POLITECHNIKA RZESZOWSKA

im. Ignacego Łukasiewicza

WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA

Mgr inż. Aleksandra Wędrychowicz

Mechaniczne i mikrostrukturalne aspekty odkształcania plastycznego materiałów metalicznych w procesie wyciskania metodą KOBO

Praca Doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Romana Ewa Śliwa

Promotor pomocniczy: dr inż. Marek Zwolak

Rzeszów 2026

Rodzinie i najbliższym.

Spis treści

WPROWADZENIE 5

1. TEORETYCZNE PODSTAWY ZAGADNIENIA 8

1.1. METODY INTENSYWNEGO ODKSZTAŁCENIA PLASTYCZNEGO METALI I STOPÓW 9

1.2. ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE MATERIAŁÓW METALICZNYCH W RÓŻNYCH PROCESACH KOBO 10

1.3. CHARAKTERYSTYKA PROCESU WYCISKANIA KOBO. ROZWIĄZANIA TECHNOLOGICZNE. CECHY SZCZEGÓLNE PROCESU I JEGO WYROBÓW 18

2. METODY OCENY EFEKTÓW TRANSFORMACJI I IDENTYFIKACJI ELEMENTÓW STRUKTURY WEWNĘTRZNEJ METALI. 29

3. CECHY SZCZEGÓLNE WYBRANYCH STOPÓW ALUMINIUM 32

4. KRYTYCZNA ANALIZA STANU ZAGADNIENIA. WNIOSKI 38

5. TEZA I CEL PRACY 45

5.1. CEL I ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH 46

5.2. PROGRAM BADAŃ WŁASNYCH. MATERIAŁ I METODYKA 49

6. WYNIKI BADAŃ 57

6.1. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH WYCISKANYCH WYROBÓW 57

6.1.1. Analiza porównawcza wyników badań wyrobów ze stopu AlSi11 i Al 5083 88

6.2. BADANIA STRUKTURY POWIERZCHNI WYCISKANYCH PROFILI 104

6.2.1. Analiza wyników 106

6.3. BADANIA MIKROSTRUKTURY WYCISKANYCH STOPÓW ALUMINIUM ALSI11 ORAZ AL 5083 115

6.3.1. Analiza wyników 117

6.4. WPŁYW PARAMETRÓW PROCESU WYCISKANIA KOBO NA MAKSYMALNĄ SIŁĘ WYCISKANIA ALSI11 ORAZ AL 5083 176

6.4.1. Analiza wyników 177

7. WNIOSKI KOŃCOWE 190

8. LITERATURA 193

9. STRESZCZENIE 202

10. ABSTRAKT 205

Wykaz symboli i oznaczeń

Symbol	Znaczenie	Jednostka
λ	współczynnik wyciskania, stosunek pola przekroju poprzecznego wsadu do pola przekroju poprzecznego pręta	-
f	częstotliwość oscylacji matrycy	Hz
v	prędkość wyciskania lub przesuwu stempla	mm/s
F_{max}	maksymalna siła wyciskania	kN
d	średnica otworu roboczego matrycy lub wyciskanego pręta	mm
R_m	wytrzymałość na rozciąganie	MPa
$Rp_{0,2}$	umowna granica plastyczności przy trwałym odkształceniu 0,2%	MPa
Ra	średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości	µm
HV0,1	mikrotwardość Vickersa	HV

Wprowadzenie

Badanie nowych sposobów wytwarzania i formowania zaawansowanych materiałów metalicznych to obecnie jeden z najważniejszych kierunków rozwoju w inżynierii materiałowej. Celem jest wytwarzanie wyrobów o konkretnej geometrii, wysokiej jakości i dokładnie takich właściwościach, jakich wymaga projekt. Szczególnie ważne są technologie, które umożliwiają obróbkę materiałów trudnych w kształtowaniu. Pozwalają one nie tylko zmniejszyć liczbę potrzebnych operacji, ale też zmniejszyć siły nacisku i obniżyć ogólne koszty produkcji.

Standardowe procesy kształtowania materiałów o ograniczonej odkształcalności zazwyczaj wymagają podgrzewania wsadu, użycia dużych sił i prowadzenia całego procesu w kilku etapach. Niewłaściwy dobór parametrów technologicznych może prowadzić do nierównomiernego płynięcia materiału, powstawania pęknięć oraz pogorszenia jakości powierzchni. Dodatkowym problemem jest duże obciążenie cieplne i mechaniczne narzędzi, co skraca ich żywotność i podnosi koszty. Z tego względu poszukuje się metod modyfikacji warunków płynięcia materiału. Dąży się do uzyskania dużych odkształceń, ale przy jednoczesnym mniejszym zużyciu energii i mniejszym obciążeniu maszyn.

Jednym z takich rozwiązań jest proces wyciskania KOBO. To rozwinięcie tradycyjnego wyciskania, w którym matryca wykonuje dodatkowy, rewersyjny ruch obrotowy. Te oscylacje zmieniają drogę odkształcenia i wytwarzają dodatkowe naprężenia ścinające. W rezultacie zmieniają się warunki płynięcia materiału oraz stan naprężeń w porównaniu z wyciskaniem konwencjonalnym. Na przebieg całego procesu wpływa nie tylko temperatura, prędkość czy współczynnik wyciskania, ale też częstotliwość i kąt oscylacji matrycy.

Dotychczasowe badania pokazują, że metoda KOBO reaguje różnie w zależności od doboru materiału. Nawet przy tych samych parametrach, skład chemiczny, stan początkowy czy mikrostruktura metalu mają duże znaczenie. Proces ten może inaczej wpływać na rozmieszczenie składników fazowych, a także na to, jak dobre i jednorodne będą właściwości mechaniczne gotowego produktu.

Skuteczność procesu KOBO w kształtowaniu różnych metali została już potwierdzona w eksperymentach. Można go używać zarówno do produkcji gotowych wyrobów, jak

i półproduktów do dalszej obróbki. Pozwala on na tworzenie prętów, drutów i profili o różnych przekrojach, wykonanych np. ze stopów aluminium, magnezu, miedzi czy tytanu. Jako wsad można wykorzystać materiały lite, materiały warstwowe oraz odpady metaliczne, takie jak wióry. Bardzo ważna jest tu możliwość pracy ze stopami, które trudno odkształcać tradycyjnymi metodami. Chodzi zwłaszcza o sprawdzenie, czy za pomocą KOBO uda się ukształtować nowe, zaawansowane stopy aluminium, których nie da się obrobić klasycznymi sposobami.

Potencjał KOBO wynika też z tego, że wyciskanie można prowadzić w temperaturze otoczenia lub w temperaturze niższej niż stosowana w porównywanych procesach konwencjonalnych. Zmiana sposobu płynięcia materiału może zmniejszyć maksymalną siłę wyciskania, co przekłada się na mniejsze zużycie energii na podgrzewanie i mniej operacji przygotowawczych. Oczywiście efektywność zależy od precyzyjnego doboru częstotliwości oscylacji, kąta wychylenia matrycy, prędkości oraz geometrii narzędzi. Dlatego oceniając ten proces, uwzględnia się jakość wyrobu, wartości sił oraz stabilność procesu.

Bardzo praktyczne znaczenie mają tu stopy aluminium. Są one powszechnie stosowane w nowoczesnych konstrukcjach, bo są lekkie, wytrzymałe, odporne na korozję i łatwe do recyklingu. Jednak różne grupy tych stopów zachowują się zupełnie inaczej podczas obróbki. Niektóre można łatwo kształtować tradycyjnie, ale stopy odlewnicze, zawierające twarde i kruche składniki mikrostruktury, są w tym zakresie problematyczne.

W niniejszej pracy analizowano możliwości kształtowania różnych metali w warunkach procesu KOBO. Do badań wybrano dwa stopy aluminium o odmiennej charakterystyce. Pierwszy to odlewniczy stop AlSi11, którego tradycyjna obróbka jest trudna przez obecność kruchego krzemu. Drugi to stop Al. 5083, przeznaczony do przeróbki plastycznej, ceniony za wytrzymałość i odporność na korozję. Porównanie tych dwóch materiałów pozwoliło sprawdzić, jaka jest skuteczność procesu KOBO w zależności od struktury i właściwości wyjściowych metalu.

Głównym celem badań było sprawdzenie, jak częstotliwość oscylacji matrycy oraz współczynnik wyciskania wpływają na przebieg procesu, strukturę i właściwości mechaniczne produktów.

Analizowano siłę wyciskania, twardość, chropowatość powierzchni oraz zmiany w mikrostrukturze. Sprawdzono też, czy właściwości są jednorodne na początku, w środku i na końcu pręta, co umożliwia ocenę jednorodności wyrobu i stabilności procesu. Próbowano potwierdzić, czy metoda KOBO znajduje zastosowanie zarówno przy stopach przeznaczonych do obróbki, jak i przy tych odlewniczych, które wykazują mniejszą podatność na odkształcenie plastyczne. Wyniki te pomogą dobrać takie parametry, które obniżą siłę wyciskania i poprawią jakość powierzchni, zapewniając jednocześnie stabilne właściwości materiału. Szczególnie istotne jest to, że udało się uzyskać ciągłe pręty ze stopu odlewniczego AlSi11, co wskazuje na możliwość wykorzystania tego stopu również do wytwarzania wyrobów kształtowanych plastycznie

1. Teoretyczne podstawy zagadnienia

Metoda KOBO to jedna z najbardziej zaawansowanych technik intensywnego odkształcania plastycznego, wykorzystująca proces wyciskania. W skrócie polega ona na tym, że do klasycznego wyciskania dodaje się dodatkowe, oscylacyjne odkształcenia skrętne matrycy [1]. Tym, co wyróżnia ten proces, jest okresowy ruch obrotowy matrycy o niewielkiej amplitudzie i stosunkowo niskiej częstotliwości. Dzięki takiemu złożonemu i cyklicznie zmieniającemu się schematowi odkształcenia, warunki płynięcia materiału ulegają istotnej modyfikacji. Co ważne, może to prowadzić do obniżenia oporów odkształcenia w porównaniu do tradycyjnego, jednostajnego obciążenia [2]. Efekt reologiczny procesu KOBO wiąże się z ciągłą przebudową podstruktury dyslokacyjnej w trakcie pracy. Podczas obróbki materiał doświadcza złożonego stanu odkształcenia, gdzie jednocześnie działają siły ścinające i osiowe. To z kolei znacząco zmienia warunki plastycznego płynięcia i sprzyja korzystnym zmianom w mikrostrukturze materiału [3].

W przeciwieństwie do tradycyjnych metod intensywnego odkształcenia plastycznego, takich jak ECAP czy HPT, metoda KOBO pozwala na prowadzenie procesu w sposób ciągły. Dzięki temu można wytwarzać pręty i profile o znacznej długości, nie tracąc przy tym na intensywności odkształcenia [4]. Technologia KOBO sprawdza się w przeróbce metali lekkich, w tym stopów aluminium i magnezu, ale też w przypadku materiałów, które zazwyczaj mają ograniczoną podatność na odkształcanie plastyczne. [5] [6].

Z perspektywy mechaniki procesu kluczowe znaczenie ma wpływ oscylacyjnego momentu skręcającego na to, jak zachowuje się krzywa płynięcia materiału. W wyniku cyklicznych zmian naprężeń, bariery energetyczne ograniczające ruch dyslokacji, ulegają lokalnemu obniżeniu. Dzięki temu dyslokacje mogą łatwiej się przemieszczać i reorganizować swoją podstrukturę. W efekcie naprężenia ścinające, odpowiedzialne za powstawanie i rozwój pasm poślizgu, zmniejszają się. To sprawia, że materiał może płynąć plastycznie przy niższych naprężeniach uplastyczniających. Taki oscylacyjny ruch matrycy zmienia warunki przepływu materiału podczas wyciskania metodą KOBO. Pozwala to na prowadzenie procesu w temperaturze otoczenia i ma bezpośredni wpływ na właściwości mechaniczne gotowych wyrobów [7].

Ważnym elementem metody KOBO jest też sam fakt, że ruch matrycy jest oscylacyjny, co nadaje całemu odkształceniu charakter cykliczny. Regularna zmiana kierunku ruchu matrycy powoduje cykliczną relaksację naprężeń, dzięki czemu przez cały proces można utrzymać stosunkowo niski poziom naprężeń uplastyczniających. Jednocześnie ogranicza to lokalne nagrzewanie się materiału wywołane pracą odkształcenia. Co więcej, proces ten sprzyja tworzeniu się jednorodnej mikrostruktury, co jest jedną z największych zalet metody KOBO na tle wielu innych technik intensywnego odkształcania plastycznego [8].

1.1. Metody intensywnego odkształcenia plastycznego metali i stopów

W inżynierii materiałowej opracowano liczne metody z grupy technik intensywnego odkształcenia plastycznego, które służą do kształtowania metali i ich stopów. Podstawowym celem tych procesów jest uzyskanie drobnoziarnistej mikrostruktury, bo to pozwala znacznie poprawić właściwości mechaniczne materiału. Dzięki temu, że techniki SPD tak szybko się rozwijają, można dziś tworzyć materiały o strukturze submikronowej, a nawet nanokrystalicznej. Dużą zaletą jest połączenie wysokiej wytrzymałości z zachowaną plastycznością [9].

Do najpopularniejszych metod intensywnego odkształcania plastycznego należą wyciskanie przez kanał kątowy ECAE/ECAP, cykliczne wyciskanie ze spęczaniem CEC oraz skręcanie pod wysokim ciśnieniem HPT. Wśród technik SPD uwagę poświęca się również kumulacyjnemu walcowaniu z łączeniem ARB, powtarzalnemu fałdowaniu z prostowaniem RCS oraz wyciskaniu hydrostatycznemu HE. Celem jest wprowadzenie do materiału bardzo dużych odkształceń, co pozwala na intensywne rozdrobnienie mikrostruktury i znaczną poprawę właściwości użytkowych [10].

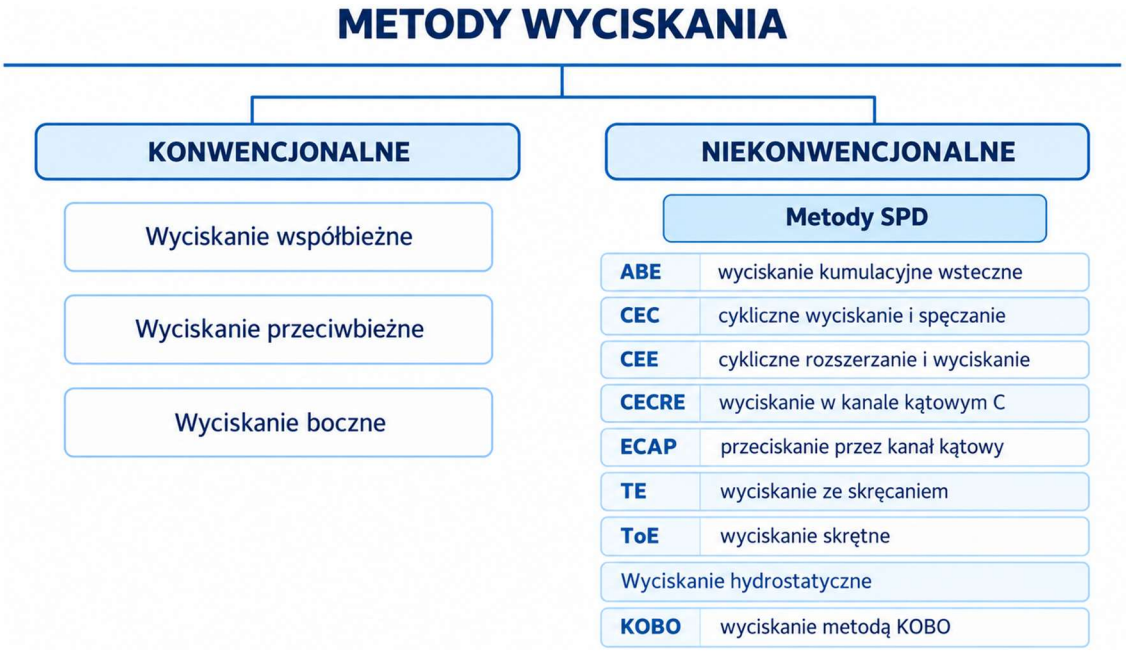
Wszystkie te techniki pozwalają na uzyskanie dużych odkształceń plastycznych, przy jednoczesnym kontrolowaniu wzrostu temperatury. Takie warunki sprzyjają efektywnemu rozdrabnianiu struktury materiału. Pod wpływem silnych naprężeń ścinających i złożonego stanu naprężeń powstają liczne podziarna, których rozmiar waha się od kilku mikrometrów do nawet ułamków mikrometra. Dzieje się tak w wyniku cyklicznego gromadzenia się, przemieszczania i reorganizacji dyslokacji, co stopniowo zwiększa dezorientację krystalograficzną między podziarnami. W efekcie niskokątowe granice podziaren zmieniają się w granice wysokokątowe, tworząc stabilną, ultradrobnoziarnistą mikrostrukturę [11].

Mechanizm, który odpowiada za tak intensywne rozdrobnienie struktury podczas procesów SPD, wciąż jest przedmiotem wielu badań. Przyjmuje się powszechnie, że kluczową rolę odgrywają tutaj wzajemnie przecinające się pasma ścinania, zarówno lokalne, jak i dalekosiężne. Powstają one przez znaczną niejednorodność odkształceń towarzyszących procesowi [12]. W literaturze często wspomina się, że obszary o wysokiej koncentracji energii odkształcenia stanowią obszary sprzyjające inicjacji dynamicznej rekrystalizacji. To właśnie ona stabilizuje drobną strukturę i utrwala korzystne właściwości materiału [13].

W praktyce metody SPD należą do najskuteczniejszych technologii, jeśli chodzi o tworzenie materiałów o parametrach mechanicznych znacznie lepszych niż te uzyskane tradycyjnymi metodami przeróbki plastycznej. Uzyskane właściwości wynikają przede wszystkim z rozdrobnienia mikrostruktury oraz aktywacji mechanizmów umocnienia. Pomimo dotychczasowego postępu badań nad zjawiskami zachodzącymi podczas SPD, mechanizmy sterujące ewolucją mikrostruktury i właściwościami materiałów nie zostały jeszcze w pełni wyjaśnione. Nadal trwają nad tym intensywne prace, ale dotychczasowe wyniki jasno pokazują, że metody SPD mają duży potencjał, zarówno w nauce, jak i w przemyśle [14].

1.2. Odkształcenie plastyczne materiałów metalicznych w różnych procesach KOBO

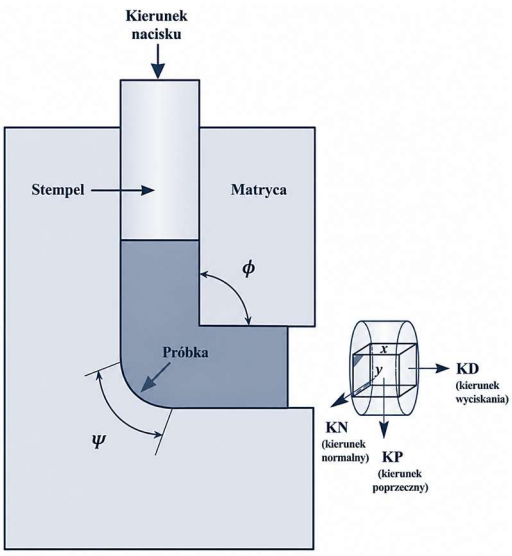
Metody wyciskania można podzielić na konwencjonalne oraz niekonwencjonalne, co przedstawia rysunek 1.1. Do tej pierwszej grupy zalicza się wyciskanie współbieżne, przeciwbieżne oraz boczne. Z kolei druga grupa obejmuje rozwiązania, które wykorzystują dodatkowe oddziaływania lub zmieniają drogę odkształcenia, czego przykładem jest metoda KOBO. W przypadku procesu KOBO rewersyjny ruch obrotowy matrycy nakłada odkształcenie ścinające na osiowy przepływ materiału [15].



Rysunek 1.1 Podział metod wyciskania na konwencjonalne i niekonwencjonalne, z uwzględnieniem metod intensywnego odkształcenia plastycznego (SPD), w tym metody KOBO.

Metoda wielokrotnego wyciskania przez kanał kątowy ECAP

Metoda wyciskania przez kanał kątowy ECAE, określana również jako ECAP, należy do najczęściej stosowanych technik intensywnego odkształcenia plastycznego. Istota procesu polega na przepuszczaniu materiału przez matrycę składającą się z dwóch kanałów o jednakowym przekroju poprzecznym, przecinających się pod określonym kątem, najczęściej wynoszącym 90 lub 120 stopni. Podczas przemieszczania materiału przez strefę przecięcia kanałów powstają znaczne odkształcenia ścinające, przy jednoczesnym zachowaniu niezmienionego przekroju poprzecznego próbki. Umożliwia to wielokrotne przeprowadzanie materiału przez matrycę i stopniową kumulację odkształcenia plastycznego [9]. Schemat procesu przedstawiono na rysunku 1.2



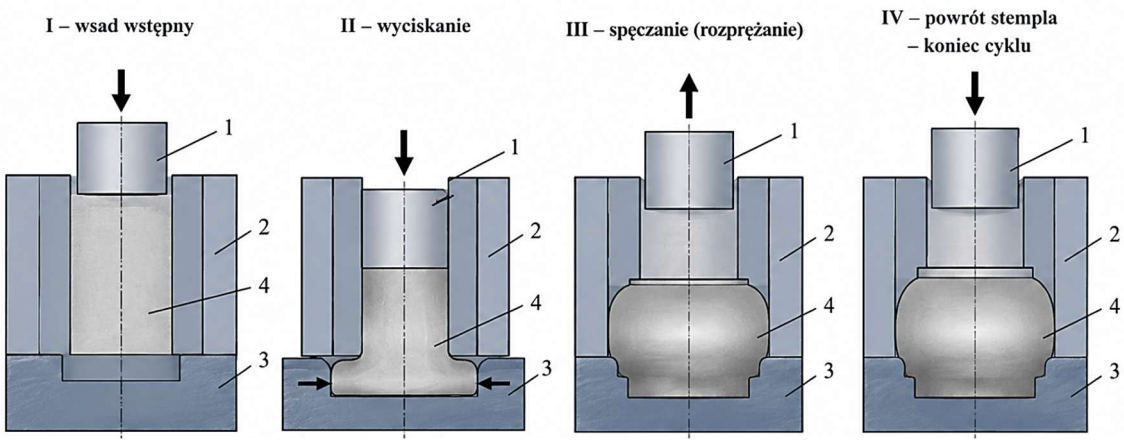
Rysunek 1.2 Schemat procesu wyciskania przez kanał kątowy metodą ECAP (Equal Channel Angular Pressing): stempel, matryca, próbka oraz układ kierunków materiałowych (KD-kierunek wyciskania, KP-kierunek poprzeczny, KN-kierunek normalny (opracowanie na podstawie [16]))

To, jak przebiega cały proces i jakie zmiany zajdą w strukturze materiału, zależy w dużej mierze od sposobu prowadzenia kolejnych cykli odkształcenia, czyli od wybranej ścieżki odkształcenia. Wyróżnia się cztery główne warianty A, BA, BC oraz C. Różnią się one przede wszystkim tym, jak próbka jest obracana między kolejnymi przejściami przez matrycę. Wybór właściwej ścieżki ma duże znaczenie, ponieważ wpływa na rozkład odkształceń, rozwój tekstury krystalograficznej, stopień anizotropii właściwości mechanicznych oraz to, jak zmienia się mikrostruktura materiału [17].

Intensywne odkształcenia ścinające powodują powstawanie i reorganizację dyslokacji, co prowadzi do tworzenia podziaren i stopniowego rozpadu ziaren. Jeśli warunki na to pozwolą, proces ten może doprowadzić nawet do uzyskania mikrostruktury ultradrobnoziarnistej lub nanokrystalicznej. Dzięki kolejnym cyklom przechodzenia przez matrycę struktura ulega zmianom, co pozwala zwiększyć wytrzymałość i twardość materiału, przy ograniczonym spadku plastyczności. Mechanizmy rozdrabniania struktury wywołane silnym ścinaniem są też badane w ramach innych metod SPD, takich jak skręcanie pod wysokim ciśnieniem. [11].

