive controlled simulation. *Int J Adv Manuf Technol* 55(1-4):95–106
- [39] Il Yeong Oh, Tae Woo Hwang, Young Yoon Woo, Hye Jeong Yun, Young Hoon Moon Analysis of defects in L-section profile ring rolling; *Procedia Manufacturing* 15 (2018) 81–88
- [40] Jong-Tae Jinn, Wei-Tsu Wu, Finite Element Modeling of Ring Rolling Processes AIP Conference Proceedings, Volume 1252, Issue 1, 1063/1.3457636

- [41] Liang L., L. Guo, X. Li, W. Yang. 2018. “Intelligent simulation for real – timely – force – controlled radial – axial rolling process of supersized aluminium alloys rings”. *Procedia Manufacturing* 15: 105–112.
- [42] Lei Liang, Lianggang Guo, Jiadian Yang, Hua Zhang, Formation mechanism and control method of multiple geometric defects in conical-section profiled ring rolling, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 35, Issue 6, June 2022, Pages 391-406
- [43] Giorleo, L. & Ceretti, Elisabetta & Giardini, Claudio. (2013). Energy consumption reduction in Ring Rolling processes: A FEM analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*. 74. 55-64.
- [44] QI, Huiping & LI, Yongtang. (2017). Research Status and Developing Trends on the Ring Rolling Process of Profile Ring Parts. *Procedia Engineering*. 207. 1260-1265.
- [45] Allwood, JM & Kopp, R & Michels, D & Music, Omer & Oztop, M & Stanistreet, TF & Tekkaya, A. & Tiedeman, I. (2005). The Technical and Commercial Potential of an Incremental Ring Rolling Process. *CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 54. 233-236.
- [46] Anjami, Nassir & Basti, Ali. (2010). Basti, A.: Investigation of rolls size effects on hot ring rolling process by coupled thermo-mechanical 3D-FEA. *Journal of Materials Processing Technology* 210, 1364-1377. *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*. 210.
- [47] Wu Qiong, Wu Jian, Zhang Yi-Du, Gao Han-Jun, David Hui “Analysis and homogenization of residual stress in aerospace ring rolling process of 2219 aluminum alloy using thermal stress relief method” *International Journal of Mechanical Sciences*, Volumes 157–158, July 2019, Pages 111-118
- [48] Hailin He, Youping Yi, Shiquan Huang, Yuxun Zhang “An improved process for grain refinement of large 2219 Al alloy rings and its influence on mechanical properties”, *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 35, Issue 1, January 2019, Pages 55-63
- [49] Jie Zhou, Fenglin Wang, Meng-han Wang, Wu-jiao Xu, “Study on forming defects in the rolling process of large aluminum alloy ring via adaptive controlled simulation”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 55(1):95-106 · July 2011
- [50] R. C. KEETON, *ASM Metals Handbook*, Vol. 14: Forming and Forging, 9th Edn, pp. 108-127. ASM International Metals Park, Ohio, U.S.A. (1988).
- [51] Altan, T., Oh, S. I., & Gegel, H. L. (1983). *Metal Forming: Fundamentals and Applications*. Metals Park, OH: American Society for Metals.
- [52] Groche, P., & Fritzen, F. (2016). Ring rolling – state of the art and recent developments. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>
- [53] Kopp, R., & Engel, U. (2004). Advances in ring rolling technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 150(1–2), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.030>

- [54] Wong, C. C., Dean, T. A., & Lin, J. (2003). Ring rolling: advances and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(3), 361–371. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00388-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00388-2)
- [55] Altan, T., Oh, S. I., & Gegel, H. L. (1983). *Metal Forming: Fundamentals and Applications*.
- [56] Jäger, A., & Standfuss, J. (2012). Industrial applications of ring rolling. *Steel Research International*, 83(9), 842–849. <https://doi.org/10.1002/srin.201200001>
- [57] Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [58] H. QI, Y. LI: Research status and developing trends on the ring rolling process of profile ring parts. *Procedia Engineering* 207 (2017), s. 1260 – 1265.
- [59] Hua, L., Qian, D. S., and Pan, L. B.: Deformation Behaviors and Conditions in L-Section Profile Cold Ring Rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 11, 2009, s. 5087-5096.
- [60] Uniwersytet w Aachen: <https://www.ibf.rwth-aachen.de/go/id/rgsg/lidx/1>
- [61] Mirko Gröper, Marten Quadfasel, David Bailly, Gerhard Hirt, Rolling Eccentric Steel Rings on an Industrial Radial–Axial Ring Rolling Mill, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 8(2), 75; <https://doi.org/10.3390/jmmp8020075>
- [62] P. Boucly, J. Oudin, Y. Ravalard, Simulation of ring rolling with new wax-based model materials on a flexible experimental machine, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 16, nr 2, 1988, s. 119–143. DOI: 10.1016/0378-3804(88)90156-8
- [63] https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/528113-largest-ring-rolled-steel-ring?utm_source=chatgpt.com
- [64] F. Wang, W. Yin, Y. Niu, X. Ren, M. Sun, B. Xu, L. Zhao, An innovation forging technology for the world's largest austenitic stainless steel ring, *La Metallurgia Italiana*, International Journal of the Italian Association for Metallurgy, May 2024 s.22-33
- [65] Y.M. Zhao, D.S. Qian, Effect of rolling ratio on groove-section profile ring rolling, *J. Mech. Sci. Technol.* 24 (2010), s.1679-1687.
- [66] J. Song, Y.Y. Liu, J.D. Yang et al.: Impact of preformed blank dimension to contour ring, *Proceeding of the 13th Seminar on Global Chinese Plastic Technology*, 2013.10.15-16.
- [67] <https://pit.lukasiewicz.gov.pl/uslugi/obrobka-objetosciowa-2>
- [68] X.Q. Chen, L.G. Guo, H. Yang et al.: Study on blank optimization design of conical ring rolling process for TC4 titanium alloy by numerical simulation, *J. Plasticity Eng.* 21 (2014) s. 25-31.
- [69] X.L. Zhu, D. Liu, Y. H. Yang et al.: Effects of blank dimension on forming characteristics during conical-section ring rolling of Inco718 alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 84 (2016) s. 2707-2718.

- [70] B. Pachutko, S. Ziółkiewicz: Badania metalograficzne odlewniczego stopu magnezu AZ91 po współbieżnym wyciskaniu. *Obróbka Plastyczna Metali* Vol. XXIV Nr 2 (2013) s.119-129
- [71] Y. H. Wei, Q. D. Wang, Y. P. Zhu, H. T. Zhou, W. J. Ding, Y. Chino, M. Mabuchi: Superplasticity and grain boundary sliding in rolled AZ91 magnesium alloy at high rates. *Materials Science & Engineering* (2003) s. 107-115
- [72] H. Ding, L. Liu, S. Kamado, W. Ding, Y. Kojima: Study of the microstructure, texture and tensile properties of as-extruded AZ91 magnesium alloy, *Journal of Alloys and Compounds* (2008) s. 400-406.
- [73] D.-S. Qian, Lin Hua, L.-B. Pan.: Blank design optimisation for T-section ring rolling. *Ironmaking & Steelmaking* 36(6) (2009), s.462-469
- [74] L.Y Li, X. Li, J. Liu et al.: Effects of roll sizes on uniformity of strain and variation of configuration in cold-closed T-shaped rolling process of HE30 aluminum alloy ring, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 86 (2016) s.191-201.
- [75] L.Y. Li, X. Li, J. Liu et al.: A quantitative planning method of variable feed rates for cold profiled ring rolling process, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 86 (2016) s. 2585-2593.
- [76] K. H. Lee, D. Ch Ko, D. H Kim, S. B Lee, N. M Sung, B. M Kim: Design Method for Intermediate Roll in Multi-Stage Profile Ring Rolling Process: The Case for Excavator Idler Rim, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* vol. 15, no. 3 (2014), s.503-512
- [77] M. Park, Ch. Lee, J. Lee, I. Lee, M. Joun, B. Kim, K. Lee: Development of L-Sectioned Ring for Construction Machines by Profile Ring Rolling Process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* Vol. 17, No. 2 (2016) s.233-240.
- [78] H. QI, Y. LI: Research Status and Developing Trends on the Ring Rolling Process of Profile Ring Parts, *Procedia Engineering* 207 (2017) s.1260–1265
- [79] Guo, Y.N., Ding, F.S., Li, Y.T., Qi, H.P: Multiscale modeling for 42CrMo ring during blank-casting and rolling combined forming process. *J. Mech. Eng.* 50(14) (2014), s.81–88.
- [80] J. Guo, D. Qiana, J. Dengb: Grain refinement limit during hot radial ring rolling of as-cast GCr15 steel, *Journal of Materials Processing Technology* 231 (2016) s.151–161.