Metoda cyklicznego wyciskania spęczającego CEC

Metoda cyklicznego wyciskania spęczającego należy do technik intensywnego odkształcenia plastycznego, których istotą jest wielokrotny, naprzemienny przepływ materiału przez strefę przewężenia matrycy. W trakcie kolejnych cykli materiał przemieszczany jest pomiędzy dwiema komorami roboczymi, podlegając oddziaływaniu odkształceń ścinających i ściskających. Taki sposób prowadzenia procesu umożliwia kumulację znacznych odkształceń plastycznych przy zachowaniu zbliżonych wymiarów zewnętrznych próbki, co stanowi istotną zaletę w porównaniu z metodami, w których odkształceniu towarzyszy znaczna zmiana geometrii materiału [18]. Schemat ideowy procesu przedstawiono na rysunku 1.3.



Rysunek 1.3 Schemat ideowy procesu cyklicznego wyciskania spęczającego (opracowanie na podstawie [19])

Kiedy materiał wielokrotnie przechodzi przez otwór matrycy, dochodzi do intensywnej reorganizacji podstruktury dyslokacyjnej, fragmentacji ziaren oraz stopniowego rozdrobnienia mikrostruktury. W przypadku aluminium, wraz ze wzrostem liczby cykli odkształcenia, można zaobserwować wyraźną ewolucję strukturalną. Wiąże się ona z tworzeniem się podziaren oraz zmianami ich wielkości i orientacji krystalograficznej [20].

Odpowiedni dobór warunków procesu umożliwia uzyskanie mikrostruktury ultradrobnoziarnistej. Ma to bezpośredni wpływ na stopień umocnienia oraz właściwości mechaniczne odkształcanego materiału [21].

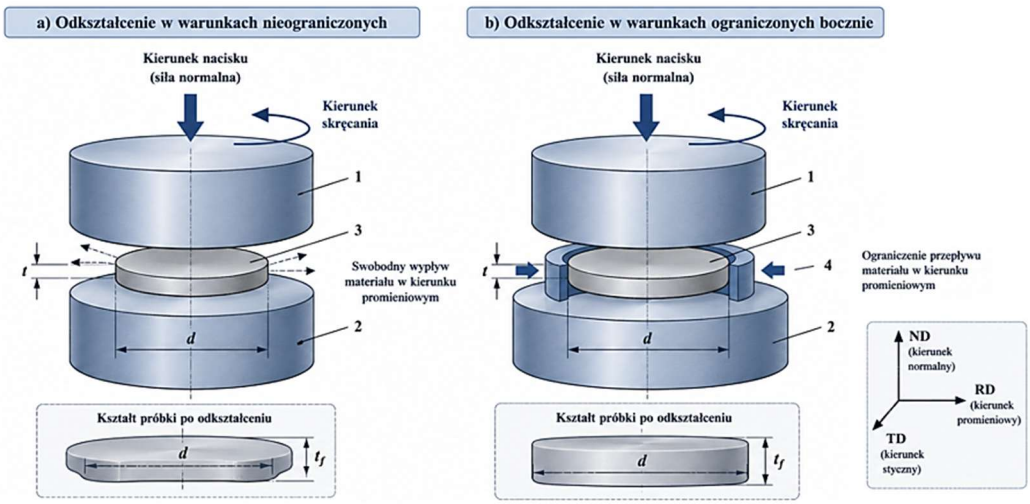
Zmiany w mikrostrukturze, które zachodzą podczas procesu CEC, mogą zwiększyć wytrzymałość i twardość materiału, nie odbierając mu przy tym pożądanej plastyczności. To, jak silne będzie to umocnienie i jak jednorodna okaże się struktura, zależy od kilku

czynników, takich jak rodzaj materiału, liczba cykli odkształcenia czy konkretne warunki prowadzenia procesu. Ponieważ metoda CEC pozwala na kontrolowane kształtowanie mikrostruktury, znajduje ona szerokie zastosowanie w badaniach nad materiałami ultradrobnoziarnistymi oraz w szukaniu sposobów na poprawę właściwości mechanicznych metali i ich stopów.

Metoda skręcania pod wysokim ciśnieniem

Metoda skręcania pod wysokim ciśnieniem, znana jako HPT, to jedna z technik intensywnego odkształcania plastycznego. Pozwala ona na uzyskanie mikrostruktury o bardzo drobnych ziarnach, a nawet struktur nanokrystalicznych. Cały proces opiera się na jednoczesnym przyłożeniu wysokiego ciśnienia quasihydrostatycznego oraz momentu skręcającego. Dzięki temu dochodzi do silnego ścinania, co powoduje rozdrobnienie ziaren i znaczną zmianę właściwości materiału [23].

Schemat tego procesu przedstawia na rysunku 1.4. Można tu wyróżnić dwa główne sposoby realizacji odkształcanie w warunkach nieograniczonych oraz ograniczone bocznie. W tym pierwszym przypadku materiał może swobodnie przemieszczać się promieniowo, ale w drugim jego wypływ jest blokowany przez specjalną konstrukcję matrycy. Warto przy tym wspomnieć, że zastosowanie ograniczenia bocznego pozwala na znacznie lepszą kontrolę nad geometrią próbki oraz samym przebiegiem procesu odkształcania.



Rysunek 1.4 Schemat ideowy procesu skręcania pod wysokim ciśnieniem (opracowanie na podstawie [22])

To, co wyróżnia metodę HPT, to nierównomierny rozkład odkształcenia ścinającego. Jego wartość rośnie wraz z odległością od osi obrotu. Teoretycznie w samym środku dysku odkształcenie to wynosi zero, ale w strefie brzegowej może ono sięgać nawet kilkuset. Ostateczny wynik zależy oczywiście od geometrii próbki oraz tego, ile obrotów wykonano. [24].

Wysokie ciśnienie, które zazwyczaj sięga kilku giga paskali, hamuje powstawanie i rozprzestrzenianie się pęknięć. Dzięki temu można odkształcać materiały o słabej plastyczności, jak chociażby stopy magnezu, fazy międzymetaliczne, cermetale czy kompozyty metaliczne [25]. Tak intensywne odkształcanie powoduje wzrost gęstości dyslokacji, tworzenie podziaren i stopniowe rozdrobnienie mikrostruktury, a w odpowiednich warunkach może też wywołać procesy rekrystalizacji dynamicznej.

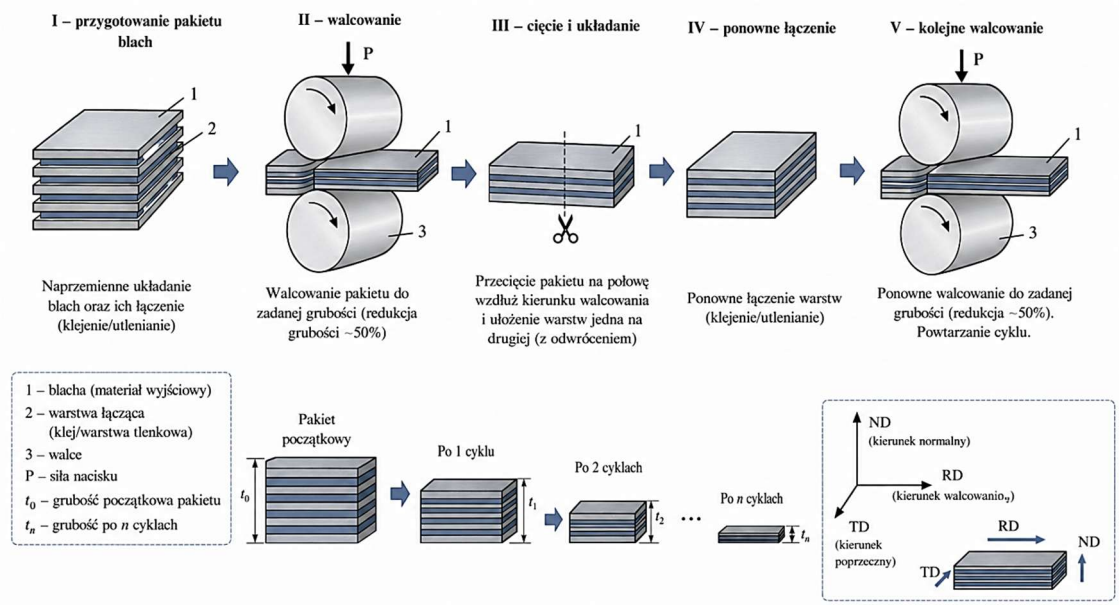
Choć metoda ta pozwala uzyskać materiały o korzystnych właściwościach mechanicznych, jej wykorzystanie w przemyśle ogranicza przede wszystkim mały rozmiar produktów. Typowe próbki mają zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu milimetrów średnicy i grubość rzędu 0,2 do 1,0 mm. Właśnie dlatego technikę tę stosuje się głównie w badaniach naukowych, aby zrozumieć zależności między mikrostrukturą, stopniem odkształcenia a właściwościami materiałów.

Metoda kumulacyjnego walcowania z łączeniem ARB

Metoda kumulacyjnego walcowania z łączeniem, znana jako ARB, to jedna z technik intensywnego odkształcania plastycznego. Dzięki niej można uzyskać materiały o ultradrobnoziarnistej mikrostrukturze i bardzo dobrych właściwościach mechanicznych. Cały proces polega na wielokrotnym walcowaniu połączonych ze sobą warstw metalu, które pod wpływem nacisku trwale się ze sobą zespajają. Po każdym cyklu materiał jest składany i walcowany ponownie. Pozwala to na stopniowe kumulowanie odkształcenia, co w efekcie prowadzi do coraz większego rozdrobnienia struktury materiału. [23].

Metoda ARB pozwala nie tylko na trwałe łączenie arkuszy z tego samego materiału, ale też na tworzenie wielowarstwowych kompozytów metalicznych. Dzięki temu można precyzyjnie dopasować ich właściwości do konkretnych potrzeb konstrukcyjnych, funkcjonalnych czy tribologicznych. Schemat całego procesu przedstawiono na rysunku 1.5.

Przedstawia on kolejne etapy, czyli przygotowanie pakietu blach, samo walcowanie oraz ponowne składanie materiału przed kolejnym cyklem odkształcania.



Rysunek 1.5 Schemat ideowy metody kumulacyjnego walcowania z łączeniem, I-przygotowanie pakietu blach, II-walcowanie pakietu do zadanej grubości, III-przecięcie pakietu i ponowne ułożenie warstw, IV-ponowne połączenie warstw, V-kolejne walcowanie oraz powtarzanie cyklu. Oznaczenia 1-blacha (materiał wyjściowy), 2-warstwa łącząca, 3-walce, P-siła nacisku, t_0-grubość początkowa pakietu, t_n-grubość pakietu po n cyklach. RD-kierunek walcowania, TD-kierunek poprzeczny, ND-kierunek normalny (opracowanie na podstawie [24])

Bardzo ważnym etapem w procesie ARB jest odpowiednie przygotowanie powierzchni, które mają zostać ze sobą połączone. Wykorzystuje się do tego szczotkowanie mechaniczne, dzięki któremu można usunąć warstwy tlenków i zwiększyć chropowatość materiału. Zabieg ten ma na celu uzyskanie trwałego połączenia między warstwami. [25].

Temperatura procesu jest jednym z kluczowych parametrów wpływających na jakość połączenia warstw podczas walcowania. Z jednej strony wyższa temperatura może poprawić kontakt między powierzchniami i ułatwić ich spajanie, ale z drugiej strony zbyt wysoka wartość może niekorzystnie zmienić mikrostrukturę materiału i osłabić jego właściwości wytrzymałościowe. [26]. Równie ważne jest odpowiednie dobranie stopnia gniotu. To właśnie on decyduje o tym, czy powierzchnie będą ze sobą właściwie współpracować i czy uda się uzyskać trwałe złącze metalurgiczne. W klasycznym procesie ARB stosuje się redukcję grubości wynoszącą około 50% w każdym cyklu walcowania, co pozwala na zachowanie zbliżonej grubości pakietu po jego ponownym złożeniu oraz umożliwia stopniową akumulację bardzo dużych odkształceń plastycznych [27].

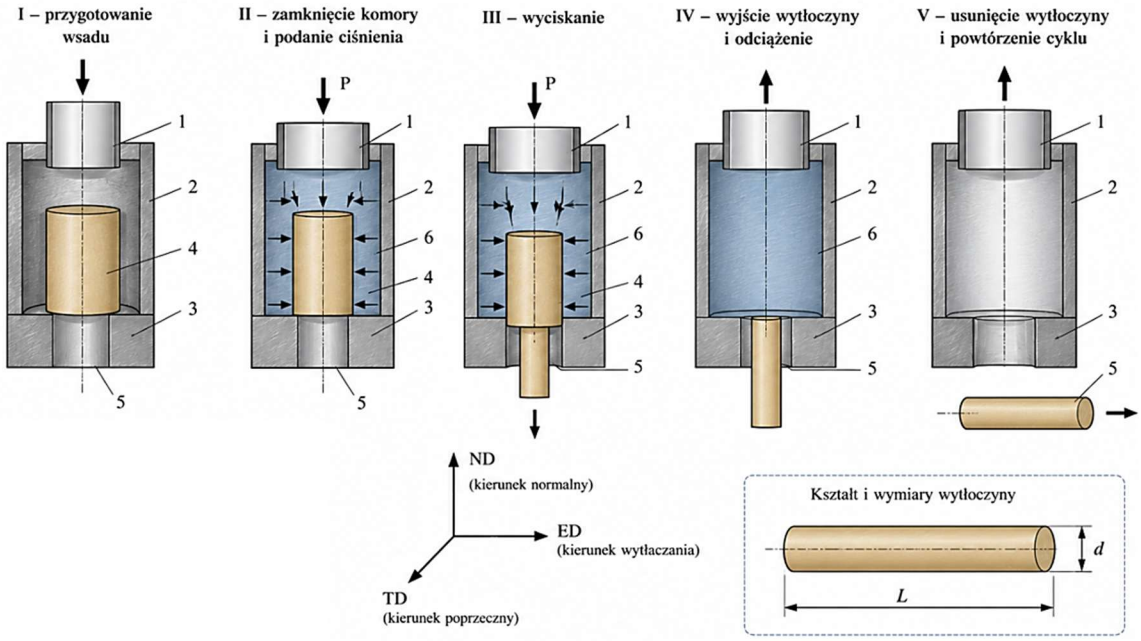
Powtarzające się walcowanie i składanie materiału sprawiają, że odkształcenia plastyczne się kumulują, a mikrostruktura ulega rozdrobnieniu. Dzięki temu uzyskuje się materiały
o wyższej wytrzymałości mechanicznej, które wciąż zachowują dobrą plastyczność. To właśnie dlatego metoda ARB jest tak przydatna w badaniach nad materiałami ultradrobnoziarnistymi oraz przy produkcji wysokowytrzymałych blach metalowych.

Metoda hydrostatycznego wyciskania-HE

Metoda wyciskania hydrostatycznego HE to jedna z technik intensywnego odkształcania plastycznego. W tym procesie naprężenie generowane przez stempel nie działa bezpośrednio na materiał, lecz jest przekazywane za pomocą cieczy lub innego medium pod ciśnieniem. To duża różnica w porównaniu do tradycyjnego wyciskania, gdzie materiał styka się ze stemplem bezpośrednio. Dzięki metodzie HE naprężenia ściskające rozkładają się równomiernie na całym materiale, co znacznie poprawia warunki jego płynięcia plastycznego. [28].

Schemat procesu wyciskania hydrostatycznego przedstawiono na rysunku 1.6. Przedstawia on, jak współpracują ze sobą stempel, medium hydrostatyczne oraz matryca formująca. Podczas całego procesu materiał ulega odkształceniu pod wpływem wysokiego ciśnienia płynącego z medium. Dzięki temu w jego objętości powstaje stan naprężeń, który jest bardzo zbliżony do idealnego stanu hydrostatycznego.

Takie warunki sprawiają, że materiał staje się bardziej podatny na odkształcenia plastyczne, co jednocześnie zmniejsza ryzyko powstawania i rozprzestrzeniania się pęknięć podczas wyciskania. Wykorzystanie medium ciśnieniowego w procesie hydrostatycznym pozwala ograniczyć tarcie między wsadem a ściankami pojemnika i poprawia ogólne warunki odkształcania. Dzięki temu można prowadzić proces przy bardzo dużych stopniach odkształcenia, również w przypadku materiałów, które mają z natury ograniczoną plastyczność. [29].



Rysunek 1.6 Schemat ideowy procesu hydrostatycznego wyciskania, I-przygotowanie wsadu, II-zamknięcie komory i wytworzenie ciśnienia hydrostatycznego, III-wyciskanie materiału przez matrycę, IV-wyjście wytłoczyny z matrycy, V-usunięcie wytłoczyny i przygotowanie układu do kolejnego cyklu. Oznaczenia 1-stempel (tłok), 2-komora (pojemnik), 3-matryca, 4-wsad (materiał), 5-kanał matrycy (otwór wyciskający), 6-ośrodek ciśnieniowy, P-ciśnienie hydrostatyczne. ED-kierunek wyciskania, TD-kierunek poprzeczny, ND-kierunek normalny, (opracowanie na podstawie [29])

Procesy wyciskania hydrostatycznego pozwalają na wprowadzenie dużych odkształceń plastycznych, co może znacząco rozdrabniać mikrostrukturę materiału. Jeśli chodzi o tytan, zastosowanie tej metody skutkuje zmniejszeniem wielkości ziarna, a w efekcie poprawia właściwości mechaniczne uzyskanego materiału. [29].

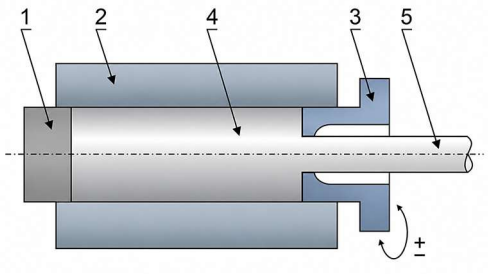
1.3. Charakterystyka procesu wyciskania KOBO. Rozwiązania technologiczne. Cechy szczególne procesu i jego wyrobów.

W warunkach złożonego odkształcenia, które jest typowe dla procesu KOBO, plastyczne płynięcie metalu może zachodzić w sposób warstwowy. To, gdzie i jak dokładnie materiał będzie płynął, zależy od zmian w warunkach odkształcania oraz od cyklicznego działania składowej ścinającej [30]. Badania pokazały też, że przy wyciskaniu z użyciem oscylacyjnej rotacji matrycy materiał może wykazywać cechy dynamicznej nadplastyczności. Warto jednak zaznaczyć, że zjawisko to różni się od klasycznej nadplastyczności, którą obserwuje się podczas prób rozciągania materiałów o ultradrobnoziarnistej mikrostrukturze [31].

W metodzie KOBO efekt ten pojawia się bez potrzeby wcześniejszego rozdrabniania struktury ziaren. Jego aktywacja wynika z cyklicznej destabilizacji podstruktury dyslokacyjnej, którą wywołuje zmienny moment skręcający działający na materiał.

Rysunek 1.7 pokazuje schemat ideowy procesu KOBO, który ilustruje zasadę wyciskania wspomaganego cykliczną rotacją matrycy. Dzięki okresowemu obrotowi matrycy, odbywającemu się przy kontrolowanej amplitudzie i częstotliwości, powstaje dodatkowy element odkształcenia ścinającego. Zmienia on lokalny stan naprężeń oraz kierunki, w których deformuje się materiał. W efekcie cały proces technologiczny zyskuje mechanizm cyklicznej zmiany toru odkształcenia, co wynika ze zmiennego układu obciążeń. To właśnie ta cecha odróżnia metodę KOBO od tradycyjnych technik wyciskania [32].

Zgodnie z opisem patentowym, dodatkowy moment skręcający o określonej częstotliwości powoduje cykliczną destabilizację struktury materiału. Prowadzi to do lokalizacji odkształcenia plastycznego w przecinających się pasmach ścinania. Mechanizm ten zmienia lokalny stan naprężeń i intensyfikuje plastyczne płynięcie materiału [33].



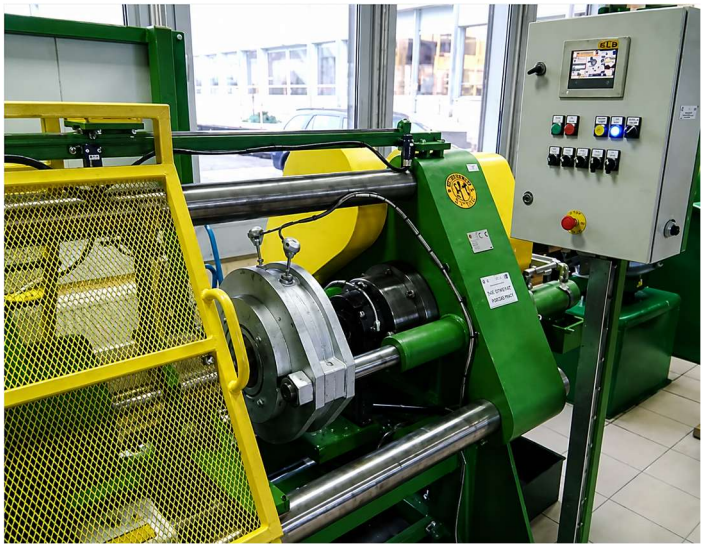
Rysunek 1.7 Schemat procesu wyciskania metodą KOBO 1-stempel, 2-pojemnik, 3-matryca, 4-wsad, 5-wyciskany pręt.

Analiza warunków procesu KOBO wskazuje na to, że metoda ta umożliwia prowadzenie intensywnego odkształcenia plastycznego w stosunkowo niskiej temperaturze. Co więcej, można przy tym wykorzystać wyższe prędkości odkształcania i większe współczynniki wyciskania niż w tradycyjnych procesach wysokotemperaturowych [34]. Dzięki temu udaje się uzyskać wyroby o jednorodnej, drobnoziarnistej mikrostrukturze oraz bardzo dobrych właściwościach mechanicznych, takich jak wysoka wytrzymałość, odpowiednia plastyczność czy zwiększona twardość.

Technologia KOBO umożliwia wytwarzanie prętów, drutów, rur oraz profili o zróżnicowanej geometrii. Układ napędowy prasy pozwala na utrzymanie stałej prędkości

wyciskania, pod warunkiem nieprzekroczenia ustalonej wartości granicznej siły procesu. Zapewnia to stabilność parametrów technologicznych oraz sprzyja uzyskiwaniu wyrobów o powtarzalnych właściwościach.

Na rysunku 1.8 przedstawiono laboratoryjną prasę KOBO, która pracuje w Katedrze Przeróbki Plastycznej na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. To stanowisko służy do prowadzenia badań nad procesem wyciskania współbieżnego metodą KOBO w skali półtechnicznej, a wszystko odbywa się w ściśle kontrolowanych warunkach. Prasa potrafi wygenerować nacisk stempla sięgający nawet 2,5 MN, a kąt obrotu matrycy można ustawić w zakresie od 6 do 10 stopni. Co ważne, proces wyciskania można przeprowadzać zarówno w temperaturze pokojowej, jak i w wyższych temperaturach, dochodzących do 500 stopni Celsjusza. Stanowisko posiada też specjalne układy pomiarowe. Dzięki nim można rejestrować siłę wyciskania w zależności od czasu i drogi stempla, mierzyć moment skręcający matrycy oraz bezstykowo sprawdzać temperaturę materiału, który właśnie opuszcza matrycę. Takie możliwości pozwalają dokładnie przeanalizować przebieg procesu KOBO i sprawdzić, jak poszczególne parametry technologiczne wpływają na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne gotowych wyrobów.



Rysunek 1.8 Prasa do wyciskania metodą KOBO

Rozwiązania technologiczne

Metoda wyciskania KOBO to w uproszczeniu zmodyfikowana wersja klasycznego wyciskania osiowego. Główna różnica polega na tym, że w trakcie odkształcania matryca wykonuje cykliczny ruch skrętny. Takie połączenie wyciskania osiowego z oscylacyjnym skręcaniem znacząco zmienia warunki, w jakich płynie materiał. Dzięki temu proces przebiega inaczej, opory płynięcia spadają, a zjawiska kształtujące mikrostrukturę stają się znacznie intensywniejsze [30]. Jak wynika z patentu Korbla i Bochniaka [33], kluczowym elementem technologicznym w metodzie KOBO jest działanie rewersyjnego momentu skręcającego na matrycę z określoną częstotliwością. Ten cyklicznie zmieniający się moment powoduje dynamiczną destabilizację podstruktury dyslokacyjnej, co sprawia, że odkształcenie plastyczne skupia się w pasmach ścinania, które przecinają się ze sobą. Mechanizm ten nie tylko przyspiesza płynięcie materiału, ale też odgrywa kluczową rolę w budowaniu jego mikrostruktury.

Proces KOBO można prowadzić nawet w temperaturze pokojowej, osiągając przy tym bardzo duże odkształcenia. Przykładowo, w przypadku stopu AZ31 udało się uzyskać wysoki współczynnik wyciskania, co poskutkowało rozdrobnieniem mikrostruktury i wyraźną poprawą właściwości mechanicznych materiału [35], [36].

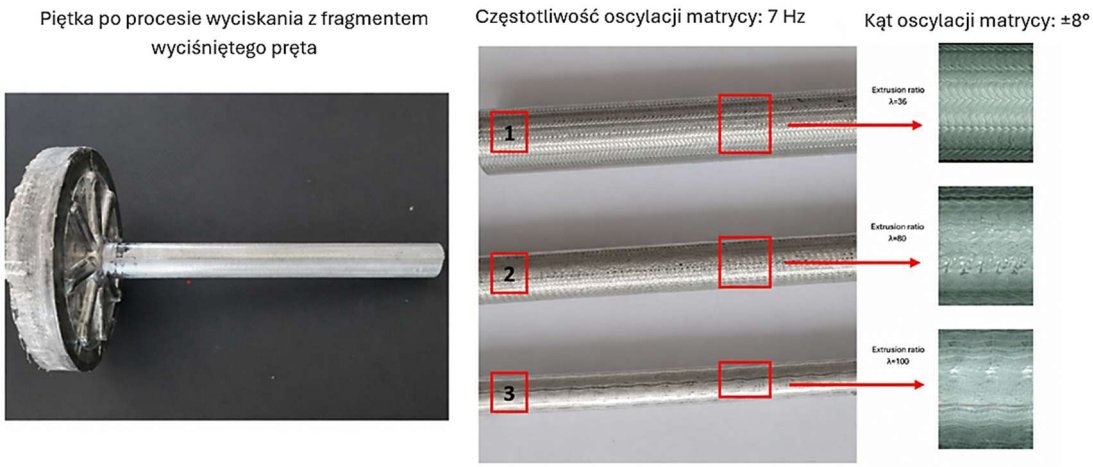
Gotowe wyroby cechują się dużą jednorodnością na całej swojej długości. Wynika to z faktu, że parametry procesu są bardzo stabilne prędkość stempla jest stała, siła wyciskania pozostaje na podobnym poziomie, a częstotliwość ruchu matrycy jest ściśle kontrolowana [7], [37]. Dzięki tym zaletom metoda KOBO znajduje zastosowanie w kształtowaniu materiałów trudnych w kształtowaniu, takich jak stopy magnezu (AZ31, AZ61, AZ91), aluminium (na przykład 7075), tytanu czy kompozyty o osnowie metalicznej [38].

Dodatkowo metodę KOBO można wykorzystać do bezpośredniej konsolidacji materiałów rozdrobnionych, na przykład wiórów metalicznych, bez potrzeby ich wcześniejszego przetapiania. Pokazano to na przykładzie wiórów tytanu Grade 2. Po wstępnej konsolidacji i wyciśnięciu ich metodą KOBO, udało się uzyskać zwarty pręt o jednorodnej mikrostrukturze i właściwościach mechanicznych bardzo zbliżonych do materiału litego [39].

Procesy technologiczne oparte na metodzie KOBO polegają na cyklicznej zmianie toru odkształcenia. Dzieje się to dzięki naprzemiennej zmianie kierunku momentu skręcającego, który oddziałuje na matrycę. W odróżnieniu od metod konwencjonalnych, tutaj odkształcenie plastyczne jest modulowane dynamicznie. Powoduje to ciągłą reorganizację podstruktury dyslokacyjnej i ewolucję mikrostruktury materiału [40]. Według założeń patentowych, rewersyjny moment skręcający musi działać w konkretnej płaszczyźnie i z odpowiednią częstotliwością. Tylko wtedy można skutecznie wywołać lokalne pasma ścinania, co ułatwia plastyczne płynięcie materiału i obniża opory odkształcenia.

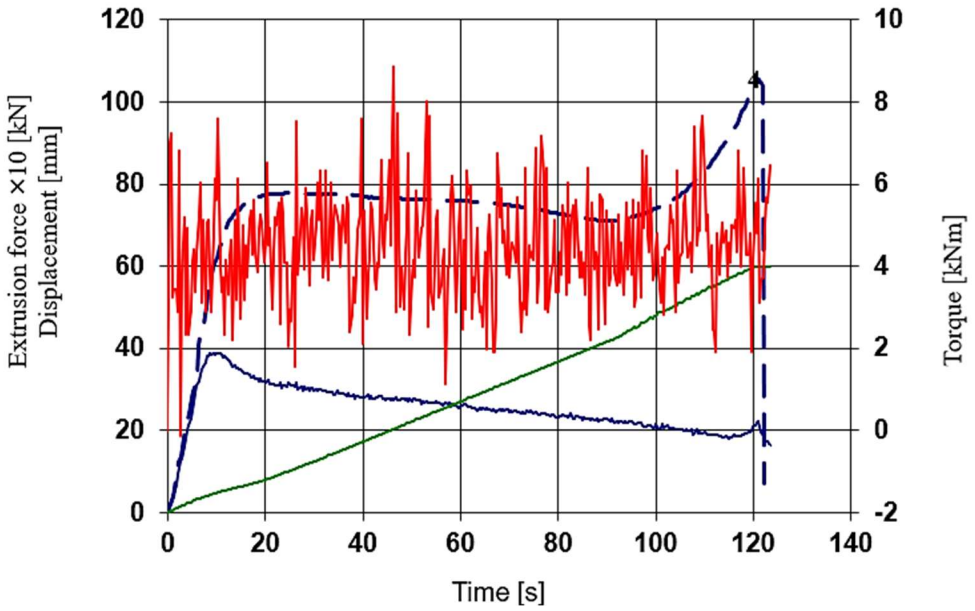
W procesie KOBO stosuje się dodatkowy układ napędowy, który pozwala na wykonywanie cyklicznego, rewersyjnego ruchu obrotowego narzędzia podczas wyciskania. Oprócz standardowego współczynnika i prędkości wyciskania, kluczowymi parametrami są tutaj kąt oraz częstotliwość ruchu oscylacyjnego, ponieważ to one bezpośrednio kształtują warunki odkształcania materiału [41].

Jeśli chodzi o podstawowe parametry technologiczne KOBO, to obok prędkości i współczynnika wyciskania, najważniejsze są kąt oraz częstotliwość oscylacji matrycy. Z literatury wynika, że kąt oscylacji matrycy zazwyczaj wynosi od ±5 do 8°, częstotliwość ruchu mieści się w przedziale 3-10 Hz, a prędkość wyciskania oscyluje od 0,1 do kilku mm/s. Dobór tych wartości ma duży wpływ na przebieg odkształcenia, siłę potrzebną do wyciskania oraz końcowe właściwości gotowego wyrobu.



Rysunek 1.9 Wygląd makroskopowy piętki z fragmentem wyciśniętego pręta oraz powierzchni prętów otrzymanych metodą KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz i kącie oscylacji ±8° 1-λ=36, 2-λ=60, 3-λ=100.

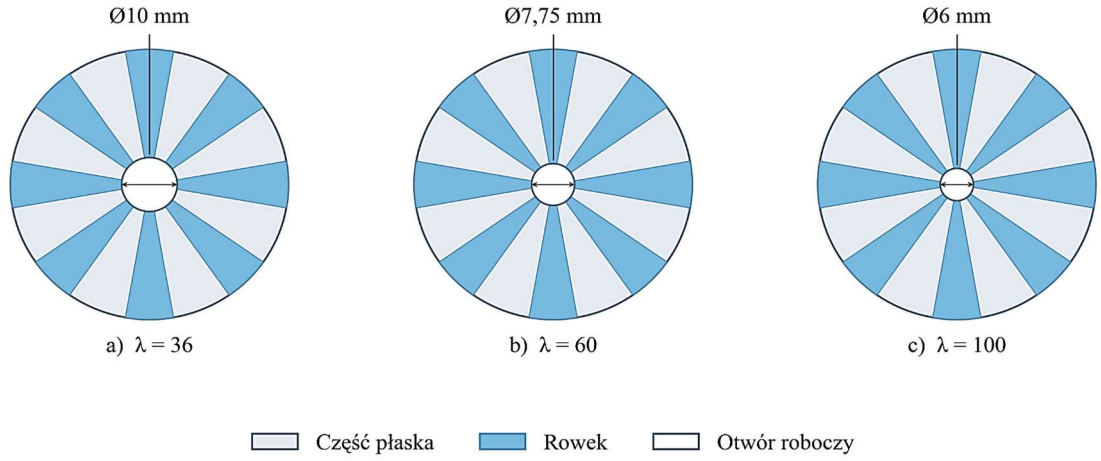
Przykładowy przebieg parametrów mechanicznych procesu KOBO przedstawiono na rysunku 1.10. Dzięki zestawieniu siły wyciskania, przemieszczenia stempla oraz momentu skręcającego można dokładnie prześledzić, jak zmienia się obciążenie narzędzia na poszczególnych etapach. Przedstawione wyniki dotyczą wyciskania aluminium w temperaturze 350 stopni Celsjusza i służą jako przykład literaturowy [42]



Rysunek 1.10 Przebieg siły wyciskania, przemieszczenia stempla i momentu skręcającego podczas wyciskania aluminium metodą KOBO, λ=100, T=350°C, prędkość stempla 0,5 mm/s, kąt oscylacji matrycy ±8°, częstotliwość 5 Hz [42]

Dzięki metodzie KOBO można wytwarzać różnorodne wyroby, takie jak pręty, druty, profile czy rury o skomplikowanych przekrojach. Dobór kluczowych parametrów procesu umożliwia kontrolowanie warunków odkształcenia. To z kolei bezpośrednio przekłada się na właściwości mechaniczne gotowych wyrobów [43].

Zastosowanie ruchu matrycy w kierunku odwrotnym podczas procesu KOBO zmienia warunki plastycznego płynięcia materiału. Dzięki temu można ograniczyć pracę odkształcenia w porównaniu do metod konwencjonalnych. Takie rozwiązanie wynika z cyklicznej zmiany drogi odkształcenia, co pozwala na prowadzenie procesów kształtowania przy mniejszych obciążeniach układu technologicznego [44]. Wyniki badań pokazują, że ta cykliczna zmiana toru odkształcenia ma kluczowe znaczenie dla przebiegu procesu i kontroli jego parametrów. Ma ona również istotny wpływ na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne gotowych profili cienkościennych [45].



Rysunek 1.11 Schemat geometrii powierzchni czołowych matryc KOBO dla współczynników wyciskania a) λ=36, b) λ ≈ 60, c) λ=100

Podczas wyciskania metodą KOBO kontakt wlewka z czołem matrycy umożliwia przekazywanie oddziaływań wynikających z ruchu oscylacyjnego narzędzia. Wysoki nacisk sprzyja powstawaniu połączeń adhezyjnych, natomiast obecność rowków zwiększa udział oddziaływania mechanicznego.

W pracy [97] przeanalizowano, jak geometria powierzchni czołowej matrycy KOBO wpływa na proces wyciskania na zimno stopu aluminium EN AW-7075. Wykorzystano matryce z rowkami rozmieszczonymi promieniowo. Testowano warianty z 6, 8, 10 lub 12 rowkami, zmieniając jednocześnie ich głębokość w przedziale od 1 do 3 mm. Część robocza miała średnicę czynną 44 mm i została wyposażona w niewielką komorę wstępną. Okazało się, że przy głębokości rowków wynoszącej 1 mm zwiększenie ich liczby pomaga zmniejszyć maksymalną siłę wyciskania.

Najniższą wartość, czyli 1890 kN, odnotowano w przypadku matrycy z 12 rowkami. Autorzy badania zauważyli, że właściwe ukształtowanie powierzchni czołowej matrycy pozwala kontrolować rozwój strefy intensywnego odkształcenia plastycznego. Dzięki temu można ograniczyć opory procesu, nie wpływając przy tym znacząco na wytrzymałość gotowych wyrobów.

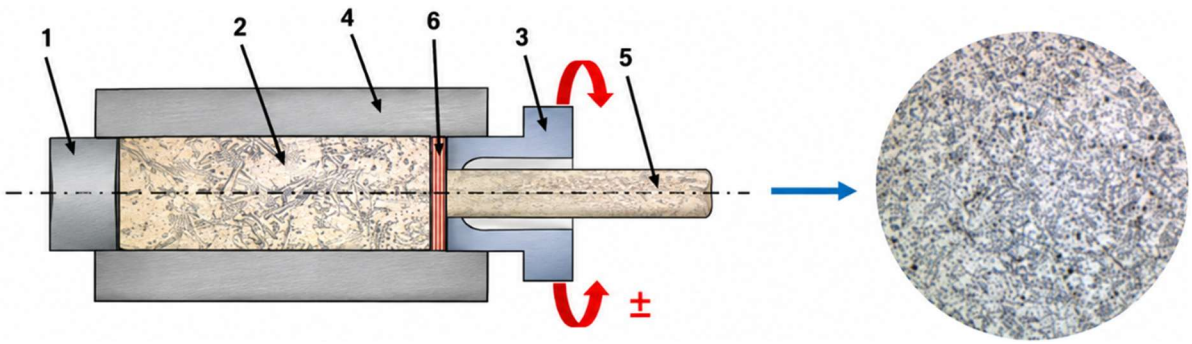
Im dalej od osi matrycy, tym większa jest droga ruchu oscylacyjnego, co może skutkować zrywaniem lokalnych połączeń adhezyjnych. Takie zjawiska wpływają na przepływ metalu, kształtowanie strefy martwej oraz wydzielanie ciepła, a w efekcie mogą powodować różnice we właściwościach materiału wzdłuż całego wyciskanego pręta.

Lokalizacja odkształcenia w procesie KOBO

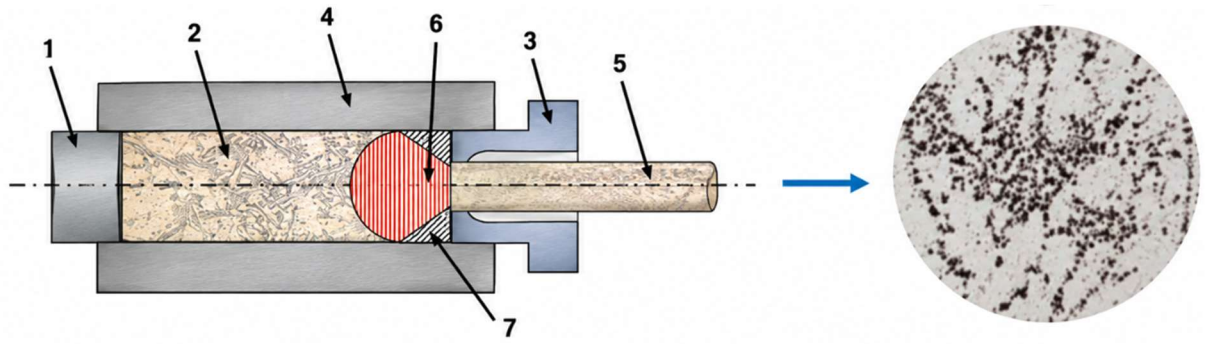
Proces KOBO to jedna z najbardziej zaawansowanych metod intensywnego odkształcania plastycznego. W odróżnieniu od klasycznego wyciskania osiowego, tutaj proces ten wzbogacono o cykliczny i odwracalny ruch obrotowy matrycy. Na materiał oddziałują obciążenie osiowe wywołane ruchem stempla oraz cyklicznie zmienne naprężenia ścinające [46]. Takie nałożenie się obu oddziaływań tworzy złożony i niejednorodny stan odkształcenia. Dzięki temu deformacja plastyczna może skupiać się w konkretnych obszarach materiału, co z kolei mocno przyspiesza zmiany zachodzące w jego mikrostrukturze. [47].

Lokalizacja odkształcenia to zjawisko, w którym intensywność odkształceń nie rozkłada się równomiernie w całej objętości materiału. Przez to niektóre części próbki zmieniają kształt znacznie mocniej niż reszta. W procesie KOBO największe odkształcenia pojawiają się tam, gdzie materiał styka się z matrycą oraz w punktach, w których ruch matrycy wymusza okresową zmianę kierunku ścinania. Ponieważ matryca wykonuje ruch obrotowy, lokalne naprężenia ścinające zmieniają swój kierunek w sposób cykliczny. Przez to strefy o największej intensywności odkształcenia przemieszczają się zarówno wzdłuż osi wyciskania, jak i na obwodzie przekroju gotowego wyrobu [48].

Na rysunku 1.12 i rysunku 1.13 porównano wyciskanie klasyczne z procesem KOBO. W metodzie klasycznej matryca pozostaje nieruchoma, a materiał porusza się po stałej drodze odkształcenia, co skutkuje powstaniem strefy martwej.



Rysunek 1.12 Schemat wyciskania współbieżnego metodą KOBO oraz mikrostruktura produktu końcowego 1-stempel, 2-pojemnik, 3-matryca wykonująca ruch oscylacyjny, 4-wyciskany metal/wsad, 5-produkt, 6-strefa odkształcenia plastycznego.



Rysunek 1.13 Schemat wyciskania klasycznego 1-stempel, 2-pojemnik, 3-matryca, 4-wyciskany metal/wsad, 5-wyrób, 6-strefa odkształcenia plastycznego, 7-strefa martwa.

W procesie KOBO matryca porusza się cyklicznie, wykonując ruch oscylacyjny. Dzięki temu odkształcenie plastyczne jest intensywniejsze, a opory tarcia maleją. W tradycyjnym wyciskaniu materiał przemieszcza się w stronę matrycy, a potem zmienia kierunek przepływu w dość szerokiej strefie przed otworem. Tutaj natomiast na ruch osiowy nakłada się dodatkowe, cykliczne ścinanie wywołane właśnie tą oscylacją matrycy. [49].

Intensywne odkształcenie skupia się w małej objętości tuż przy czole matrycy, gdzie dużą rolę odgrywa przepływ promieniowy. Taka lokalizacja odkształcenia pozwala zmniejszyć opór plastycznego płynięcia i siłę potrzebną do wyciskania, co z kolei umożliwia prowadzenie procesu w niższej temperaturze. To rozwiązanie sprzyja też rozdrobnieniu i ujednorodnieniu mikrostruktury, co przekłada się na lepsze właściwości mechaniczne gotowego wyrobu. [50]

Lokalizacja odkształcenia jest kluczowa dla zrozumienia tego, jak zachodzi deformacja plastyczna w procesie KOBO. Tam, gdzie odkształcenie jest największe, dochodzi do intensywnej reorganizacji podstruktury dyslokacyjnej, zaczynają zachodzić procesy dynamicznej rekrystalizacji i tworzą się podziarna. W wyniku dalszych zmian przekształcają się one w ziarna ultradrobnoziarniste o dużej gęstości granic wysokokątowych. Badania mikrostrukturalne pokazują, że metoda KOBO umożliwia wytwarzanie materiałów typu UFG, gdzie średni rozmiar ziarna może wynosić nawet mniej niż 1 mikrometra. Tak silne rozdrobnienie struktury wynika bezpośrednio z mechanicznej destabilizacji pasm ścinania oraz dynamicznej ewolucji podstruktury dyslokacyjnej podczas intensywnego odkształcania. [51].

Analizy numeryczne MES wskazują, że rozkład naprężeń i odkształceń w procesie KOBO jest niejednorodny, a strefy intensywnej deformacji plastycznej występują

w konkretnych miejscach. Największe odkształcenia widać blisko matrycy i jej otworu, co potwierdza lokalny charakter całego procesu. Badania wykazały też, że każda zmiana kierunku ruchu matrycy powoduje, że strefy te przesuwają się w inne obszary materiału. To jedna z głównych cech procesu KOBO, która odróżnia go od wyciskania konwencjonalnego. W konwencjonalnych metodach odkształcenie ma charakter monotoniczny i skupia się głównie tam, gdzie materiał ma bezpośredni kontakt z narzędziem. [52].

Z modelowania numerycznego wynika, że rozkład odkształcenia w KOBO jest niejednorodny, a to, jak przebiega, zależy od warunków kinematycznych i oscylacyjnego ruchu matrycy. [53].

Na to, jak aktywne są mechanizmy odkształcenia i jak bardzo jest ono jednorodne, wpływają też rodzaj sieci krystalicznej, tekstura oraz same warunki procesu. W stopach magnezu o sieci heksagonalnej bardzo ważne są poślizg i bliźni kowanie, a to, który z tych mechanizmów dominuje, zależy między innymi od temperatury i orientacji krystalograficznej. Przykładowo, badania stopu AZ31B pokazują, że aktywność poślizgu wpływa na anizotropię odkształcenia plastycznego. [54]. Z kolei materiały o ciasno upakowanej sieci heksagonalnej, jak magnez czy tytan, mają mniej dostępnych systemów poślizgu. To sprawia, że odkształcenie koncentruje się w wąskich pasmach ścinania i intensywniej się lokalizuje. Dlatego przy procesach KOBO z użyciem materiałów o strukturze HCP trzeba bardzo precyzyjnie dobierać parametry kinematyczne. Pozwala to uniknąć przedwczesnych pęknięć i ograniczyć niejednorodność mikrostruktury otrzymanych wyrobów.

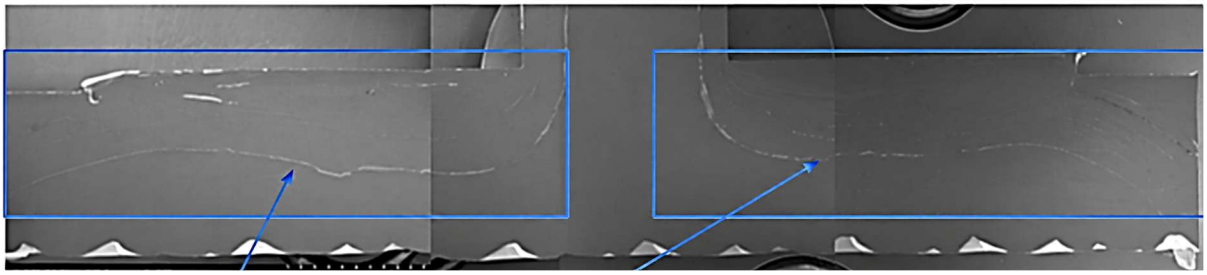
To, gdzie dokładnie dochodzi do lokalizacji odkształcenia w procesie KOBO, ma duży wpływ na końcowy efekt. Może to sprzyjać rozdrobnieniu mikrostruktury, umocnieniu materiału i poprawie jego właściwości mechanicznych. Należy jednak uwzględnić, że nadmierna koncentracja odkształcenia może prowadzić do mikropęknięć i niejednorodności mikrostruktury. Dlatego tak ważne jest odpowiednie dobranie parametrów procesu, aby kontrolować ewolucję mikrostruktury [55].

Podsumowując, lokalizacja odkształcenia to jeden z najważniejszych mechanizmów decydujących o tym, jak przebiega proces KOBO oraz jakie właściwości będą miały gotowe wyroby. Zjawisko to wynika z połączenia kilku czynników cyklicznie zmieniających się naprężeń ścinających, tarcia między materiałem a narzędziem oraz parametrów

geometrycznych i kinematycznych całego procesu. Zrozumienie tego, co odpowiada za lokalizację odkształcenia, jest kluczowe przy doborze parametrów technologicznych. Dzięki temu można uzyskać materiały o jednorodnej, ultradrobnoziarnistej strukturze i właściwościach mechanicznych, które spełnią wymagania nowoczesnej inżynierii.