- [81] H. He, Y. Yi, S. Huang, Y. Zhang: An improved process for grain refinement of large 2219 Al alloy rings and its influence on mechanical properties. *Journal of Materials Science & Technology* 35 (2019) s.55–63
- [82] W. Guo, X. Chen, Effects of the Rolling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of 2219 Al–Cu Alloy Rings, *Metals and Materials International*, 2024 (online 2023)
- [83] H. Gao, Y. Hang, W.D. Nix, J.W. Hutchinson, Mechanism-based strain gradient plasticity - I. Theory, *J. Mech. Phys. Solids.* 47 (1999) 1239–1263.

Spis rysunków

Rys. 1. Model procesu walcowania pierścieni (opracowanie własne).....	9
Rys. 2. Proces walcowania pierścieniowego (ring rolling): a) podgrzewania, b) kucie i spęczanie kęsa; (c) dziurawienie półfabrykatu; (d) półfabrykat w kształcie pierścienia; (d) początek procesu walcowania, (e) koniec procesu walcowania pierścieni po osiągnięciu pożądaných wymiarów [10]	11
Rys. 3. Wgłębienie „cavity” na powierzchni walcowanego pierścienia [11]	12
Rys. 4. Wada rybi ogon z angielskiego „fishtail” [11]	13
Rys. 5. Zadzioiry, wada typu „flash”[11].....	13
Rys. 6. Wady przekroju podczas walcowania a), b), c), d) [11]	14
Rys. 7. Model 3D FE dla procesu promieniowo- osiowego (RARR) z czterema rolkami prowadzącymi [22]	15
Rys. 8. Porównanie zespołów z geometrią narzędzi do pierścieni: a) grubych b) cienkich [23]	16
Rys. 9. Model symulacji kształtowania wyrobu wielokątnego (a), pierścień otrzymany po procesie (b)[24]	17
Rys. 10. Pierścienie odpadowe o zniekształconym kształcie w rzeczywistej produkcji [37].....	19
Rys. 11. Pierścień o przekroju stożkowym i typowe wady geometryczne w CSPRR: (a) pierścienie osłonowe stosowane w silnikach lotniczych i turbinach gazowych; (b) średnica zewnętrzna dużego końca nie osiąga wartości docelowej; (c) średnica zewnętrzna dużego końca przekracza wartość docelową; (d) przechylenie pierścienie oraz (e) wada okrągłość [42].....	20
Rys. 12. Pierścień z rowkiem przeznaczony do przemysłu lotniczego[47]	21
Rys. 13. Model numeryczny kształtowania pierścienia o profilu L (a), końcowy model wsadu (b) oraz wyrób rzeczywisty (c) [50].....	22
Rys. 14. Metoda połączonego procesu odlewania i walcowania pierścieniowego[52]	23
Rys. 15. Stanowisko badawcze w Aachen [57]	25
<i>Rys. 16. Walcarka pionowa, Politechnika Lubelska [65]</i>	<i>26</i>
Rys. 17. Budowa walcarki laboratoryjnej 1- zespół walca głównego, 2 – zespół trzpienia kształtującego, 3 – zespół walców stożkowych, 4 – zespół walców centrujących, 5 – korpus; a) model 3D, b) widok 2D półprzekrój	34
Rys. 18. Zespół walca głównego	35
Rys. 19. Zespół trzpienia kształtującego	36
Rys. 20. Zespół walców stożkowych.....	36
Rys. 21. Zespół walców centrujących zamocowanych do korpusu walca głównego.	37
Rys. 22. Korpus walcarki laboratoryjnej.....	37
Rys. 23. Widok walcarki laboratoryjnej wykonanej w metalu	42
Rys. 24. Model poglądowy ustawienia walców: 1- walec główny, 2 – trzpień kształtujący, 3 –walce centrujące, 4 – walce stożkowe, 5-pierścień wsadowy	43
Rys. 25. Sposoby pracy trzpienia podczas walcowania: a) trzpień prosty; b) trzpień wychylony dodatnio; c) trzpień wychylony ujemnie; d) ruch wahliwy	43
Rys. 26. Widok panelu sterującego procesem walcowania	44
Rys. 27. Pulpit operatora z widocznymi parametrami procesu i podglądem na pozycje poszczególnych walców	44

Rys. 28. Zdjęcie pulpitu z widocznymi zapisami określonych pozycji dla poszczególnych wałów	45
Rys. 29. Zdjęcia z obserwacji mikroskopowych materiału wyjściowego stopu aluminium 6082 pobranej z pręta dla różnych powiększeń a), b) i c) d) środek krążka	47
Rys. 30. Materiał badawczy wraz z przygotowanymi próbkami do badań	47
Rys. 31. Układ narzędzi przy walcowaniu pierścienia przyjęty do modelowania procesu wykonany w programie SolidWorks.....	48
Rys. 32. Wsad do walcowania z nałożoną siatką tetraedryczną	49
Rys. 33. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 0,7 mm na obrót kształtowanego pierścienia	50