W badaniach Zwolaka i współautorów [56] wykorzystano naprzemienne krążki ze stopu aluminium 7075-T6 oraz warstwy miedzi, które służyły jako znaczniki. Dzięki obserwacji ich położenia po wyciskaniu można było ocenić, jak przemieszcza się materiał i gdzie zmienia on swój kierunek płynięcia. Analizie poddano między innymi przekroje wzdłużne piętki, obejmujące zarówno pozostałość wsadu, jak i fragment wyciśniętego wyrobu.

Na rysunku 1.14 widać zakrzywiony przebieg warstw znacznikowych, co pokazuje, że odkształcenie w obszarze piętki nie jest jednorodne. Zmiana ich orientacji dowodzi, że materiał nie płynie tylko wzdłuż osi, ale przemieszcza się również w stronę otworu matrycy. Taki obraz pozwala prześledzić, jak zmienia się układ warstw, gdy materiał przechodzi przez strefę odkształcenia. Zaznaczone miejsca, w których znaczniki ulegają lokalnemu zakrzywieniu, stanowią swoisty zapis tego, jak przebiegał przepływ materiału.



Rysunek 1.14 Przykładowa makrostruktura piętki po wyciskaniu metodą KOBO, strzałki ilustrują charakterystyczny sposób płynięcia materiału [56]

Podczas procesu KOBO stempel przemieszcza się osiowo, a matryca wykonuje ruch obrotowy w obie strony, co cyklicznie zmienia sposób, w jaki odkształca się materiał. Analizując układ znaczników, można powiązać ostateczną makrostrukturę piętki z tym, jak działa narzędzie. Pomaga to też lepiej ocenić siłę wyciskania oraz właściwości gotowych wyrobów. Takie badania są przydatne również wtedy, przy porównywaniu, jak geometria powierzchni czołowej matrycy wpływa na przepływ metalu. Trzeba jednak pamiętać, że obraz makrostruktury pokazuje tylko końcowy efekt odkształcenia. Nie da się na jego podstawie bezpośrednio określić lokalnych prędkości płynięcia ani dokładnego rozkładu odkształcenia.

2. Metody oceny efektów transformacji i identyfikacji elementów struktury wewnętrznej metali.

Mikroskopia w badaniach materiałów metalicznych

Mikroskopia to jedna z najważniejszych metod badawczych w inżynierii materiałowej, jeśli chodzi o analizę mikrostruktury metali. Mikroskopia umożliwia ocenę morfologii i rozmieszczenia składników fazowych oraz obserwację granic ziaren i defektów mikrostruktury. Pozwala to również zrozumieć, jak budowa wewnętrzna wpływa na właściwości mechaniczne i to, jak materiał zachowuje się podczas eksploatacji. [57]. Współczesne badania opierają się głównie na mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Te techniki wzajemnie się uzupełniają, oferując informacje na różnych poziomach powiększenia. Coraz częściej metody obrazowania łączy się z analizą składu chemicznego, na przykład za pomocą spektroskopii EDS. Dzięki temu można jednocześnie badać morfologię i skład chemiczny, co daje pełny obraz charakterystyki materiału. W praktyce pozwala to znacznie dokładniej określić, jak procesy takie jak odlewanie, obróbka cieplna czy intensywne odkształcanie plastyczne zmieniają strukturę materiału. [57,58].

Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM)

Skaningowa mikroskopia elektronowa pozwala na szczegółową obserwację powierzchni próbki i jej mikrostruktury, oferując znacznie lepszą rozdzielczość niż tradycyjna mikroskopia świetlna. Wykorzystuje się ją głównie do badania morfologii, wielkości i rozmieszczenia małych cząstek czy wydzieleń, a także do analizy mikropęknięć i powierzchni przełomów [59].

To, jakie informacje uda się uzyskać, zależy od rodzaju rejestrowanego sygnału. Obrazy elektronów wtórnych pokazują przede wszystkim topografię powierzchni i kształt badanych obiektów. Z kolei obrazy elektronów wstecznie rozproszonych umożliwiają wyróżnienie obszarów o różnej średniej liczbie atomowej, co pomaga rozpoznać zróżnicowanie składu w mikrostrukturze. Warto jednak pamiętać, że sam kontrast BSE nie wystarczy, żeby jednoznacznie określić rodzaj danej fazy [59,60].

Obserwacje SEM można wzbogacić o mikroanalizę EDS, która dostarcza danych o lokalnym składzie pierwiastkowym. Dzięki połączeniu obu tych metod można bezpośrednio powiązać wygląd i rozmieszczenie składników mikrostruktury z konkretnymi pierwiastkami w badanych obszarach [60]. W efekcie SEM stanowi podstawę do wyboru miejsc, które wymagają jeszcze bardziej szczegółowej analizy chemicznej lub krystalograficznej. [59].

Obserwacje w trybie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE)

Obrazowanie z użyciem elektronów wstecznie rozproszonych pozwala rozróżnić obszary mikrostruktury na podstawie kontrastu zależnego głównie od średniej liczby atomowej. Obszary zawierające cięższe pierwiastki są na ogół jaśniejsze, a zawierające lżejsze pierwiastki ciemniejsze [59].

Metoda umożliwia ocenę morfologii, wielkości i rozmieszczenia wydzieleń oraz wskazanie obszarów o zróżnicowanym składzie [59]. Obserwacje BSE można następnie uzupełnić mikroanalizą EDS, aby określić skład pierwiastkowy wybranych obszarów [61]. Sam kontrast BSE nie stanowi jednoznacznej identyfikacji fazy.

Mikroanaliza rentgenowska EDS

Mikroanaliza rentgenowska EDS stanowi uzupełnienie obserwacji wykonywanych w skaningowym mikroskopie elektronowym. Dzięki niej można zidentyfikować konkretne pierwiastki i oszacować ich zawartość, opierając się na charakterystycznym promieniowaniu rentgenowskim emitowanym przez badaną próbkę [60]. Stosując pomiary punktowe, liniowe lub mapy EDS, można dokładnie określić lokalny skład chemiczny oraz sprawdzić, jak pierwiastki są rozmieszczone w mikrostrukturze [62].

W przypadku materiałów metalicznych metoda ta jest szczególnie przydatna do rozpoznawania składu wydzieleń i wykrywania niejednorodności chemicznych. Trzeba jednak pamiętać, że wyniki wymagają ostrożnej intestacji. Wynika to głównie z ograniczeń przy analizie lekkich pierwiastków oraz faktu, że sygnał pochodzi z określonej objętości materiału. Co więcej, sam skład uzyskany z EDS nie zawsze wystarczy, żeby jednoznacznie zidentyfikować konkretną fazę krystaliczną [63].

Dyfrakcja elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD)

EBSD to technika krystalograficzna, której używa się w skaningowych mikroskopach elektronowych. Dzięki niej można precyzyjnie określić orientację krystalograficzną ziaren, ich wielkość oraz kształt, a także sprawdzić charakter granic ziaren i lokalne różnice w ich orientacji. Wyniki uzyskane metodą EBSD przydają się do analizy mikrostruktury, badania stopnia odkształcenia czy zmian w strukturze ziarnowej. Metoda ta może też pomóc w ocenie procesów odnowy struktury, choć warto pamiętać, że interpretacja mechanizmów rekrystalizacji wymaga uwzględnienia warunków przetwarzania oraz innych uzyskanych wyników badań. [64,65]

Znaczenie badań mikroskopowych w analizie stopów aluminium

Badania mikroskopowe są niezwykle ważne przy analizie stopów aluminium. Pozwalają one dokładnie przyjrzeć się mikrostrukturze i zrozumieć, jak jej charakter wpływa na właściwości mechaniczne oraz użytkowe materiału [66]. Na to, jak wygląda mikrostruktura, wpływa wiele czynników, takich jak skład chemiczny, sposób krzepnięcia, obróbka cieplna czy procesy plastyczne. Warto pamiętać, że nawet drobne zmiany w wielkości ziaren, kształcie wydzieleń czy rozmieszczeniu faz wtórnych mogą znacząco zmienić wytrzymałość, plastyczność, odporność na korozję czy trwałość zmęczeniową materiału [67].

Dzięki mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej można ocenić, czy mikrostruktura jest jednorodna, zidentyfikować fazy międzymetaliczne i sprawdzić, co zmienia się podczas różnych procesów technologicznych. Bardzo przydatne są obserwacje SEM połączone z analizą EDS, bo pozwalają one jednocześnie zbadać zarówno morfologię, jak i skład chemiczny wydzieleń. Dzięki temu można łatwo wskazać fazy odpowiedzialne za zmiany właściwości mechanicznych i zrozumieć mechanizmy kształtujące strukturę materiału.

Jeśli stop aluminium jest poddawany intensywnemu odkształceniu plastycznemu, badania mikroskopowe pomagają ocenić, jak bardzo rozdrobniona stała się mikrostruktura, jak rozłożyły się fazy wtórne i jak zmienił się kształt wydzieleń w trakcie produkcji. Wszystkie te wyniki pozwalają zinterpretować zmiany w właściwościach mechanicznych, co z kolei ułatwia optymalizację parametrów procesu, aby uzyskać materiał o dokładnie takich właściwościach, jakich potrzebujemy [67].

3. Cechy szczególne wybranych stopów aluminium

Stopy aluminium to jedna z najważniejszych grup materiałów konstrukcyjnych, z których korzysta współczesny przemysł. Ich popularność bierze się z unikalnego połączenia właściwości fizycznych, mechanicznych i technologicznych. Do ich największych zalet należą przede wszystkim niska gęstość, wysoka odporność na korozję (dzięki ochronnej warstwie tlenków), dobra przewodność cieplna i elektryczna oraz bardzo korzystny stosunek wytrzymałości do masy [68]. Dobór składu chemicznego oraz obróbki cieplnej i plastycznej umożliwia kształtowanie właściwości stopów aluminium odpowiednio do wymagań danego zastosowania.

Właśnie dzięki tym cechom stopy aluminium mają szerokie zastosowanie między innymi w lotnictwie, motoryzacji, budownictwie, przemyśle chemicznym czy obronnym. Używa się ich do budowy konstrukcji nośnych, pojazdów, części maszyn, urządzeń elektrycznych, sprzętu sportowego oraz sprzętu gospodarstwa domowego. Ponieważ dzisiejsza technologia wymaga coraz lżejszych, a jednocześnie wytrzymalszych konstrukcji, znaczenie aluminium w nowoczesnej inżynierii materiałowej stale rośnie [69].

Kluczowym pojęciem w procesach przeróbki metali jest odkształcalność. Odkształcalność oznacza zdolność materiału do trwałej zmiany kształtu lub wymiarów pod wpływem sił zewnętrznych, ale bez ryzyka, że materiał straci swoją ciągłość [70]. To jedna z najważniejszych właściwości mechanicznych, bo to właśnie ona decyduje o tym, czy dany materiał nadaje się do walcowania, kucia, wyciskania, ciągnienia czy wytłaczania.

To, jak bardzo materiał daje się odkształcić, zależy od wielu powiązanych ze sobą czynników. Od wewnętrznej strony, liczy się rodzaj i struktura sieci krystalicznej, wielkość i kształt ziaren, charakter granic między nimi, skład fazowy, a także to, jak rozmieszczone są cząstki faz wtórnych i czy w strukturze nie ma zanieczyszczeń. Z kolei czynniki zewnętrzne to przede wszystkim temperatura procesu, prędkość odkształcania oraz rodzaj naprężeń, jakie występują w materiale. Wszystkie te parametry współpracują ze sobą, wpływając na to, jak przebiega deformacja, jakie mechanizmy są aktywne i jak dużo materiał może wytrzymać, zanim zacznie się uszkadzać [71].

Metale i ich stopy to materiały konstrukcyjne, które potrafią przenosić spore obciążenia, zachowując przy tym swoją spójność. Podczas przeróbki plastycznej siły zewnętrzne wywołują

naprężenia, które prowadzą do odkształcenia. To, jak duże i jakie będzie to odkształcenie, zależy od siły, jaką przyłożymy, oraz od właściwości samego materiału.

Na samym początku obciążania materiał odkształca się sprężyście. Jest to proces odwracalny, więc gdy tylko przestaniemy naciskać, materiał wróci do swojego pierwotnego kształtu. W tym zakresie obowiązuje prawo Hooke'a, które mówi, że odkształcenie jest proporcjonalne do naprężenia. Jednak, gdy obciążenie wzrośnie i przekroczy granicę plastyczności, materiał przechodzi w zakres odkształcenia plastycznego. Wtedy zmiana kształtu staje się trwała i nie znika po zdjęciu sił. To zjawisko jest fundamentem wszystkich procesów takich jak walcowanie, kucie czy ciągnienie [72].

Stopy aluminium bardzo dobrze poddają się odkształcaniu plastycznemu, głównie dzięki regularnej sieci krystalicznej ściennie centrowanej. Ułatwia to przemieszczanie się dyslokacji i sprawia, że odkształcanie przebiega równomiernie w wielu warunkach. Z drugiej strony, ta zdolność może drastycznie spaść w niekorzystnych sytuacjach, na przykład przy niskiej temperaturze, zbyt dużej prędkości odkształcania lub gdy w materiale są twarde cząstki faz wtórnych, które mają za zadanie go umacniać. W takich przypadkach naprężenia mogą się kumulować w jednym miejscu, co prowadzi do powstawania mikropęknięć, kruchego pękania i innych wad, które psują jakość gotowego produktu [73].

To, jakie właściwości ma dany stop aluminium, zależy głównie od jego składu chemicznego oraz tego, jak był poddawany obróbce cieplnej czy plastycznej. Stopy te dzieli się na różne serie w zależności od tego, jakie pierwiastki zostały dodane i jak przebiega proces ich wzmacniania. Najczęściej spotyka się serie 2xxx (z miedzią), 5xxx (z magnezem), 6xxx (z magnezem i krzemem) oraz 7xxx (z cynkiem, magnezem i miedzią). Każda z tych grup działa trochę inaczej, wykorzystując umocnienie roztworowe, odkształceniowe lub wydzieleniowe. Dzięki temu można precyzyjnie dobrać parametry mechaniczne materiału do konkretnych potrzeb inżynieryjnych.

Stopy z serii 7xxx mają największy potencjał wytrzymałościowy, a ich głównymi składnikami są cynk, magnez i miedź. Ze względu na bardzo wysoką wytrzymałość właściwą, materiały te są powszechnie wykorzystywane w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Należy jednak pamiętać, że stopy te mają też swoje wady, takie jak mniejsza plastyczność oraz większa

podatność na korozję naprężeniową i pękanie międzykrystaliczne, co niestety ogranicza ich zastosowanie [74].

W przypadku procesów intensywnego odkształcania plastycznego, na przykład przy wyciskaniu metodą KOBO, kluczowe staje się zrozumienie tego, jak stopy aluminium zachowują się pod wpływem złożonych naprężeń i silnego ścinania. Odpowiedni dobór parametrów procesu umożliwia kontrolowanie zmian mikrostruktury, w tym jej rozdrobnienia oraz kształtowanie właściwości mechanicznych materiału. W efekcie otwiera to zupełnie nowe możliwości wykorzystania stopów aluminium w nowoczesnych konstrukcjach inżynierskich.

Właściwości aluminium i jego stopów

Właściwości metali i ich stopów są w znacznym stopniu związane z charakterem wiązania metalicznego, które występuje zarówno w stanie ciekłym, jak i stałym. Powstaje ono w wyniku oddziaływania dodatnio naładowanych rdzeni atomowych ze zdelokalizowanymi elektronami walencyjnymi, tworzącymi wspólną chmurę elektronową, określaną jako gaz elektronowy [75]. Elektrony te mogą przemieszczać się w objętości metalu, podczas gdy w stanie krystalicznym rdzenie atomowe zajmują określone położenia w węzłach sieci. Taka budowa odpowiada między innymi za wysoką przewodność elektryczną i cieplną, metaliczny połysk oraz zdolność metali do odkształcenia plastycznego [76].

Zachowanie metali podczas odkształcenia zależy również od ich budowy krystalicznej. Do najczęściej występujących struktur należą sieć regularna ściennie centrowana A1, sieć regularna przestrzennie centrowana A2 oraz sieć heksagonalna zwarta A3 [77]. Rodzaj sieci wpływa na aktywność systemów poślizgu, a przez to na właściwości mechaniczne i podatność materiału na obróbkę plastyczną. Aluminium krystalizuje w sieci FCC, w której występuje dwanaście systemów poślizgu. Ich aktywność w temperaturze pokojowej ułatwia ruch dyslokacji i umożliwia uzyskiwanie znacznych odkształceń plastycznych. Ma to znaczenie w procesach przeróbki plastycznej aluminium i jego stopów, w tym podczas intensywnego odkształcenia metodą KOBO.

Rzeczywiste kryształy metali zawierają defekty sieciowe powstające podczas krystalizacji i późniejszej obróbki materiału. Należą do nich defekty punktowe, takie jak wakancje i atomy międzywęzłowe, defekty liniowe w postaci dyslokacji oraz defekty powierzchniowe, obejmujące między innymi granice ziaren [78]. Defekty punktowe uczestniczą w procesach

dyfuzyjnych, natomiast ruch dyslokacji jest podstawowym mechanizmem odkształcenia plastycznego. Podczas walcowania, kucia, ciągnienia czy wyciskania dyslokacje są generowane i przemieszczane, a ich gęstość oraz rozmieszczenie ulegają zmianie. Wpływa to na umocnienie odkształceniowe, mikrostrukturę i końcowe właściwości mechaniczne wyrobów.

Aluminium należy do najważniejszych metali konstrukcyjnych wykorzystywanych w przemyśle. Jego udział w europejskiej produkcji metali nieżelaznych wynosi około 30% [79]. Czyste aluminium jest metalem o srebrzystobiałej barwie, liczbie atomowej 13, masie atomowej 26,9815 u oraz gęstości około 2,70 g/cm³. Nie wykazuje przemian alotropowych. Mała gęstość w połączeniu z korzystnymi właściwościami użytkowymi sprzyja zastosowaniu aluminium i jego stopów w konstrukcjach, w których istotna jest masa elementów. Temperatura topnienia aluminium wynosi około 660°C, a temperatura wrzenia około 2450°C. Aluminium i jego stopy można poddawać podstawowym procesom przeróbki plastycznej, takim jak walcowanie, wyciskanie, kucie, ciągnienie i tłoczenie. Odpowiednio dobrane stopy znajdują również zastosowanie w odlewnictwie. Podatność aluminium na przetwarzanie pozwala wytwarzać zarówno masywne elementy konstrukcyjne, jak i cienkościenne profile oraz folie o grubości rzędu kilku mikrometrów.

Do głównych pierwiastków stopowych stosowanych w stopach aluminium należą miedź (Cu), krzem (Si), magnez (Mg), mangan (Mn), cynk (Zn) oraz lit (Li). Ich rodzaj i zawartość pozwalają kształtować skład stopów oraz dostosowywać ich właściwości mechaniczne, fizyczne i technologiczne do określonych zastosowań. W stopach mogą występować także mniejsze ilości żelaza (Fe), niklu (Ni), chromu (Cr), tytanu (Ti), cyrkonu (Zr), wanadu (V), kobaltu (Co) i boru (B). W zależności od składu pierwiastki te wpływają na mikrostrukturę, przebieg krystalizacji i przemian fazowych, a także na właściwości użytkowe materiału. Ważną metodą zwiększania wytrzymałości wybranych stopów aluminium jest umacnianie wydzieleniowe. Wykorzystuje ono zmianę rozpuszczalności składników stopowych wraz z temperaturą po przesycaniu i starzeniu w materiale powstają wydzielenia utrudniające ruch dyslokacji [vii]. Mechanizm ten ma szczególne znaczenie dla stopów serii 2xxx (Al-Cu), 6xxx (Al-Mg-Si) oraz 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu) [80]. Stopy aluminium znajdują dzięki swoim właściwościom zastosowanie między innymi w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, transportowym i budowlanym. [81].

Aluminium charakteryzuje się wysoką przewodnością elektryczną i cieplną, więc znajduje zastosowanie w elektrotechnice, energetyce czy przy produkcji wymienników ciepła. Bardzo ważną cechą tego metalu jest też jego odporność na korozję atmosferyczną. Dzieje się tak dlatego, że na jego powierzchni naturalnie tworzy się cienka, szczelna i trwała warstwa tlenku aluminium (Al2O3). Warstwa ta ogranicza dalsze utlenianie metalu i chroni metal przed warunkami pogodowymi, wieloma kwasami organicznymi oraz stężonym kwasem azotowym. Trzeba jednak pamiętać, że odporność aluminium spada w wodzie morskiej oraz w kontakcie z silnymi zasadami czy kwasami nieutleniającymi. Żeby produkty z aluminium służyły jeszcze dłużej, często stosuje się anodowanie. To proces elektrochemiczny, dzięki któremu tworzy się warstwa tlenkowa znacznie grubsza, gęstsza i stabilniejsza niż ta powstająca samoistnie. Taka powłoka nie tylko chroni przed korozją i ścieraniem, ale też wygląda bardzo estetycznie, co pozwala wykorzystywać aluminium w znacznie trudniejszych warunkach, gdzie liczy się wysoka trwałość [68].

Podział stopów aluminium

Stopy aluminium przeznaczone do obróbki plastycznej klasyfikuje się według sposobu kształtowania ich właściwości mechanicznych. Wyróżnia się stopy nieutwardzalne cieplnie, których wytrzymałość zwiększa się przede wszystkim przez umocnienie odkształceniowe, oraz stopy utwardzalne cieplnie, w których można zastosować umacnianie wydzieleniowe [82]. Podstawę tego podziału stanowi możliwość wykorzystania zmian rozpuszczalności pierwiastków stopowych w osnowie aluminiowej wraz z temperaturą. W stopach nieutwardzalnych cieplnie przesycanie i starzenie nie prowadzą do istotnego wzrostu wytrzymałości. Oprócz umocnienia wywołanego zgniotem na ich właściwości mechaniczne może wpływać umocnienie roztworowe [83].

W stopach utwardzalnych cieplnie rozpuszczalność wybranych składników stopowych zmniejsza się wraz z obniżaniem temperatury. Pozwala to zastosować przesycanie i starzenie, podczas którego powstają drobne wydzielenia ograniczające ruch dyslokacji. W rezultacie wzrastają wytrzymałość i twardość materiału [84]. Stopy aluminium przeznaczone do obróbki plastycznej zawierają zazwyczaj mniejsze ilości pierwiastków stopowych niż stopy odlewnicze, co sprzyja ich podatności na odkształcenie. Do głównych dodatków należą miedź, magnez, mangan, krzem oraz cynk. W mniejszych ilościach mogą występować również nikiel, chrom, lit, kobalt, tytan, cyrkon, wanad, bor i ołów. Pierwiastki te, zależnie od składu stopu,

wpływają między innymi na mikrostrukturę, stabilność cieplną, wielkość ziarna oraz właściwości użytkowe materiału [85, 86, 87].

Według klasyfikacji Aluminum Association, seria 1xxx to aluminium techniczne o wysokiej czystości, które wyróżnia się przewodnością i odpornością na korozję. Seria 2xxx obejmuje stopy aluminium z dodatkiem miedzi, natomiast seria 3xxx opiera się na połączeniu aluminium z manganem. Kolejna grupa, czyli seria 4xxx, obejmuje stopy krzemowe, a seria 5xxx to stopy Al-Mg, które są cenione przede wszystkim za dobrą spawalność i odporność na korozję. Stopy z serii 6xxx zawierają magnez i krzem, co pozwala im łączyć zdolność do utwardzania cieplnego z bardzo dobrą obrabialnością. Seria 7xxx obejmuje stopy aluminium z dodatkiem cynku i magnezu, często również miedzi, stosowane w konstrukcjach wymagających wysokiej wytrzymałości.

4. Krytyczna analiza stanu zagadnienia. Wnioski

W ciągu ostatnich dwudziestu lat technologia kształtowania plastycznego metali przeszła duży postęp. Głównym celem tych zmian było uzyskanie materiałów o strukturze ultradrobnoziarnistej lub wręcz nanokrystalicznej. W tym kontekście kluczową rolę odegrały metody intensywnego odkształcania plastycznego, czyli tak zwane procesy SPD. Do najpopularniejszych z nich należą wyciskanie przez kanał kątowy (ECAP), skręcanie pod wysokim ciśnieniem (HPT), kumulacyjne walcowanie z łączeniem (ARB) oraz powtarzalne fałdowanie z prostowaniem (RCS). To, co czyni je wyjątkowymi, to możliwość wprowadzenia dużych odkształceń przy jednoczesnym zachowaniu niemal niezmienionego kształtu materiału, co pozwala na bardzo skuteczną modyfikację jego mikrostruktury [88].

Teoretyczne podstawy i możliwości technologiczne metod SPD zostały bardzo dokładnie opisane przez Segala, Valieva i Langdona. Wykazali oni, że podczas tak intensywnego odkształcania zachodzą skomplikowane procesy ewolucji mikrostruktury. Chodzi tu o masowe generowanie i reorganizację dyslokacji, tworzenie się podziaren oraz stopniowy wzrost dezorientacji granic ziaren. Wszystko to prowadzi do powstania struktury ultradrobnoziarnistej z dużą gęstością granic wysokokątowych. W praktyce przekłada się to na wyraźną poprawę właściwości mechanicznych, takich jak twardość, wytrzymałość czy granica plastyczności, przy zachowaniu korzystnej plastyczności materiału [9, 10, 88].

Na tle innych klasycznych metod SPD proces KOBO wyróżnia się zupełnie inną kinematyką. Wynika ona z połączenia ruchu postępowego stempla z oscylacyjnym ruchem obrotowym matrycy. Takie nałożenie się dwóch rodzajów ruchu tworzy złożony stan naprężeń i odkształceń, który znacznie różni się od stanu występującego podczas wyciskania konwencjonalnego. Zasady działania i mechanizm KOBO zostały szczegółowo wyjaśnione w dokumentacji patentowej [33] oraz w wielu pracach Korbla, Bochniaka i ich zespołów [2]. Dzięki temu, że do procesu wyciskania dodaje się cyklicznie zmienny moment skręcający, powstają zmienne w czasie naprężenia ścinające, które okresowo zmieniają tor odkształcania.

W efekcie tworzą się i przemieszczają lokalne pasma ścinania, w których koncentruje się całe odkształcenie. Ten mechanizm sprzyja intensywnej reorganizacji podstruktury dyslokacyjnej, aktywuje dynamiczną rekrystalizację i pomaga w rozdrobnieniu mikrostruktury. To właśnie dlatego proces KOBO jest tak skuteczny w kształtowaniu właściwości metali.

Literatura potwierdza, że proces KOBO można skutecznie wykorzystać do kształtowania różnych metali i stopów nieżelaznych, takich jak aluminium, magnez czy tytan. To, jak wydajny będzie ten proces oraz jakie zmiany zajdą w mikrostrukturze i właściwościach materiału, zależy głównie od rodzaju użytego surowca i ustawionych parametrów technologicznych. [89]. Dzięki zastosowaniu cyklicznie zmiennego momentu skręcającego udaje się obniżyć opory plastycznego płynięcia. W praktyce oznacza to, że proces można przeprowadzić w niższych temperaturach i przy mniejszej sile wyciskania niż w przypadku tradycyjnych metod przeróbki plastycznej.

Jeśli chodzi o stopy aluminium, badania pokazują, że KOBO sprzyja intensywnemu rozdrobnieniu mikrostruktury. Pozwala to na uzyskanie struktury ultradrobnoziarnistej (UFG), w której dominują granice ziaren o dużych kątach dezorientacji. Taka mikrostruktura realnie poprawia właściwości mechaniczne, podnosząc granicę plastyczności, wytrzymałość i twardość, a przy tym pozwala zachować korzystną plastyczność materiału. Wyniki prac opisanych w [89] potwierdzają wysoką efektywność procesu KOBO w zakresie kształtowania ultradrobnoziarnistej mikrostruktury stopów aluminium oraz wskazują na istotny wpływ parametrów procesu na przebieg ewolucji mikrostrukturalnej materiału.

Porównując KOBO z klasycznymi metodami intensywnego odkształcania, takimi jak ECAP czy HPT, widać wyraźną różnicę proces KOBO rzadziej powoduje powstawanie makroskopowych stref lokalizacji odkształcenia. Wynika to z faktu, że dzięki odwracalnemu ruchowi obrotowemu matrycy kierunek naprężeń ścinających zmienia się cyklicznie. Ta okresowa zmiana toru odkształcenia sprawia, że deformacja nie kumuluje się w jednym miejscu, lecz rozkłada się znacznie bardziej równomiernie w całej objętości materiału.

Taka większa jednorodność odkształcenia ma bardzo pozytywny wpływ na mikrostrukturę, prowadząc do równomiernego rozdrobnienia ziaren i ograniczając powstawanie lokalnych koncentracji naprężeń. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko pojawienia się mikropęknięć i uszkodzeń, co bezpośrednio przekłada się na lepszą jakość wyrobów i ich lepsze właściwości mechaniczne. To właśnie jedna z głównych zalet procesu KOBO względem innych metod intensywnego odkształcania, szczególnie w przypadku materiałów o ograniczonej podatności na odkształcenie plastyczne.

W literaturze fachowej często pojawia się temat wpływu parametrów kinematycznych procesu KOBO na to, jak materiał ulega odkształceniu plastycznemu i jak zmienia się jego mikrostruktura. Badacze skupiają się zwłaszcza na częstotliwości oscylacji matrycy, amplitudzie jej obrotu oraz prędkości wyciskania, ponieważ to właśnie te czynniki w dużej mierze decydują o przebiegu zmian mikrostrukturalnych.

W badaniach przeprowadzonych przez Kawałkę i współpracowników [90]wykazano, że wraz ze zwiększeniem częstotliwości oscylacji matrycy proces dynamicznej rekrystalizacji staje się intensywniejszy. W efekcie struktura ulega dalszemu rozdrobnieniu, a średnia wielkość ziarna maleje. Zauważono też, że odpowiedni dobór parametrów procesu, uda się uzyskać bardziej jednorodną mikrostrukturę, co bezpośrednio przekłada się na lepsze właściwości mechaniczne gotowych produktów.

Duże znaczenie dla zrozumienia mechanizmów zachodzących podczas wyciskania metodą KOBO mają także analizy numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych (MES). Dzięki modelowaniu można dokładnie przeanalizować, jak rozkładają się naprężenia, odkształcenia i temperatura w całej objętości materiału, a także sprawdzić, jak parametry technologiczne wpływają na cały proces. Symulacje pokazują, że lokalny rozkład odkształceń i naprężeń zależy w dużej mierze od tarcia na styku materiału i narzędzia, właściwości termicznych materiału oraz intensywności wymiany ciepła. Dodatkowo okazało się, że częstotliwość i amplituda oscylacji matrycy mają wpływ na to, gdzie pojawiają się pasma ścinania i jak jednorodne jest odkształcenie, co ostatecznie determinuje mikrostrukturę i właściwości mechaniczne wyrobu [91].

Osiągnięto znaczny postęp w modelowaniu numerycznym procesu KOBO, naukowcy wciąż pracują nad ulepszeniem modeli konstytutywnych. Chodzi o to, by lepiej uwzględniały one wzajemne powiązania między zjawiskami mechanicznymi, cieplnymi i mikrostrukturalnymi, co pozwoliłoby jeszcze dokładniej odwzorować rzeczywistość.

Ważnym kierunkiem badań jest też sprawdzanie, jak stabilna termicznie jest struktura uzyskana metodą KOBO. Prace Xu i Furukawy [92] pokazują, że struktury typu UFG mają ograniczoną stabilność w wyższych temperaturach. Wynika to z dużej gęstości granic ziaren i nagromadzonej energii odkształcenia. Te czynniki sprawiają, że granice ziaren łatwiej migrują, co prowadzi do ich rozrostu i stopniowej utraty efektu rozdrobnienia. W rezultacie

twardość, granica plastyczności i wytrzymałość materiału spadają, zwłaszcza gdy jest on długo wystawiony na działanie ciepła. Dlatego właśnie ocena stabilności termicznej struktur UFG jest kluczowa dla oceny przydatności materiałów wytwarzanych metodą KOBO do zastosowań praktycznych.

W analizie procesów przeróbki plastycznej kluczowe jest ustalenie, jakie parametry zapewnią stabilne odkształcanie materiału. Dzięki mapom przetwarzania można precyzyjnie wyznaczyć zakresy temperatury i prędkości odkształcenia, w których materiał zachowuje się korzystnie, a także wskazać te obszary, gdzie mogą pojawić się niepożądane niestabilności [93]

Dotychczasowe prace nad procesem KOBO skupiały się głównie na właściwościach mechanicznych i tym, jak zmienia się mikrostruktura podczas intensywnego odkształcania. Znacznie mniej uwagi poświęcono jednak kompleksowej ocenie właściwości fizycznych i fizykochemicznych materiałów po wyciskaniu tą metodą. Dlatego też wpływ procesu na przewodność elektryczną, cieplną, odporność na korozję czy stabilność strukturalną to wciąż tematy wymagające intensywnych badań i stanowią ważne pole do rozwoju tej technologii.

W ostatnich latach próbuje się też wykorzystać metodę KOBO do przetwarzania kompozytów na bazie aluminium. Łącząc intensywne odkształcanie plastyczne z technikami konsolidacji proszków, można tworzyć profile kompozytowe, na przykład materiały aluminiowe wzmacniane cząstkami Sic [94].

Jednym z kierunków rozwoju są badania nad materiałami gradientowymi. W ich przypadku właściwości mechaniczne i mikrostruktura zmieniają się w kontrolowany sposób w zależności od miejsca wewnątrz wyrobu. Pozwala to projektować materiały o specyficznych cechach, idealnie dopasowanych do lokalnych warunków pracy konkretnych elementów konstrukcyjnych.

Mimo obiecujących wyników, wykorzystanie procesu KOBO do produkcji materiałów gradientowych i kompozytów metalicznych wciąż nie jest w pełni poznane. Konieczne są dalsze badania eksperymentalne i numeryczne, aby zrozumieć, jak parametry procesu wpływają na rozkład faz, ewolucję mikrostruktury oraz ostateczne właściwości mechaniczne i eksploatacyjne materiałów.

W swoich opracowaniach Gronostajski i wsp. (2019) wskazali główne kierunki rozwoju obróbki plastycznej metali, wspominając m.in. o wyciskaniu, modelowaniu numerycznym i udoskonalaniu technologii kształtowania. Ich praca daje szerszy kontekst dla rozwoju metod niekonwencjonalnych, gdzie lepsza konstrukcja narzędzi i precyzyjne sterowanie odkształceniem służą jednocześnie poprawie jakości produktów oraz efektywności całego procesu [95]. Bardziej bezpośrednio z tematem pracy wiąże się obszerne opracowanie Leśniaka i współautorów (2024). Autorzy zestawili ze sobą aktualne osiągnięcia w wyciskaniu metali lekkich, kwestie projektowania i trwałości matryc, zmiany w mikrostrukturze oraz procesy intensywnego odkształcenia plastycznego. Analizując metodę KOBO, podkreślili, jak ważny jest rewersyjny ruch obrotowy matrycy. Pozwala on ograniczyć siłę wyciskania bez konieczności wcześniejszego nagrzewania wsadu, co umożliwia stosowanie wysokich współczynników wyciskania i prowadzi do istotnej przebudowy mikrostruktury. Zauważyli też, że ostateczne właściwości wyrobów zależą od materiału, temperatury, prędkości oraz parametrów oscylacji matrycy [96].

Ważnym dopełnieniem tematu parametrów procesu jest kwestia konstrukcji matrycy KOBO. Zwolak i Śliwa (2024) badali, jak geometria powierzchni czołowej matryc wpływa na siłę wyciskania na zimno stopu EN AW-7075, a także na właściwości i strukturę (makro i mikro) gotowych wyrobów. Udowodnili, że modyfikując geometrię narzędzia, można zmniejszyć siłę wyciskania, nie tracąc przy tym pożądanych cech produktu [97]. Wynika z tego, że analizując wpływ częstotliwości oscylacji i współczynnika λ w badaniach własnych, trzeba pamiętać, że geometria matrycy to kolejny czynnik wpływający na przepływ materiału. Warto jednak zaznaczyć, że w niniejszej rozprawie nie przeprowadzano osobnej serii porównawczej matryc o różnych geometriach.

Warto też odróżnić proces KOBO od klasycznego wyciskania, biorąc pod uwagę, że w KOBO nie trzeba wstępnie nagrzewać wsadu. W tradycyjnym wyciskaniu współbieżnym wzrost współczynnika wyciskania λ (przy zachowaniu innych stałych parametrów) zazwyczaj oznacza większą pracę odkształcenia i większe obciążenie narzędzi. Wyższa temperatura pomaga zmniejszyć opór plastyczny, ale może też wywołać procesy zdrowienia i rekrystalizacji, co daje inną mikrostrukturę niż w przypadku odkształcania na zimno, gdzie wyraźniej widać umocnienie odkształceniowe. Z kolei KOBO wprowadza do przepływu osiowego cyklicznie zmienne ścinanie. Może to sprzyjać fragmentacji składników i rozdrobnieniu mikrostruktury, a przy odpowiednim doborze parametrów pozwala na lepsze

wyrównanie właściwości wyrobu. Nie oznacza to jednak, że każdy stop czy każdy zestaw parametrów zareaguje w ten sam sposób [96, 97].

Podsumowując, proces KOBO to jedna z najbardziej perspektywicznych metod intensywnego odkształcania plastycznego służąca do kształtowania mikrostruktury metali. Dzięki połączeniu rewersyjnego ruchu obrotowego matrycy z klasycznym wyciskaniem osiowym, można prowadzić proces przy niższych temperaturach i mniejszej sile wyciskania niż w tradycyjnych technologiach. Metoda ta sprawdza się przy formowaniu materiałów trudnych w obróbce i pozwala uzyskać ultradrobnoziarnistą mikrostrukturę, co przekłada się na wysoką wytrzymałość, twardość i dobrą plastyczność [90,34].

Mimo wielu zalet, mechanizmy zachodzące podczas procesu KOBO wciąż budzą pytania badawcze. konieczne jest dopracowanie modeli opisujących kinetykę dynamicznej rekrystalizacji i zmiany mikrostruktury przy cyklicznie zmieniającym się odkształceniu. Ważnym wyzwaniem jest też ocena długoterminowej stabilności struktur ultradrobnoziarnistych oraz sprawdzenie, jak proces KOBO wpływa na przewodność elektryczną, cieplną czy odporność na korozję. Konieczny jest także dalszy rozwój modeli numerycznych, które potrafiłyby wiernie oddać rzeczywistą kinematykę procesu oraz wzajemne oddziaływania zjawisk mechanicznych, cieplnych i mikrostrukturalnych.

Wnioski z krytycznej analizy stanu zagadnienia

Analiza literatury pokazuje, że wyciskanie metodą KOBO ma duży potencjał w kształtowaniu metali o różnej strukturze i podatności na odkształcanie. Dzięki zastosowaniu ruchu obrotowego matrycy w obie strony, droga odkształcenia zmienia się cyklicznie. To z kolei wpływa na to, jak materiał płynie, jakiej siły potrzeba do procesu oraz jak zmienia się jego mikrostruktura. Trzeba jednak pamiętać, że efekt końcowy zależy nie tylko od parametrów procesu, ale też od składu chemicznego i stanu początkowego materiału. W praktyce oznacza to, że wyników uzyskanych dla jednego stopu nie można bezpośrednio przenosić na inny, więc parametry zawsze trzeba dobierać indywidualnie.

Z przeglądu źródeł wynika, że wciąż brakuje dokładnego wyjaśnienia, jak jednoczesne zmiany częstotliwości oscylacji matrycy i współczynnika wyciskania λ wpływają na siły w procesie, właściwości mechaniczne, jakość powierzchni oraz strukturę wyrobów. Dotychczasowe badania zazwyczaj skupiały się tylko na wybranych parametrach

lub pojedynczych cechach materiału. Brakuje kompleksowych prac, które połączyłyby przebieg procesu z mikrostrukturą, wytrzymałością, jakością powierzchni oraz tym, czy produkt jest jednorodny na całej swojej długości. To właśnie dlatego warto przeprowadzić badania obejmujące różne wartości częstotliwości oscylacji, kąta wychylenia i współczynnika wyciskania, sprawdzając przy tym materiał w różnych miejscach uzyskanego pręta.

Do badań wybrano dwa stopy aluminium, które mają zupełnie inne przeznaczenie i strukturę wyjściową odlewniczy AlSi11 oraz stop Al 5083, który jest typowo przeznaczony do przeróbki plastycznej. Takie zestawienie pozwoli sprawdzić, proces KOBO pod względem przeróbki materiału o ograniczonej odkształcalności, jak i ze stopem, który bardzo dobrze poddaje się kształtowaniu. Używając tych samych zakresów parametrów dla obu stopów, będziemy mogli ocenić, na ile reakcja materiału wynika z samych warunków wyciskania, a na ile z jego składu i struktury.

Wybór stopu AlSi11 wynika z jego szczególnego znaczenia poznawczego i technologicznego. Jest to stop odlewniczy, którego charakterystyczna mikrostruktura, obejmująca osnowę aluminiową, kruchą eutektykę krzemową oraz fazy międzymetaliczne, istotnie ogranicza możliwość stosowania konwencjonalnych procesów przeróbki plastycznej. Przeprowadzenie wyciskania tego materiału metodą KOBO pozwala zweryfikować, czy cykliczna zmiana drogi odkształcenia umożliwia otrzymanie ciągłych wyrobów bez utraty spójności materiału oraz czy prowadzi do fragmentacji i redystrybucji składników mikrostruktury odlewniczej. Uzyskane wyniki mogą wskazać możliwość rozszerzenia zakresu technologicznego wykorzystania stopów Al-Si poza typowe zastosowania odlewnicze.

Z kolei stop Al 5083 to materiał stworzony do obróbki plastycznej. Jest bardzo odporny na korozję, dobrze się spawa i powszechnie stosuje się go w lotnictwie, transporcie czy budownictwie morskim. Jego wytrzymałość wynika głównie z dodatku magnezu i odkształcenia, a nie z wydzielania faz, jak w innych stopach. Badając Al 5083, można sprawdzić, jak parametry KOBO działają na materiał o dobrej plastyczności i czy uda się uzyskać korzystne połączenie wytrzymałości z plastycznością. Będzie on też stanowił punkt odniesienia dla odlewniczego stopu AlSi11.

5. Teza i cel pracy

Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest kompleksowa analiza wpływu wybranych parametrów procesu wyciskania metodą KOBO na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne stopów aluminium AlSi11 i Al 5083. Proces KOBO, zaliczany do metod intensywnego odkształcenia plastycznego (SPD), umożliwia prowadzenie odkształcenia w warunkach cyklicznie zmieniającego się stanu naprężeń ścinających, co sprzyja intensywnemu rozdrobnieniu mikrostruktury oraz poprawie właściwości użytkowych materiałów. Pomimo licznych badań poświęconych tej technologii, wpływ podstawowych parametrów procesu, takich jak częstotliwość oscylacji matrycy oraz współczynnik wyciskania, na przebieg deformacji i właściwości wyrobów nie został dotychczas jednoznacznie określony.

W ramach pracy przeprowadzono badania eksperymentalne mające na celu określenie zależności pomiędzy parametrami procesu KOBO a zmianami zachodzącymi w mikrostrukturze oraz właściwościach mechanicznych analizowanych stopów aluminium. Szczególną uwagę poświęcono ocenie wpływu częstotliwości oscylacji matrycy (3, 5 i 7 Hz) oraz współczynnika wyciskania (λ=36, 60 i 100) na przebieg procesu wyciskania, wartość siły wyciskania, rozwój mikrostruktury oraz właściwości użytkowe otrzymanych prętów.

Zakres badań obejmował

- analizę wpływu częstotliwości oscylacji matrycy oraz współczynnika wyciskania na przebieg procesu wyciskania metodą KOBO,
- określenie zmian wartości maksymalnej siły wyciskania w zależności od parametrów procesu,
- ocenę zmian mikrostruktury stopów AlSi11 i Al 5083 z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej,
- analizę stopnia rozdrobnienia i jednorodności mikrostruktury oraz identyfikację mechanizmów odpowiedzialnych za jej ewolucję,
- określenie wpływu parametrów procesu na rozkład mikrotwardości wzdłuż długości wyciskanych prętów,

- ocenę właściwości mechanicznych materiałów na podstawie prób rozciągania oraz analizę zależności pomiędzy mikrostrukturą a uzyskanymi parametrami wytrzymałościowymi,
- analizę wpływu parametrów procesu na jakość powierzchni wyrobów poprzez pomiary chropowatości.

Realizacja powyższych badań pozwoliła na określenie zależności pomiędzy parametrami procesu KOBO, przebiegiem odkształcenia plastycznego oraz zmianami mikrostrukturalnymi zachodzącymi w badanych stopach aluminium. Uzyskane wyniki umożliwiły ocenę efektywności procesu w zakresie rozdrobnienia mikrostruktury oraz poprawy właściwości mechanicznych materiałów, a także identyfikację parametrów technologicznych zapewniających najkorzystniejsze rezultaty procesu.

Przeprowadzone badania stanowią również podstawę do dalszego rozwoju technologii wyciskania metodą KOBO oraz rozszerzenia jej zastosowania w kształtowaniu właściwości stopów aluminium, zarówno odkształcalnych, jak i odlewniczych. Otrzymane wyniki mogą zostać wykorzystane do optymalizacji parametrów procesu oraz projektowania nowoczesnych technologii wytwarzania wyrobów metalowych o jednorodnej, drobnoziarnistej mikrostrukturze i wysokich właściwościach mechanicznych.

Teza

Zmienna droga odkształcenia, wywołana odpowiednio dobranym oscylacyjnym ruchem matrycy w procesie wyciskania KOBO, umożliwia kontrolowane kształtowanie mikrostruktury i właściwości mechanicznych stopów aluminium, zwłaszcza trudnoodkształcalnych. Końcowy efekt odkształcenia plastycznego jest przy tym determinowany parametrami ruchu oscylacyjnego matrycy, w szczególności częstotliwością i kątem jej oscylacji, a także wielkością odkształcenia (wyrażoną współczynnikiem wyciskania λ) oraz mikrostrukturą wyjściową stopu.

5.1. Cel i zakres badań własnych

Aby zrealizować założone cele pracy, przeprowadzono badania porównawcze dwóch stopów aluminium AlSi11 oraz Al 5083. Materiały te różnią się od siebie składem chemicznym, mikrostrukturą oraz przeznaczeniem technologicznym. Głównym punktem analizy było sprawdzenie, jak częstotliwość oscylacji matrycy oraz współczynnik wyciskania λ wpływają

na przebieg procesu współbieżnego wyciskania metodą KOBO, a także na to, jak te parametry zmieniają mikrostrukturę i właściwości mechaniczne gotowych produktów.

Stop AlSi11 to materiał odlewniczy, który ze względu na obecność kruchej eutektyki krzemowej i faz międzymetalicznych nie nadaje się najlepiej do tradycyjnej obróbki plastycznej. Z kolei stop Al 5083 został stworzony właśnie z myślą o przeróbce plastycznej, a jego wytrzymałość uzyskuje się głównie poprzez roztwarzanie i odkształcanie. Dzięki takiemu zestawieniu można porównać, jak oba materiały zachowują się podczas intensywnego odkształcania oraz jak proces KOBO zmienia ich strukturę i parametry mechaniczne.

Realizacja celu głównego obejmowała

- zweryfikowanie możliwości wytwarzania metodą KOBO ciągłych prętów z odlewniczego stopu AlSi11,
- określenie wpływu częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania badanych stopów,
- określenie wpływu współczynnika wyciskania λ na wartość maksymalnej siły wyciskania,
- ocenę wpływu parametrów wyciskania na właściwości mechaniczne stopów AlSi11 i Al 5083,
- określenie zmian mikrotwardości i jej rozkładu w przekroju oraz na długości otrzymanych prętów,
- ocenę wpływu parametrów procesu na jakość powierzchni ocenianej chropowatością powierzchni wyrobów,
- scharakteryzowanie transformacji mikrostruktury zachodzących podczas wyciskania,
- określenie zmian morfologii i rozmieszczenia eutektyki krzemowej oraz faz międzymetalicznych w stopie AlSi11,
- ocenę pasmowości i rozmieszczenia faz wtórnych w mikrostrukturze wyrobu ze stopu Al 5083,
- porównanie właściwości materiału w początku, części środkowej i końcu wyciskanych prętów,
- określenie jednorodności mikrostruktury i właściwości mechanicznych otrzymanych wyrobów,

- wskazanie parametrów procesu umożliwiających ograniczenie siły wyciskania przy zachowaniu korzystnych właściwości i jakości wyrobów.