Rys. 34. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 1 mm na obrót kształtowanego pierścienia	51
Rys. 35. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 2 mm na obrót kształtowanego pierścienia	51
Rys. 36. Krzywa prędkości przyrostu średnicy pierścienia odpowiadająca gniotowi 4 mm na obrót kształtowanego pierścienia	51
Rys. 37. Widok geometrii pierścieni otrzymanych z symulacji numerycznych procesu walcowania z różnymi wartościami gniotów (prędkościami przemieszczania się trzpienia): a) 4 mm/1 obr. pierścienia; b) 2 mm/obr. pierścienia; c) 1 mm/obr. pierścienia; d) 0,7 mm/obr pierścienia;	52
Rys. 38. Przekrój pierścienia otrzymanego dla prędkości przemieszczenia trzpienia 0,7 mm/1 obrót pierścienia.	53
Rys. 39. Rozkład temperatury pierścienia dla prędkości przemieszczania trzpienia 0,7 mm/1	53
Rys. 40. Rozkład naprężeń średnich pierścienia dla prędkości przemieszczania trzpienia 0,7 mm/1 obrót	54
Rys. 41. Piec laboratoryjny Nabertherm z programowalnym schematem nagrzewania	55
Rys. 42. Zdjęcia pierścieni otrzymane z badań wstępny: a) pierścień 1, b) pierścień 2 c) pierścień 3 zgodnie z tabelą 2	56
Rys. 43. Wykres zmiany średnicy w czasie.....	57
Rys. 44. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie	57
Rys. 45. Wykres zmiany momentu na trzpieniu w czasie.....	58
Rys. 46. Wykres zmiany obciążenia momentem wyrażona w % na wale głównym w czasie	59
Rys. 47. Widok narzędzi podczas kształtowania pierścienia z trzpieniem ustawionym pod kątem 6° - widoczna kolizja narzędzi	61
Rys. 48. Przykładowe pierścienie otrzymane przez kształtowanie z trzpieniem w ruchu wahliwym dla a) $\pm 1^\circ$ oraz b) $\pm 3^\circ$	63
Rys. 49. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla trzpienia pochylenia o kąt 0°	64
Rys. 50. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla kąta pochylenia 2°	65
Rys. 51. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla kąta pochylenia 4°	65
Rys. 52. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla wahlowego ruchu trzpienia o $\pm 1^\circ$	66
Rys. 53. Wykres przemieszczenie trzpienia w czasie dla wahlowego ruchu trzpienia o $\pm 3^\circ$	66
Rys. 54. Wykres zmiany momentu na trzpieniu (pochylenie 0°) w czasie.....	67
Rys. 55. Wykres zmiany momentu na trzpieniu (pochylenie 2°) w czasie	68

Rys. 56. Wykres zmiany momentu na trzpieniu (pochylenie 4°) w czasie	68
Rys. 57. Wykres zmiany momentu na trzpieniu – ruch wahliwy ±1° w czas	69
Rys. 58. Wykres zmiany momentu na trzpieniu – ruch wahliwy ± 3° w czasie	70
Rys. 59. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % (dla trzpienia niepochyłonego) ...	71
Rys. 60. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia pochyłonego o 2° ..	71
Rys. 61. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia pochyłonego o 4° ...	72
Rys. 62. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia wahliwego +/- 1° ..	72
Rys. 63. Wykres zmiany momentu na wale głównym wyrażony w % dla trzpienia wahliwego +/- 3° ..	73
Rys. 64. Wykres momentu na walcach stożkowych dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 0°	74
Rys. 65. Wykres momentu na walcach stożkowych dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 2°	74
Rys. 66. Wykres momentu na walcach stożkowych dla pierścienia z trzpieniem pod kątem 4°	75
Rys. 67. Wycięte próbki do realizacji: a) pomiarów twardości, b) badań mikrostruktury	76
Rys. 68. Próbka z zaznaczonymi ścieżkami i kierunkiem pomiaru twardości	76
Rys. 69. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia przez całą wysokość próbki ścieżka 1 – trzień o kącie pochylenia 0°	76
Rys. 70. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia przez szerokość według ścieżki 2, 3 i 4 - trzień o kącie pochylenia 0°	77
Rys. 71. Próbki z zaznaczonymi ścieżkami i kierunkiem pomiaru twardości	77
Rys. 72. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia przez całą wysokość według ścieżki 1 trzień pochyłony o kąt 2°	78