Badania przeprowadzono z użyciem wlewków ze stopów AlSi11 oraz Al 5083 o średnicy 60 mm. Materiał wyciskano w temperaturze otoczenia przy użyciu prasy KOBO, stosując maksymalną siłę nacisku wynoszącą 2,5 MN. Parametry technologiczne dobrano na podstawie analizy literatury oraz porównania efektów wyciskania obu stopów, które różnią się od siebie właściwościami mechanicznymi i strukturą. W procesie wykorzystano kąt oscylacji matrycy wynoszący ±8°, prędkość przemieszczania stempla 0,1 mm/s oraz częstotliwości oscylacji na poziomie 3, 5 i 7 Hz. Dodatkowo przetestowano współczynniki wyciskania λ=36, λ=60 i λ=100. Tak ustalony zakres parametrów pozwolił sprawdzić, jak wpływają one na siłę wyciskania, właściwości mechaniczne, jakość powierzchni oraz mikrostrukturę gotowych wyrobów. Przeprowadzona analiza pokazała też, że metodę KOBO można skutecznie wykorzystać do plastycznego kształtowania zaawansowanych stopów metali. Dotyczy to zwłaszcza materiałów trudnoodkształcalnych, takich jak stopy aluminium, przy jednoczesnym uwzględnieniu ich specyfiki oraz możliwości zastosowania w różnych procesach technologicznych.

Podczas procesu rejestrowano siłę wyciskania w odniesieniu do przemieszczenia stempla, co pozwala wyznaczyć jej wartość maksymalną. W celu oceny jednorodności właściwości materiału wzdłuż prętów pobrano próbki z ich początku, środka oraz końca. Dodatkowo prowadzono analizy przekrojów poprzecznych i wzdłużnych, dzięki czemu możliwe było określenie, jak mikrostruktura i mikrotwardość różnią się w zależności od kierunku.

Zakres badań właściwości otrzymanych wyrobów obejmował

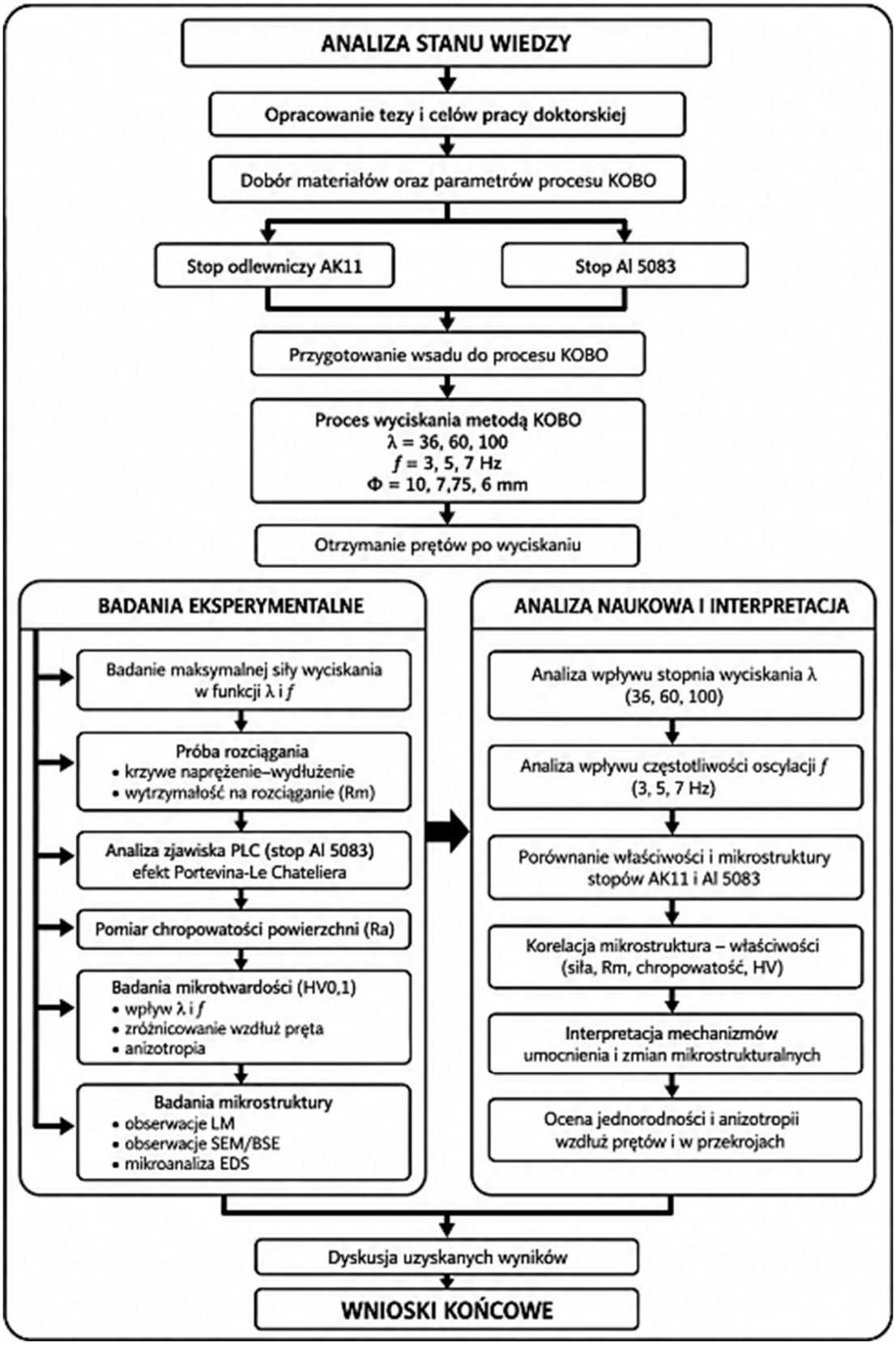
- statyczną próbę rozciągania próbek pobranych z wyciskanych prętów,
- analizę krzywych naprężenie-odkształcenie zarejestrowanych podczas tych prób,
- wyznaczenie podstawowych parametrów wytrzymałościowych i plastycznych badanych próbek. Analizę występowania efektu Portevina-Le Chateliera w stopie Al 5083,
- pomiary mikrotwardości metodą Vickersa,
- pomiary chropowatości powierzchni,
- obserwacje mikrostruktury z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej,

- obserwacje z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej w trybie elektronów wstecznie rozproszonych,
- mikroanalizę składu chemicznego EDS.

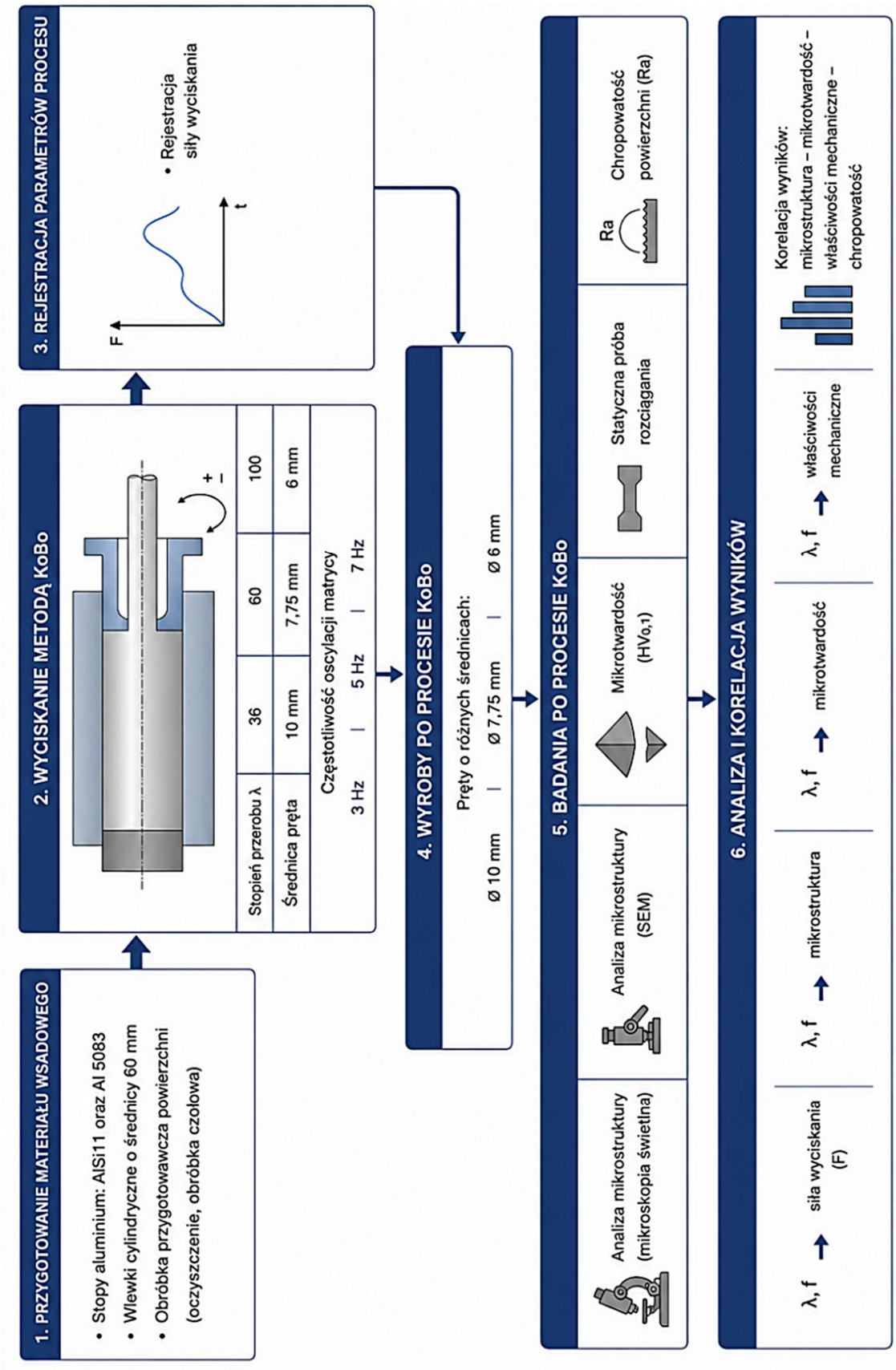
Program własnych badań przygotowano po to, aby sprawdzić, jak parametry wyciskania metodą KOBO wpływają na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne oraz jakość powierzchni stopów aluminium AlSi11 i 5083. Skupiono się na tym, jak częstotliwość oscylacji matrycy oraz współczynniki wyciskania λ oddziałują na przebieg procesu i charakterystyki siłowe. Dzięki zastosowanym metodom badawczym udało się kompleksowo ocenić, jak skuteczna jest technologia KOBO w kształtowaniu zarówno stopu odlewniczego o ograniczonej odkształcalności, jak i stopu przeznaczonego do przeróbki plastycznej.

5.2. Program badań własnych. Materiał i metodyka

Program badań obejmował charakterystykę materiałów wyjściowych, wyciskanie metodą KOBO, przygotowanie próbek oraz ocenę mikrostruktury i właściwości otrzymanych wyrobów. Ogólny program przedstawiono na rysunku 5.1, a schemat metodyki na rysunku 5.2. Szczegółowe warunki poszczególnych badań opisano w dalszej części rozdziału.



Rysunek 5.1 Program badań własnych



Rysunek 5.2 Schemat blokowy metodyki badań obejmujący przygotowanie materiału wsadowego, proces wyciskania metodą KOBO oraz zakres przeprowadzonych badań i analiz.

Materiał do badań

Badania objęły dwa rodzaje stopów aluminium odlewniczy AlSi11 oraz stop Al 5083, który jest przeznaczony do przeróbki plastycznej. Wybór tych konkretnych materiałów pozwolił na porównanie tego, jak reagują one na wyciskanie metodą KOBO, biorąc pod uwagę ich różny skład chemiczny i odmienną strukturę początkową.

Mikrostrukturę stopu AlSi11 stanowiły osnowa α-Al, eutektyka aluminiowo-krzemowa oraz fazy międzymetaliczne. Warto zaznaczyć, że przed samym wyciskaniem materiału nie poddawano homogenizacji cieplnej. Z kolei stop Al 5083, należący do układu Al-Mg-Mn, również został poddany badaniom w formie wlewków. Określenie, że jest on przeznaczony do przeróbki plastycznej, wynika z jego klasyfikacji, a nie z konkretnego stanu, w jakim dostarczono wsad.

Wsad przygotowano w formie cylindrycznych wlewków o średnicy 60 mm i długości 90 mm. Proces przygotowania polegał na oczyszczeniu powierzchni, wyrównaniu końców oraz usunięciu warstwy przypowierzchniowej (Rysunek 5.3).



Rysunek 5.3 Widok ogólny cylindrycznego wlewka przygotowanego do wyciskania metodą KOBO (po lewej) oraz jego powierzchni czołowej (po prawej).

Warunki wyciskania metodą KOBO

Proces wyciskania współbieżnego przeprowadzono na prasie KOBO o maksymalnej sile nacisku 2,5 MN. Wsadu nie nagrzewano bezpośrednio przed procesem. Wyciskanie rozpoczynano w temperaturze otoczenia. Prędkość przesuwu stempla wynosiła 0,1 mm/s, a kąt oscylacji matrycy ±8°. Zmiennymi parametrami były częstotliwość oscylacji

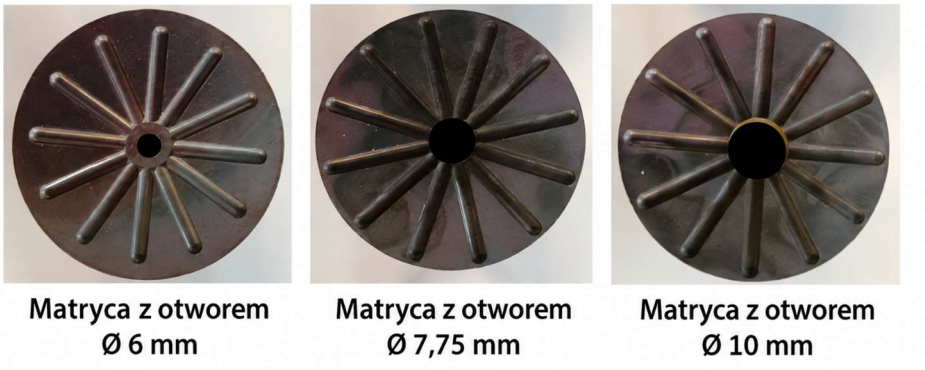
matrycy i współczynnik wyciskania. Brak wstępnego nagrzewania nie oznacza stałej temperatury materiału podczas odkształcania.

Zastosowano matryce o średnicach otworów roboczych 10, 7,75 i 6 mm (Rysunek 5.4). Współczynnik wyciskania określono jako $\lambda=S_0/S_1=(D/d)^2$, gdzie S_0 i S_1 oznaczają pola przekroju wsadu i wyrobu, D-średnicę wsadu, a d-średnicę otworu matrycy. Dla d=7,75 mm wartość λ wynosi około 59,94 i w pracy jest oznaczana jako 60.

Tabela 5.1 Parametry technologiczne i warunki początkowe wyciskania stopów AlSi11 i Al 5083 metodą KOBO.

Parametr	Wartość
Średnica i długość wsadu	60 mm, 90 mm
Średnica otworu matrycy	10 mm, 7,75 mm, 6 mm
Współczynnik wyciskania λ	36, około 60, 100
Częstotliwość oscylacji matrycy	3, 5, 7 Hz
Kąt oscylacji matrycy	±8°
Prędkość przesuwu stempla	0,1 mm/s
Warunki początkowe	Temperatura otoczenia, bez nagrzewania wsadu

Podczas wyciskania rejestrowano siłę w zależności od przemieszczenia tłoka. Za maksymalną siłę Fmax uznano najwyższą wartość, jaką odnotowano w trakcie danego procesu. Porównywanie Fmax pozwala ocenić maksymalne obciążenie układu wyciskającego, ale nie służyło do pomiaru całkowitego zużycia energii.



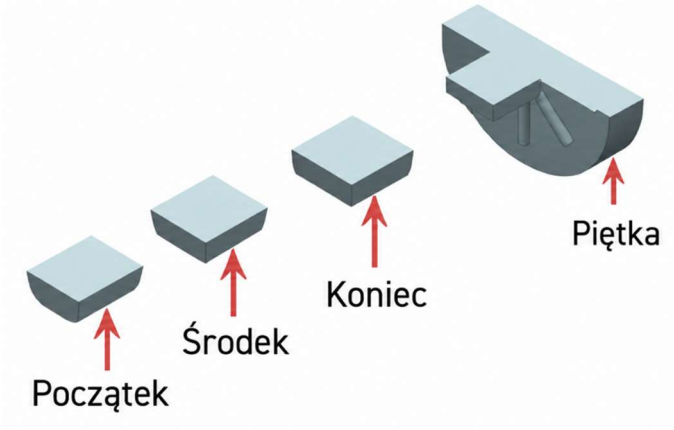
Rysunek 5.4 Matryce zastosowane w procesie wyciskania metodą KOBO o średnicach otworów roboczych wynoszących kolejno od lewej 6 mm, 7,75 mm i 10 mm.

Pobieranie i oznaczanie próbek

Przed pobraniem próbek z każdego wyciśniętego pręta odcinano około 10% jego długości od strony początku oraz około 10% od strony końca. Pozostały odcinek stanowił część użyteczną wyrobu, z której pobierano próbki do badań.

Ze względu na jednakową geometrię wsadu i różne średnice końcowe otrzymane pręty miały różne długości. Miejsca poboru określano zatem względem długości części użytecznej, a nie za pomocą stałych odległości od końców pręta. Próbkę środkową (S) pobierano z połowy długości tego odcinka, natomiast próbki początkową (P) i końcową (K) wyznaczano symetrycznie względem jego środka, w pobliżu obu końców. Takie rozmieszczenie umożliwiało porównanie odpowiadających sobie obszarów wyrobów o różnych długościach.

Schemat lokalizacji próbek przedstawiono na rysunku 5.5. Badania mikrostrukturalne i pomiary mikrotwardości prowadzono na przekrojach podłużnych, równoległych do osi pręta, oraz poprzecznych, prostopadłych do tej osi.



Rysunek 5.5 Schemat miejsc pobierania próbek do badań początek, środek i koniec wyciśniętego pręta oraz piętka.

Statyczna próba rozciągania

Właściwości wytrzymałościowe stopów AlSi11 i Al 5083 oceniano w statycznej próbie rozciągania przeprowadzonej na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 w Laboratorium Przeróbki Plastycznej Katedry Przeróbki Plastycznej Politechniki Rzeszowskiej. Zastosowano próbki o przekroju poprzecznym okrągłym, pobrane z początku

(P), części środkowej (S) i końca (K) wyciskanych prętów. Geometrię i wymiary próbek dobrano zgodnie z wymaganiami normy dotyczącej statycznej próby rozciągania metali.

Wytrzymałość na rozciąganie Rm przyjęto na podstawie raportów maszyny wytrzymałościowej. Parametr ten odpowiada maksymalnej sile rozciągającej odniesionej do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki. Porównanie wartości Rm dla próbek pobranych z początku, środka i końca półwyrobu umożliwiło ocenę zróżnicowania wytrzymałości wzdłuż długości prętów oraz wpływu parametrów procesu KOBO na właściwości badanych stopów.

Dla wyrobów ze stopu Al 5083 na analizowanych krzywych rozciągania przedstawiono naprężenie rzeczywiste zapisane przez oprogramowanie maszyny. Jego maksymalne wartości nie są tożsame z Rm, które odnosi się do początkowego przekroju próbki. Z tego względu wartości na krzywych mogą być wyższe od wartości Rm przedstawionych w tabelach i na wykresach słupkowych.

Analiza krzywych umożliwiła ocenę przebiegu odkształcania i umocnienia materiału. W przypadku wyrobów ze stopu Al 5083 uwzględniono również lokalne oscylacje naprężenia w zakresie odkształcenia plastycznego, stanowiące jakościową przesłankę występowania efektu Portevina-Le Chateliera.

Badania mikrostruktury

Mikrostrukturę oceniano z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej (LM) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Obserwacje SEM prowadzono w trybie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) i uzupełniono mikroanalizą rentgenowską EDS. Badania wykonano na przekrojach podłużnych i poprzecznych, porównując morfologię, rozmieszczenie oraz kierunkowość składników mikrostruktury.

W przypadku wyrobów ze stopu AlSi11 główny nacisk położono na analizę tego, jak zmienia się wielkość i kształt cząstek krzemu eutektycznego oraz faz międzymetalicznych, a także jak rozkładają się one w osnowie aluminiowej. W stopie Al 5083 sprawdzano natomiast rozmieszczenie cząstek faz wtórnych, obecność lokalnych skupisk oraz ewentualną pasmowość mikrostruktury.

Dzięki mikroanalizie EDS udało się określić lokalny skład pierwiastkowy wybranych cząstek i obszarów osnowy. Wyniki interpretowano w połączeniu z morfologią i kontrastem widocznym na obrazach BSE, biorąc pod uwagę, że sygnał może zawierać również informacje o otaczającej osnowie. Na koniec zestawiono obserwacje mikrostrukturalne z wynikami prób rozciągania i pomiarów mikrotwardości, żeby sprawdzić, jak zmiany w mikrostrukturze wpływają na właściwości badanych stopów.

Pomiary mikrotwardości

Mikrotwardość zmierzono metodą Vickersa przy użyciu oznaczenia HV0,1. Pomiary przeprowadzono na przekrojach poprzecznych oraz podłużnych próbek pochodzących z części początkowej, środkowej i końcowej prętów. Celem badań było sprawdzenie poziomu mikrotwardości oraz tego, jak bardzo różni się ona między poszczególnymi obszarami i przekrojami. Warto jednak zaznaczyć, że różnice w wartościach średnich nie były automatycznie uznawane za istotne statystycznie ani za potwierdzenie anizotropii materiału.

Opracowanie i interpretacja wyników

Wyniki zostały zestawione osobno dla każdego ze stopów, biorąc pod uwagę współczynnik wyciskania, częstotliwość oscylacji matrycy oraz miejsce, w którym pobrano próbki. Porównanie parametrów P, S i K pozwala sprawdzić, jak zmieniają się właściwości wzdłuż pręta, ale nie zastąpi to badania powtarzalności oddzielnych procesów. Maksymalną siłę wyciskania przyjęto jako miarę szczytowego obciążenia całego układu. Warto też pamiętać, że wnioski o oszczędności energii nie mogą opierać się tylko na zmniejszeniu wartości Fmax, ponieważ trzeba wziąć pod uwagę także pracę stempla, napędu oscylacyjnego i innych odbiorników.

Zależności między mikrostrukturą, Rm, mikrotwardością i Ra oceniano metodą porównawczą. Przy tym nie utożsamiano jakościowych obserwacji dotyczących jednorodności mikrostruktury z ilościowym dowodem na konkretny mechanizm umocnienia. Rozważając serracje na krzywych dla wyrobów ze stopu 5083, uznano je za obserwację zgodną z efektem Portevina-Le Chateliera, ale nie traktowano tego jako osobnego potwierdzenia tego mechanizmu.

6. Wyniki badań

6.1. Badanie właściwości mechanicznych wyciskanych wyrobów

Charakterystyka krzywych naprężenie-odkształcenie dla wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO

Krzywe naprężenie-wydłużenie to jedno z najważniejszych źródeł wiedzy o tym, jak materiał zachowuje się podczas statycznej próby rozciągania. Dzięki ich analizie można ocenić, jak przebiega odkształcenie plastyczne, jak duża jest zdolność materiału do umocnienia odkształceniowego oraz w którym momencie próbka ulega zniszczeniu. To, jak wyglądają te krzywe, pokazuje bezpośrednio, jak mikrostruktura i parametry procesu technologicznego wpływają na właściwości mechaniczne badanego materiału.