Rys. 73. Rozkład twardości próbki wykonany na przekroju pierścienia przez szerokość pasma według ścieżki 2, 3 i 4 - trzień wychylony o kąt 2°	78
Rys. 74. Rozkład twardości próbki wykonany na przekroju pierścienia przez całą wysokość według ścieżki 1 - trzień wychylony o kąt 4°	79
Rys. 75. Rozkład twardości próbki wykonany na przekroju pierścienia przez szerokość pasma według ścieżki 2, 3 i 4 trzień wychylony o kąt 4°	79
Rys. 76. Wycięta próbka do realizacji pomiarów twardości wraz ze schematem ścieżek pomiaru	80
Rys. 77. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia kształtowanego z trzpieniem wahliwym +/-1° w 2 miejscach pomiarowych.	80
Rys. 78. Rozkład twardości wykonany na przekroju pierścienia kształtowanego z trzpieniem wahliwym +/-3° w 2 miejscach pomiarowych.	81
Rys. 79. Pierścień z wyciętymi próbkami do badań	83
Rys. 80. Przekrój poprzeczny próbek z zaznaczonymi miejscami badań mikrostruktury wytworzonej za pomocą a) trzpienia niewychylonego oraz b) trzpienia wychylonego pod kątem +4°	83
Rys. 81. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia pod kątem 0° a) góra b) środek oraz c) dół próbki.	84
Rys. 82. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 4° a) góra b) środek oraz c) dół próbki.	85
Rys. 83. Mikrostruktura wydzielen pierwotnych dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° a) pęknięte oraz b) przemieszczone	86

Rys. 84. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°	86
Rys. 85. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°	87
Rys. 86. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° obraz uzyskany w jasnym polu z dyfrakcją z tego obszaru.....	88
Rys. 87. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° obraz uzyskany w jasnym polu z dyfrakcją linii Kikuchi'ego z poszczególnych podziarn.....	88
Rys. 88. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0° obraz uzyskany w jasnym polu z dyfrakcją linii [100] z obszaru podziarna.	89
Rys. 89. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia niewychylonego	89
Rys. 90. Mikrostruktura dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 4°	90
Rys. 91. Obraz uzyskany w jasnym polu oraz dyfrakcja z tego obszaru dla próbki kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego pod kątem 0°.....	91
Rys. 92. Obraz uzyskany w jasnym polu wraz z dyfrakcją linii Kikuchi'ego z poszczególnych podziarn.	91
Rys. 93. Wydzielenie w mikrostrukturze w próbce kształtowanej za pomocą trzpienia wychylonego...	92
Rys. 94. Analiza EDS składu chemicznego wydzielenia 1 z Rys. 93.	92
Rys. 95. Dyfrakcja z wydzielenia 1 z Rys. 93, aluminium (kolor biały) Mg ₂ Si (kolor czerwony).	92
Rys. 96. Analiza EDS składu chemicznego wydzielenia 1 z Rys. 93	93
Rys. 97. Dyfrakcja z wydzielenia 2 z Rys. 93, aluminium (kolor biały) Al _{193.38} Cu _{6.02} Fe ₂₄ Si _{16.2} (kolor czerwony).....	93
Rys. 98. Analiza EDS składu chemicznego wydzielenia 1 z Rys. 93	93
Rys. 99. Dyfrakcja z wydzielenia 2 z Rys. 93, aluminium (kolor biały) Al ₂ Cu (kolor czerwony) (kolor czerwony).....	94
<i>Rys. 100. Mapa EBSD obrazująca mikrostrukturę aluminium Al 6082 kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 0°. Odpowiadająca mapie odwrotna figura biegunowa.....</i>	<i>95</i>
Rys. 101. Rozkład udziału granic szerokokątowych i wąskokątowych dla pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 0°	95
Rys. 102. Rozkład wielkości parametru KAM dla pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 0°	96
Rys. 103. Mapa EBSD obrazująca mikrostrukturę aluminium 6082 kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego o kąt 4°. Odpowiadająca mapie odwrotna figura biegunowa.....	97
Rys. 104. Rozkład udziału granic szerokokątowych i wąskokątowych.....	98
Rys. 105. Rozkład wielkości parametru KAM pierścienia kształtowanego za pomocą trzpienia wychylonego	99
Rys. 106. Pierścienie - reprezentacyjne	100
Rys. 107. Schemat przeprowadzania pomiarów wytworzonych pierścieni	100