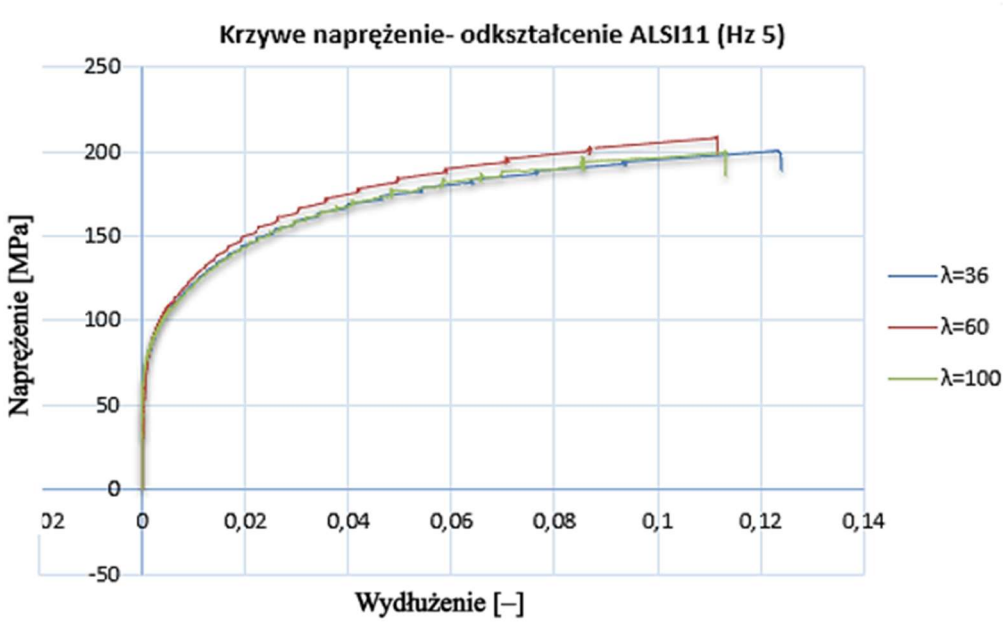
Wytrzymałość na rozciąganie uzyskanych wyrobów Rm została wyznaczona na podstawie raportów z maszyny wytrzymałościowej jako stosunek maksymalnej siły rozciągającej do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki. Na krzywych rozciągania uwzględniono natomiast naprężenie rzeczywiste, które bierze pod uwagę zmianę przekroju próbki w trakcie odkształcania. Właśnie dlatego maksymalne wartości naprężenia na tych krzywych są wyższe niż Rm podane w tabelach czy na wykresach słupkowych. Trzeba pamiętać, że te wielkości nie są ze sobą bezpośrednio równoważne.

Aby sprawdzić, jak proces wyciskania metodą KOBO wpływa na właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu AlSi11, przeanalizowano krzywe naprężenie-wydłużenie dla współczynników wyciskania λ wynoszących 36, 60 i 100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy na poziomie 5 i 7 Hz. Analiza przebiegu tych krzywych pozwoliła ocenić, jak dobrane parametry procesu przekładają się na odkształcenie plastyczne, poziom naprężeń oraz zdolność materiału do umocnienia odkształceniowego.

Na rysunku 6.1 przedstawia porównanie krzywych naprężenie-wydłużenie dla wyrobów ze stopu AlSi11, który został wyciśnięty metodą KOBO przy częstotliwości 5 Hz. Porównano tutaj trzy różne współczynniki wyciskania 36, 60 oraz 100. Na samym początku odkształcania wszystkie krzywe mają zbliżony przebieg. To pokazuje, że niezależnie od wybranego współczynnika, charakter odkształcenia sprężystego i sztywność materiału pozostają na zbliżonym poziomie. Po przekroczeniu granicy plastyczności, naprężenie zaczyna

stopniowo rosnąć z powodu umocnienia odkształceniowego, a to, jak szybko ten proces zachodzi, zależy od wartości współczynnika wyciskania.

Najlepsze wyniki zaobserwowano przy współczynniku wyciskania λ=60. W tym przypadku materiał osiągał najwyższe naprężenia w całym badanym zakresie, a jego maksymalna wytrzymałość na rozciąganie wyniosła około 208 MPa. Próbka pękła przy nieco mniejszym wydłużeniu niż ta wyciśnięta przy λ=36, co jednak sugeruje, że udało się zachować korzystne połączenie wytrzymałości i plastyczności.



Rysunek 6.1 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 przy częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz.

Maksymalne naprężenia są tu nieco niższe niż w przypadku wariantu λ=60 i oscylują w granicach 198-200 MPa. Z drugiej strony, materiał wyciskany przy λ=36 osiąga największe wydłużenie do zerwania, co oznacza, że ma on najlepszą zdolność do odkształcania plastycznego spośród wszystkich badanych wariantów. Jeśli chodzi o współczynnik λ=100, to krzywa kończy się przy mniejszym wydłużeniu, co sugeruje, że materiał staje się mniej plastyczny w porównaniu do tego uzyskanego przy λ=36.

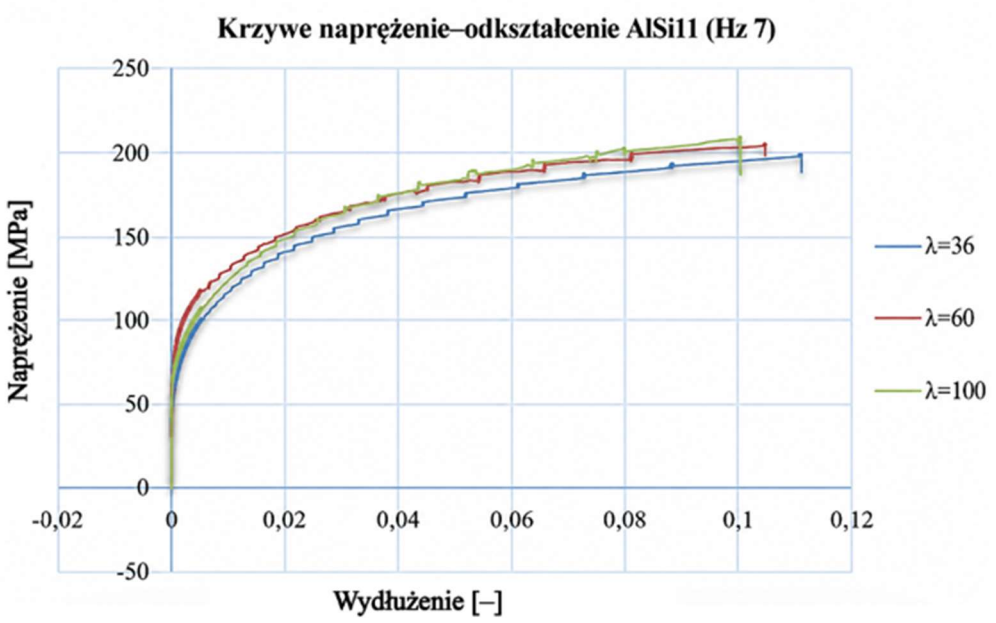
Porównując przebieg krzywych, można zauważyć, że zwiększenie współczynnika wyciskania z λ=36 do λ=60 wyraźnie poprawia zdolność materiału do przenoszenia obciążeń, przy czym plastyczność pozostaje na korzystnym poziomie. Dalsze zwiększanie tego parametru

do λ=100 nie przekłada się już na wzrost wytrzymałości, a sama krzywa wygląda podobnie do tej dla λ=36. Wszystko to wskazuje na to, że najlepsze właściwości mechaniczne otrzymano przy współczynniku λ=60.

Wyniki analizy krzywych naprężenie-wydłużenie pokrywają się z wcześniejszymi danymi dotyczącymi wytrzymałości na rozciąganie (Rm) oraz granicy plastyczności (Rp0,2), gdzie również najwyższe wartości odnotowano dla λ=60. Potwierdza to, że właśnie ten współczynnik zapewnia optymalne połączenie wytrzymałości i plastyczności w procesie wyciskania metodą KOBO.

Na rysunku 6.2 zestawiono krzywe naprężenie-wydłużenie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz dla współczynników λ=36, 60 oraz 100. Analiza pokazuje, że zmiana współczynnika wyciskania ma realny wpływ na to, jak materiał odkształca się plastycznie i jak przenosi obciążenia. Co ważne, w porównaniu do wyników dla częstotliwości 5 Hz, tutaj różnice w przebiegu krzywych są znacznie bardziej widoczne, zwłaszcza w obszarze odkształcenia plastycznego.

Na samym początku, w początkowym zakresie odkształcenia, wszystkie krzywe wyglądają podobnie, co dowodzi, że charakter odkształcenia sprężystego jest w tym materiale zbliżony. Gdy jednak przekroczy się granicę plastyczności, naprężenie zaczyna rosnąć w wyniku umocnienia odkształceniowego, a to, jak szybko to następuje, zależy od wybranego współczynnika wyciskania. Najniższy przebieg krzywej odnotowano dla λ=36, co oznacza, że ten wariant ma najmniejszą zdolność do przenoszenia obciążeń.



Rysunek 6.2 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz.

Krzywe odpowiadające współczynnikom wyciskania λ=60 oraz λ=100 przebiegają bardzo blisko siebie i osiągają wyższe wartości naprężenia niż materiał wyciskany przy λ=36. Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie uzyskano dla współczynnika λ=100, dla którego maksymalne naprężenie wynosi około 208 MPa. Dla λ=60 wartość ta osiąga około 204 MPa, natomiast dla λ=36 około 198 MPa.

Analiza końcowego odcinka krzywych wykazuje również zróżnicowanie plastyczności badanego materiału. Próbka wyciskana przy λ=36 ulega zniszczeniu przy największym wydłużeniu, co świadczy o zachowaniu najwyższej zdolności do odkształcenia plastycznego. W przypadku współczynników wyciskania λ=60 oraz λ=100 zerwanie następuje przy nieco mniejszych wartościach wydłużenia, jednak materiał osiąga wcześniej wyższy poziom naprężenia, co wskazuje na większą odporność na odkształcenie plastyczne.

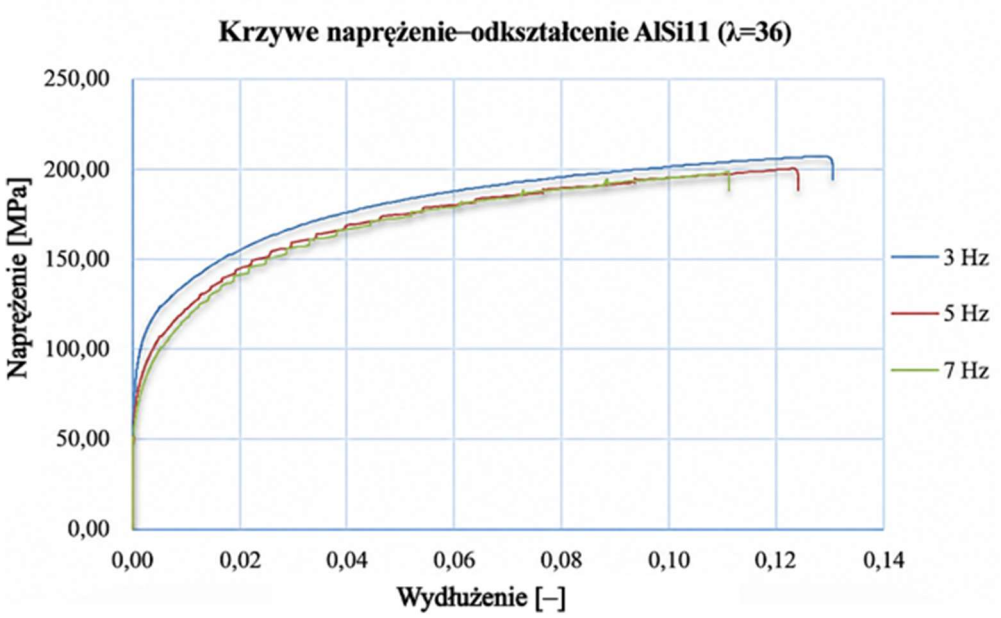
Porównanie przebiegu krzywych naprężenie-odkształcenie wskazuje, że zwiększenie współczynnika wyciskania z λ=36 do λ=100 prowadzi do poprawy właściwości wytrzymałościowych stopu AlSi11. Spośród analizowanych wariantów najwyższe wartości naprężenia uzyskano dla współczynnika wyciskania λ=100, natomiast przebieg krzywej

dla λ=60 jest do niego bardzo zbliżony. Otrzymane wyniki wskazują, że przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 7 Hz zwiększenie współczynnika wyciskania sprzyja uzyskaniu korzystniejszych właściwości wytrzymałościowych materiału.

W tych warunkach zwiększeniu współczynnika wyciskania z λ=36 do λ=100 towarzyszył wzrost wytrzymałości na rozciąganie Rm ze 172,62 do 187,61 MPa oraz umownej granicy plastyczności $R_{p_{0,2}}$ z 79,75 do 86,91 MPa. Najwyższe wartości obu parametrów spośród wariantów analizowanych przy 7 Hz uzyskano dla λ=100. Wyniki wskazują zatem na korzystny wpływ zwiększenia współczynnika wyciskania na właściwości wytrzymałościowe wyrobów ze stopu AlSi11 przy tej częstotliwości oscylacji matrycy.

Na rysunku 6.3 porównano krzywe naprężenie-wydłużenie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika λ=36 oraz częstotliwości oscylacji matrycy wynoszących odpowiednio 3, 5 i 7 Hz. Analiza tych krzywych pozwala ocenić, jak częstotliwość oscylacji matrycy wpływa na przebieg odkształcenia plastycznego oraz parametry wytrzymałościowe materiału.

W początkowej fazie odkształcenia wszystkie krzywe wyglądają podobnie, co odpowiada sprężystemu zachowaniu materiału. Gdy przekroczona zostanie granica plastyczności, naprężenie zaczyna rosnąć na skutek umocnienia odkształceniowego, jednak intensywność tego zjawiska zależy od wybranej częstotliwości oscylacji. Najlepszy przebieg krzywej zaobserwowano przy częstotliwości 3 Hz, gdzie materiał osiąga najwyższe naprężenia niemal w całym zakresie odkształcenia. W tym przypadku maksymalna wytrzymałość na rozciąganie wynosi około 206 MPa, a próbka ulega zniszczeniu przy największym wydłużeniu spośród wszystkich badanych wariantów.



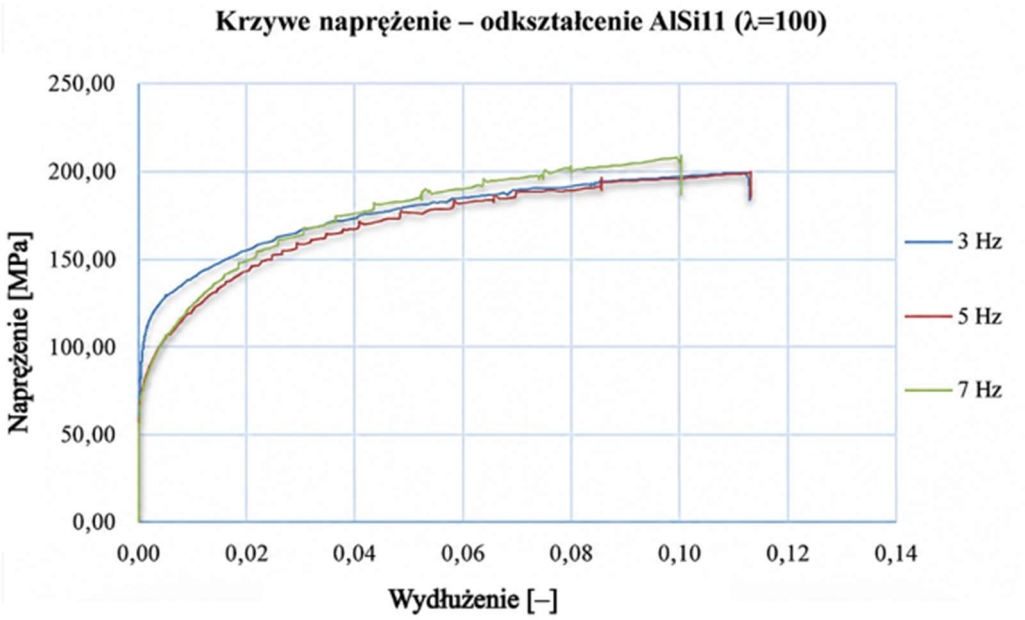
Rysunek 6.3 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz przy współczynniku wyciskania λ=36.

Krzywe dla częstotliwości 5 Hz oraz 7 Hz przebiegają bardzo blisko siebie. W obu przypadkach maksymalne naprężenie wynosi około 198 do 200 MPa, co jest wynikiem nieco niższym niż przy 3 Hz. Co więcej, próbki pękają przy mniejszym wydłużeniu. To pokazuje, że wraz ze wzrostem częstotliwości oscylacji matrycy materiał traci zdolność do odkształcania plastycznego.

Porównując krzywe naprężenie-wydłużenie, widać wyraźnie, że zwiększenie częstotliwości z 3 Hz do 5 Hz i 7 Hz nie poprawia właściwości mechanicznych wyrobów ze stopu AlSi11 przy współczynniku wyciskania= 36. Wręcz przeciwnie, naprężenie nieznacznie spada w całym zakresie odkształcenia, a próbki niszczą się szybciej. Z tych wyników wynika, że dla najmniejszego badanego współczynnika wyciskania najlepsze parametry mechaniczne uzyskano przy częstotliwości 3 Hz.

Te rezultaty pokrywają się z wcześniejszą analizą wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności, gdzie najwyższe wartości również odnotowano przy 3 Hz. Analiza krzywych naprężenie-wydłużenie ostatecznie potwierdza więc, że przy współczynniku wyciskania λ= 36 wyższa częstotliwość oscylacji matrycy nie przekłada się na lepsze właściwości wytrzymałościowe otrzymanych wyrobów.

Na rysunku 6.4 przedstawiono porównanie krzywych naprężenie-wydłużenie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy wynoszących 3, 5 i 7 Hz. Analiza przebiegu krzywych umożliwia ocenę wpływu częstotliwości oscylacji matrycy na przebieg odkształcenia plastycznego oraz właściwości wytrzymałościowe materiału przy najwyższym analizowanym współczynniku wyciskania.



Rysunek 6.4 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz przy współczynniku wyciskania λ=100.

Na początku, przy małych odkształceniach, wszystkie krzywe wyglądają podobnie, co wynika ze sprężystego zachowania materiału. Gdy jednak przekroczy się granicę plastyczności, naprężenie zaczyna rosnąć z powodu umocnienia odkształceniowego. To, jak intensywnie ten proces przebiega, zależy od częstotliwości oscylacji matrycy. W pierwszej fazie najwyższe naprężenia zarejestrowano przy 3 Hz, ale im większe stają się odkształcenia, tym bardziej krzywe zaczynają się od siebie różnić.

Najlepsze wyniki uzyskano przy częstotliwości 7 Hz. Po przekroczeniu wydłużenia na poziomie około 0,03, krzywa dla tego wariantu przebiega powyżej pozostałych i osiąga najwyższe naprężenia pod koniec próby. Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie wynosi tu około 208 MPa, co oznacza, że w tym wariancie zarejestrowano najwyższy poziom naprężenia.

Z kolei krzywe dla 3 Hz i 5 Hz mają zbliżony przebieg w większości analizowanego zakresu odkształcenia. Maksymalne naprężenia wynoszą dla nich odpowiednio około 200 MPa oraz 198 MPa. Przy 3 Hz naprężenia są nieco wyższe na samym początku, natomiast przy 5 Hz krzywa przebiega na nieco niższym poziomie naprężenia właściwie w całym zakresie. W obu przypadkach próbki pękają przy podobnym wydłużeniu, więc plastyczność materiału jest w nich zbliżona.

Porównując przebieg krzywych naprężenie-wydłużenie, widać wyraźnie, że przy współczynniku wyciskania λ=100 zwiększenie częstotliwości oscylacji do 7 Hz poprawia właściwości wytrzymałościowe wyrobów ze stopu AlSi11. Materiał osiąga wtedy najwyższe naprężenia, zachowując przy tym wydłużenie do zerwania na podobnym poziomie co w innych przypadkach. Przy λ=36 najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla częstotliwości 3 Hz, natomiast przy λ=100 - dla 7 Hz.

Te wyniki pokrywają się z wcześniejszą analizą wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności, gdzie również najlepsze parametry odnotowano dla współczynnika wyciskania λ=100 i częstotliwości 7 Hz. Analiza krzywych potwierdza więc, że zwiększenie częstotliwości oscylacji pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu AlSi11, zwłaszcza przy najwyższym badanym współczynniku wyciskania.

Zestawienie wyników dla współczynników λ=36 i λ=100 pokazuje, że wpływ częstotliwości oscylacji na zachowanie materiału zmienia się. Przy λ=36 najwyższe naprężenia uzyskano przy częstotliwości 3 Hz, ale przy λ=100 najwyższe naprężenia odnotowano dla częstotliwości 7 Hz. Wszystko to sugeruje, że optymalną częstotliwość oscylacji matrycy trzeba dobierać w zależności od współczynnika wyciskania, biorąc pod uwagę intensywność odkształcenia podczas procesu KOBO.

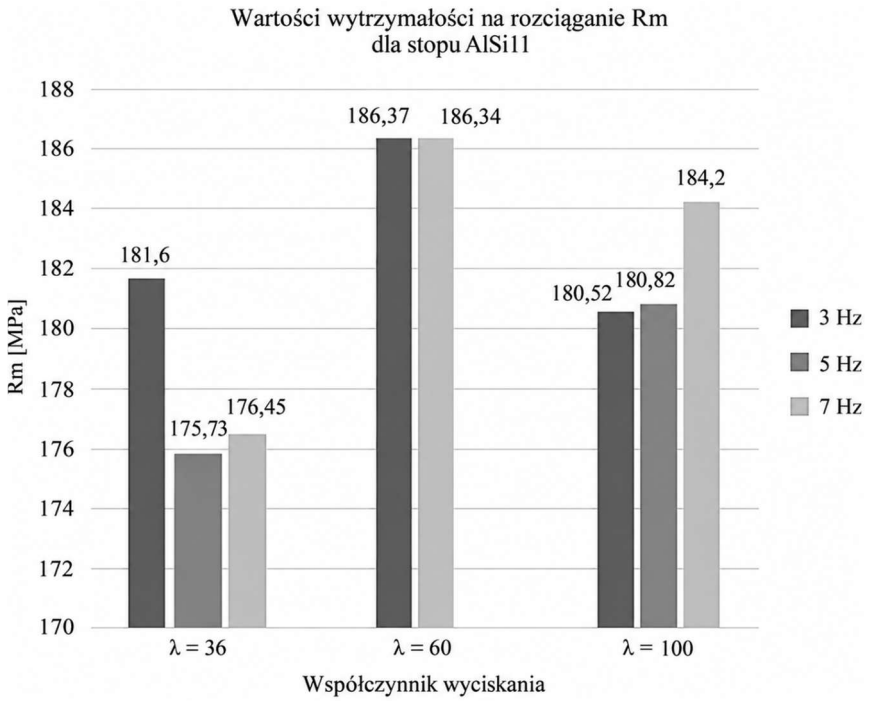
Wytrzymałość na rozciąganie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO

Właściwości wytrzymałościowe materiałów poddawanych intensywnemu odkształceniu plastycznemu stanowią jedno z podstawowych kryteriów oceny efektywności zastosowanego procesu technologicznego. Proces wyciskania metodą KOBO prowadzi do istotnych zmian mikrostrukturalnych materiału, obejmujących przede wszystkim rozdrobnienie oraz ujednorodnienie mikrostruktury, co znajduje odzwierciedlenie w zmianach jego właściwości mechanicznych. Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących odporność

materiału na obciążenia jest wytrzymałość na rozciąganie (Rm), która umożliwia ocenę wpływu zastosowanych parametrów procesu na właściwości wytrzymałościowe otrzymanych wyrobów.

Badania wykonano na odlewniczym stopie AlSi11, który wyciskano metodą KOBO temperaturze pokojowej. Testy przeprowadzono przy trzech różnych współczynnikach wyciskania (λ=36, 60 oraz 100) oraz trzech częstotliwościach oscylacji matrycy (3, 5 i 7 Hz). Z każdego uzyskanego pręta pobrano próbki z jego początku, środka oraz końca. Pozwoliło to sprawdzić, jak właściwości mechaniczne zmieniają się wzdłuż całego wyrobu i jak bardzo są one jednorodne. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono na rysunku 6.5.

Analiza danych pokazała, że metoda KOBO pozwala uzyskać wysoką wytrzymałość na rozciąganie, zachowując przy tym bardzo dobrą jednorodność właściwości mechanicznych wzdłuż całego wyrobu. W większości badanych przypadków różnice między próbkami pobranymi z początku, środka i końca pręta były minimalne.

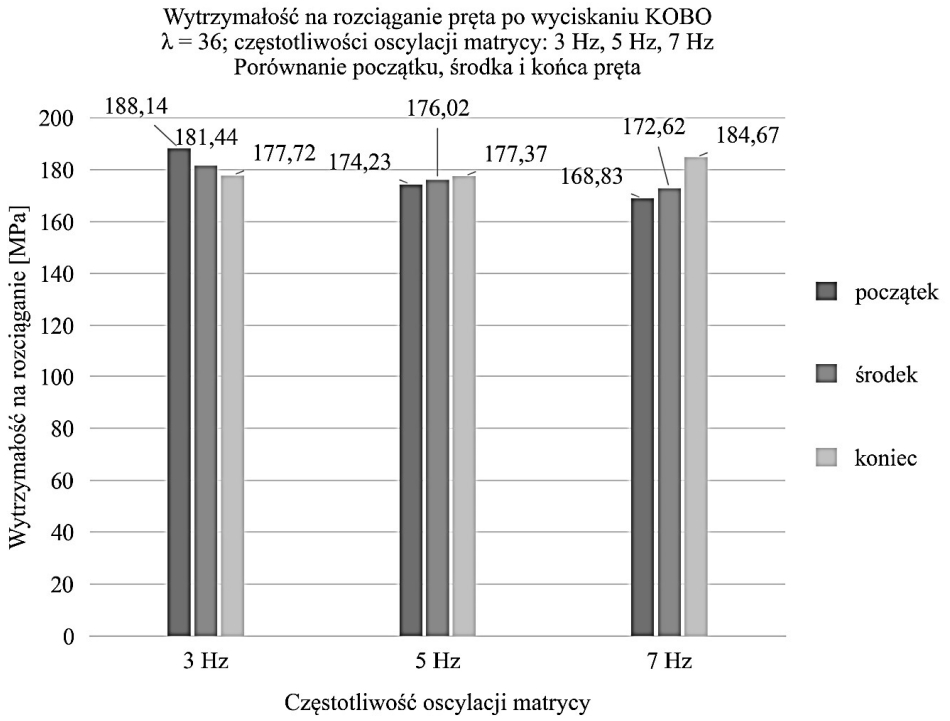


Rysunek 6.5 Wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz

Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36 przedstawiono na rysunku 6.6. Analizując te dane, można zauważyć, że częstotliwość oscylacji matrycy ma dość niewielki wpływ na ostateczną wytrzymałość, choć między poszczególnymi częściami pręta widać pewne różnice.

Dla częstotliwości oscylacji wynoszącej 3 Hz najwyższą wytrzymałość Rm odnotowano na samym początku pręta, osiągając 188,14 MPa. W środkowej części wartość ta spadła do 181,44 MPa, a na końcu wyniosła 177,72 MPa. Z tych wyników wynika, że wytrzymałość na rozciąganie stopniowo maleje wzdłuż całego wyrobu.

Odmienną zależność zaobserwowano przy częstotliwości 5 Hz, gdzie rozkład wartości Rm jest odwrócony. Najniższą wytrzymałość zmierzono na początku pręta (174,23 MPa), ale w części środkowej nastąpił lekki wzrost do 176,02 MPa. Najlepszy wynik uzyskano w końcowej części, gdzie Rm wyniosło 177,37 MPa. Warto jednak dodać, że te różnice między strefami są małe i nie przekraczają kilku megapaskali.



Rysunek 6.6 Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu AlSi11 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

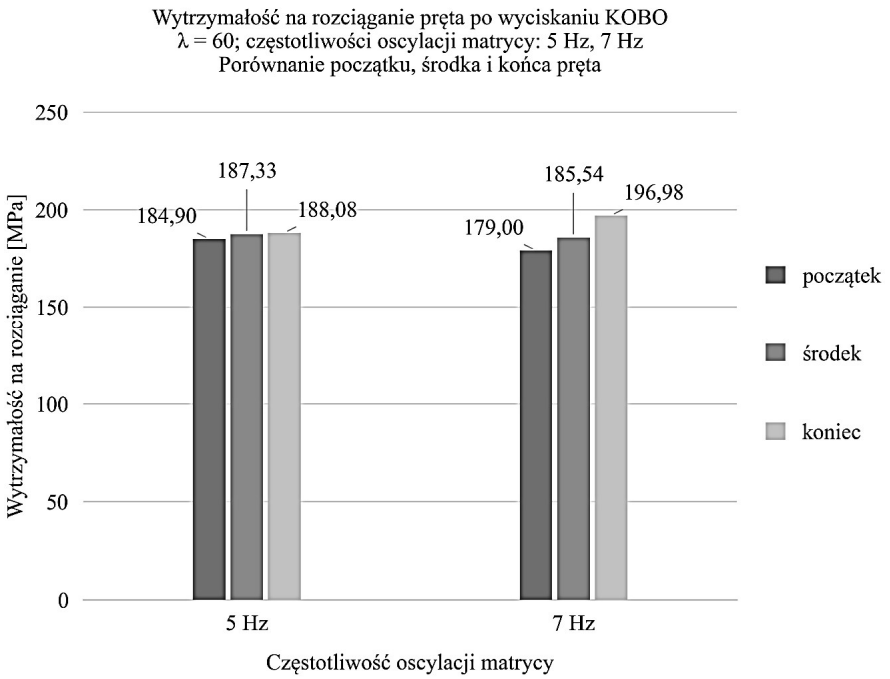
Dla częstotliwości oscylacji 7 Hz uzyskano największe zróżnicowanie wartości wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż pręta. Wartość Rm wzrosła z 168,83 MPa w części początkowej do 172,62 MPa w części środkowej, osiągając maksimum 184,67 MPa w części końcowej. Różnica pomiędzy początkiem i końcem pręta wyniosła około 16 MPa.

Porównanie wszystkich analizowanych wariantów wskazuje, że przy 3 Hz najwyższe wartości Rm występowały w początkowej części pręta, natomiast dla 5 i 7 Hz maksimum odnotowano w części końcowej. Mimo tych różnic, właściwości mechaniczne wykazują stosunkowo niewielkie zróżnicowanie wzdłuż wyrobu. To pokazuje, że materiał po procesie wyciskania metodą KOBO zachowuje dobrą jednorodność.

Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania $\lambda=60$ przedstawiono na rysunku 6.7. W porównaniu z wariantem $\lambda=36$ obserwuje się wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz bardziej wyrównany rozkład właściwości mechanicznych wzdłuż długości wyciśniętego pręta.

Dla częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 5 Hz uzyskane wartości wytrzymałości na rozciąganie były bardzo zbliżone we wszystkich analizowanych strefach pręta. W części początkowej wartość Rm wyniosła 184,90 MPa, w części środkowej wzrosła do 187,33 MPa, natomiast w części końcowej osiągnęła 188,08 MPa. Maksymalna różnica pomiędzy poszczególnymi strefami nie przekraczała 4 MPa, co świadczy o bardzo dobrej jednorodności właściwości mechanicznych na całej długości wyrobu.

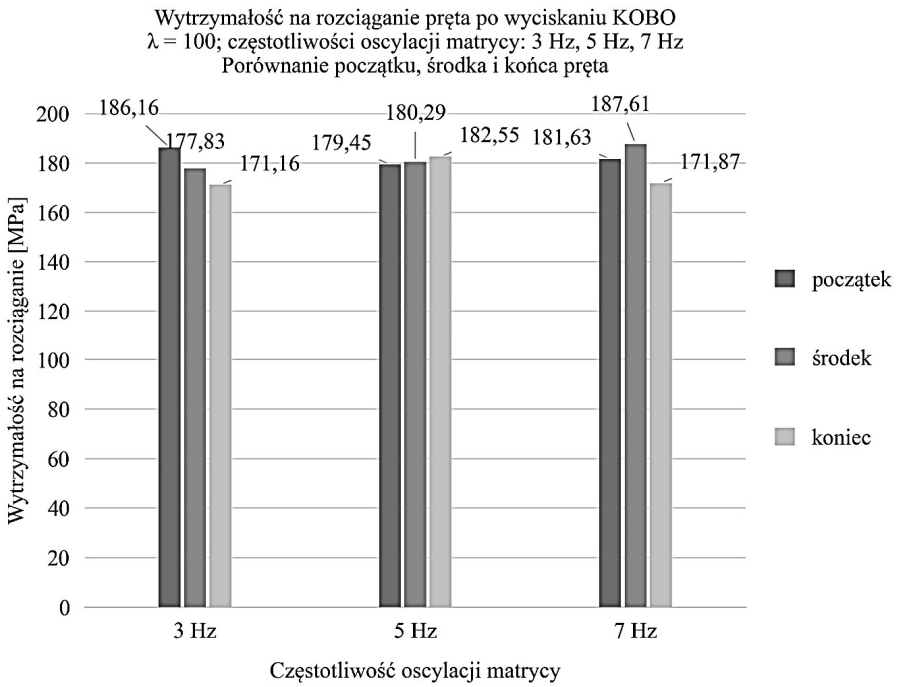
Zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy do 7 Hz spowodowało zmianę rozkładu wartości wytrzymałości na rozciąganie. W części początkowej pręta wartość Rm wyniosła 178,99 MPa, w części środkowej wzrosła do 185,54 MPa, natomiast najwyższą wytrzymałość odnotowano w części końcowej, gdzie osiągnęła 196,98 MPa. Oznacza to wzrost wytrzymałości na rozciąganie o blisko 18 MPa pomiędzy początkiem i końcem pręta.



Rysunek 6.7 Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu AlSi11 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 5 i 7 Hz.

Porównując obie częstotliwości, można zauważyć, że przy 5 Hz właściwości mechaniczne są niemal identyczne na całej długości pręta. Jednak, gdy zwiększy się częstotliwość do 7 Hz, wytrzymałość na rozciąganie w końcowej części wyrobu wyraźnie rośnie. Dla wariantu λ=60 i częstotliwości 7 Hz otrzymano jedne z najwyższych wartości Rm spośród wszystkich badanych parametrów. To pokazuje, że taka kombinacja bardzo korzystnie wpływa na wytrzymałość wyrobów ze stopu AlSi11.

Niewielkie różnice wartości wytrzymałości na rozciąganie pomiędzy poszczególnymi strefami prętów świadczą o zachowaniu wysokiej jednorodności właściwości mechanicznych, niezależnie od zastosowanej częstotliwości oscylacji matrycy. Rozkład wytrzymałości na rozciąganie wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku λ=100 przedstawiono na rysunku 6.8. Z uzyskanych danych wynika, że użycie najwyższego analizowanego współczynnika wyciskania pozwala uzyskać wysoką wytrzymałość, zachowując przy tym stosunkowo niewielkie różnice między poszczególnymi strefami pręta.



Rysunek 6.8 Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu AlSi11 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 3 Hz najwyższą wytrzymałość na rozciąganie odnotowano na początku pręta, gdzie wartość Rm osiągnęła 186,16 MPa. W części środkowej spadła ona do 177,83 MPa, a na końcu do 171,16 MPa, co pokazuje, że wytrzymałość stopniowo maleje wzdłuż całego wyrobu.

Z kolei przy 5 Hz właściwości mechaniczne rozłożyły się najbardziej równomiernie. Wartości Rm dla początku, środka i końca pręta wyniosły kolejno 179,45 MPa, 180,29 MPa oraz 182,55 MPa. Tak małe różnice między poszczególnymi strefami dowodzą, że właściwości na całej długości pręta są bardzo jednorodne.

W przypadku częstotliwości 7 Hz najwyższy wynik Rm, czyli 187,61 MPa, uzyskano w środkowej części pręta. Na początku wyniósł on 181,63 MPa, a na końcu 171,87 MPa. W tym wariancie widać wyraźniej zróżnicowanie parametrów niż przy 5 Hz. Porównanie wszystkich wariantów wskazuje, że najbardziej jednorodny rozkład wytrzymałości na rozciąganie uzyskano przy częstotliwości 5 Hz. Dla 3 i 7 Hz różnice pomiędzy początkiem, środkiem i końcem pręta były większe, jednak wartości Rm w całym analizowanym zakresie pozostawały na zbliżonym poziomie, co potwierdza stabilność właściwości mechanicznych wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100.

W tabeli 6.1 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy na wytrzymałość na rozciąganie Rm oraz umowną granicę plastyczności $R_{p0,2}$ wyrobów ze stopu AlSi11 w środkowej części pręta. Wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm mieściły się w zakresie od 172,62 do 187,61 MPa. Najwyższą wartość uzyskano dla współczynnika wyciskania λ=100 przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz, natomiast najniższą dla λ=36 przy tej samej częstotliwości. Dla λ=36 zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy z 3 Hz do 7 Hz powodowało stopniowe obniżenie Rm z 181,44 do 172,62 MPa.

Odmienną tendencję zaobserwowano dla λ=100, gdzie wraz ze wzrostem częstotliwości wartość Rm zwiększała się z 177,83 do 187,61 MPa. W przypadku λ=60 odnotowano niewielkie obniżenie Rm z 187,33 MPa przy 5 Hz do 185,54 MPa przy 7 Hz. Wartości granicy plastyczności Rp0,2 mieściły się w zakresie od 79,75 do 114,87 MPa. Najwyższą wartość uzyskano dla λ=100 przy częstotliwości 3 Hz, natomiast najniższą dla λ=36 przy 7 Hz. Dla λ=36 obserwowano systematyczne obniżenie Rp0,2 wraz ze wzrostem częstotliwości oscylacji matrycy, podczas gdy dla λ=60 i λ=100 zmiany tego parametru nie wykazywały jednakowej tendencji. Uzyskane wyniki wskazują, że wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na właściwości wytrzymałościowe wyrobów ze stopu AlSi11 zależy od zastosowanego współczynnika wyciskania.

Tabela 6.1 Wpływ współczynnika wyciskania i częstotliwości na wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm i granicy plastyczności Rp0,2 wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO

Współczynnik wyciskania λ	Częstotliwość oscylacji matrycy [Hz]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]
36	3	181,44	105,32
36	5	176,02	87,76
36	7	172,62	79,75
60	3	-	-
60	5	187,33	89,41
60	7	185,54	86,33
100	3	177,83	114,87
100	5	180,29	88,44
100	7	187,61	86,91

Wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm podane w tabeli 6.2 pokazuje, że właściwości wyrobów ze stopu AlSi11 zmieniają się wzdłuż pręta w zależności od tego, jakie parametry wybrano w procesie KOBO. Dla współczynnika wyciskania λ=36, to przy częstotliwości 3 Hz zauważalny będzie stopniowy spadek Rm, który zaczyna się od 188,14 MPa na początku pręta i zmniejsza się do 177,72 MPa na jego końcu. Przy 5 Hz wyniki są znacznie bardziej stabilne i

mieszczą się w przedziale od 174,23 do 177,37 MPa. Z kolei przy 7 Hz sytuacja wygląda inaczej, bo wytrzymałość rośnie od 168,83 MPa na początku do 184,67 MPa na końcu pręta.

Dla λ=60 przy częstotliwości 5 Hz wartości Rm mieściły się w zakresie od 184,90 do 188,08 MPa, a różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 3,18 MPa. Przy 7 Hz zaobserwowano wzrost wytrzymałości wzdłuż długości pręta, od 179,00 MPa w części początkowej do 196,98 MPa w części końcowej, co odpowiada różnicy 17,98 MPa.

W przypadku λ=100 najmniejsze zróżnicowanie wartości Rm pomiędzy analizowanymi częściami pręta uzyskano przy częstotliwości 5 Hz, dla której wartości mieściły się w zakresie od 179,45 do 182,55 MPa. Przy 3 Hz wytrzymałość zmniejszała się z 186,16 MPa w części początkowej do 171,16 MPa w części końcowej. Natomiast przy 7 Hz najwyższą wartość Rm odnotowano w części środkowej pręta (187,61 MPa), a najniższą w części końcowej (171,87 MPa).

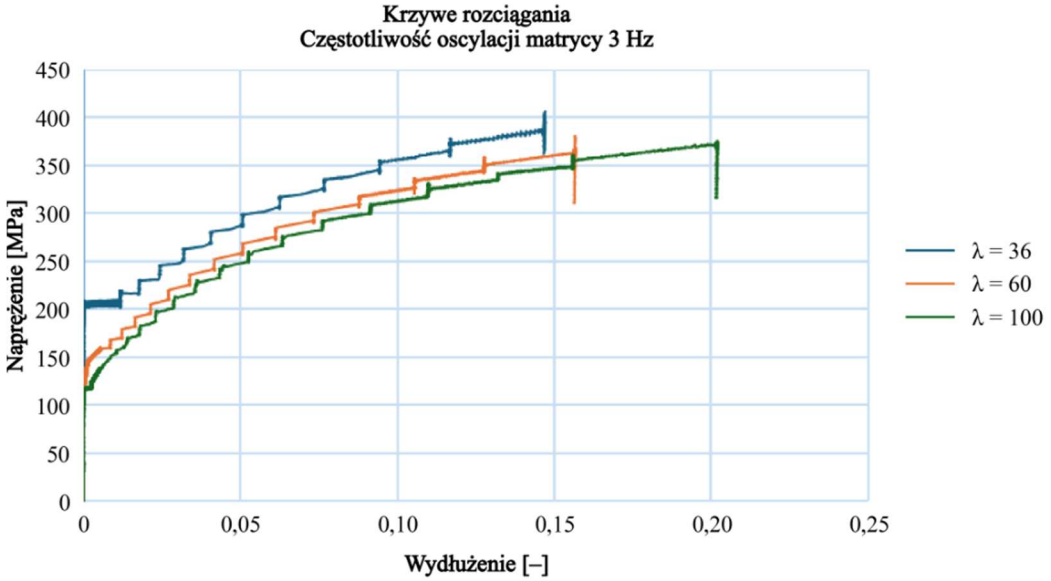
Podsumowując te dane, można wyciągnąć wniosek, że dla każdego badanego współczynnika wyciskania najmniejsze różnice w Rm wzdłuż pręta występowały przy częstotliwości 5 Hz. Największą różnicę, wynoszącą 17,98 MPa, odnotowano dla λ=60 przy 7 Hz. Wszystko to dowodzi, że sposób, w jaki rozkłada się wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż pręta, zależy zarówno od współczynnika wyciskania, jak i od częstotliwości oscylacji matrycy.

Tabela 6.2 Wpływ współczynnika wyciskania i częstotliwości na wartość wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu AlSi11 dla początku, środka i końca pręta po wyciskaniu metodą KOBO

Współczynnik wyciskania λ	Częstotliwość oscylacji matrycy [Hz]	Początek Rm [MPa]	Środek Rm [MPa]	Koniec Rm [MPa]
36	3	188,14	181,44	177,72
36	5	174,23	176,02	177,37
36	7	168,83	172,62	184,67
60	3	-	-	-
60	5	184,90	187,33	188,08
60	7	179,00	185,54	196,98
100	3	186,16	177,83	171,16
100	5	179,45	180,29	182,55
100	7	181,63	187,61	171,87

Charakterystyka krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO

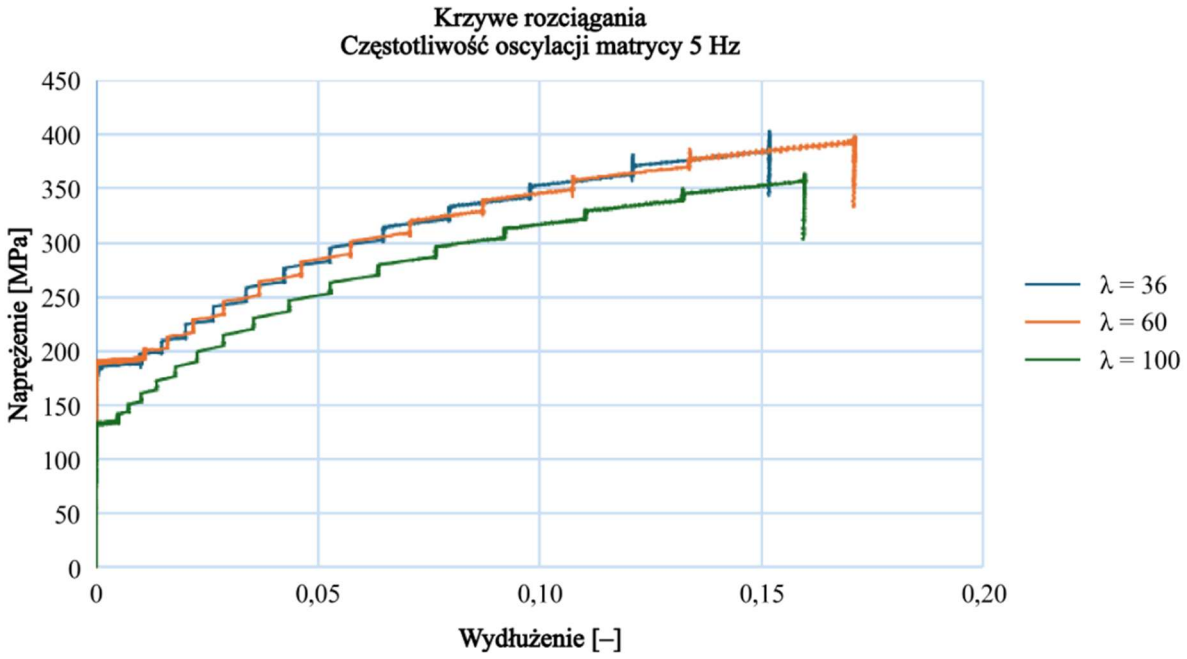
Na rysunku 6.9 przedstawiono krzywe rozciągania wyrobów ze stopu Al 5083 uzyskanego w procesie KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz. Na wykresie wyraźnie widać, jak współczynnik wyciskania wpływa na proces umocnienia materiału. Dla λ=36 uzyskano najwyższe wartości naprężenia, natomiast wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania do λ=60 i 100 poziom naprężeń nieznacznie się obniżał, przy jednoczesnym zwiększeniu wydłużenia do zerwania dla λ=100.



Rysunek 6.9 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 przy częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz.

Rysunek 6.10 pokazuje porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie dla wyrobów ze stopu Al 5083, który został wyciśnięty metodą KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz. Analizę przeprowadzono dla trzech różnych współczynników wyciskania λ=36, 60 oraz 100. Z przebiegu krzywych jasno wynika, że wybrany współczynnik ma realny wpływ zarówno na poziom naprężeń podczas rozciągania, jak i na to, przy jakim odkształceniu próbka ostatecznie pęka. Patrząc na przypadki λ36 i λ60, to odpowiadające im krzywe mają zbliżony przebieg, zwłaszcza w początkowej i środkowej fazie odkształcenia plastycznego. Warto jednak zauważyć, że przy λ=60 materiał ma tendencję do osiągania nieco większego wydłużenia przed zerwaniem, mimo że zachowuje przy tym wysokie naprężenia.

Dla współczynnika wyciskania λ=100 wartości naprężenia w większości zakresu odkształcenia są niższe w porównaniu z λ=36 i λ=60. Jednocześnie próbka zachowuje zdolność do znacznego odkształcenia plastycznego, co wskazuje na korzystne połączenie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych materiału po procesie KOBO. Wraz ze wzrostem odkształcenia dla wszystkich analizowanych wariantów obserwowany jest systematyczny wzrost naprężenia, świadczący o występowaniu umocnienia odkształceniowego materiału.

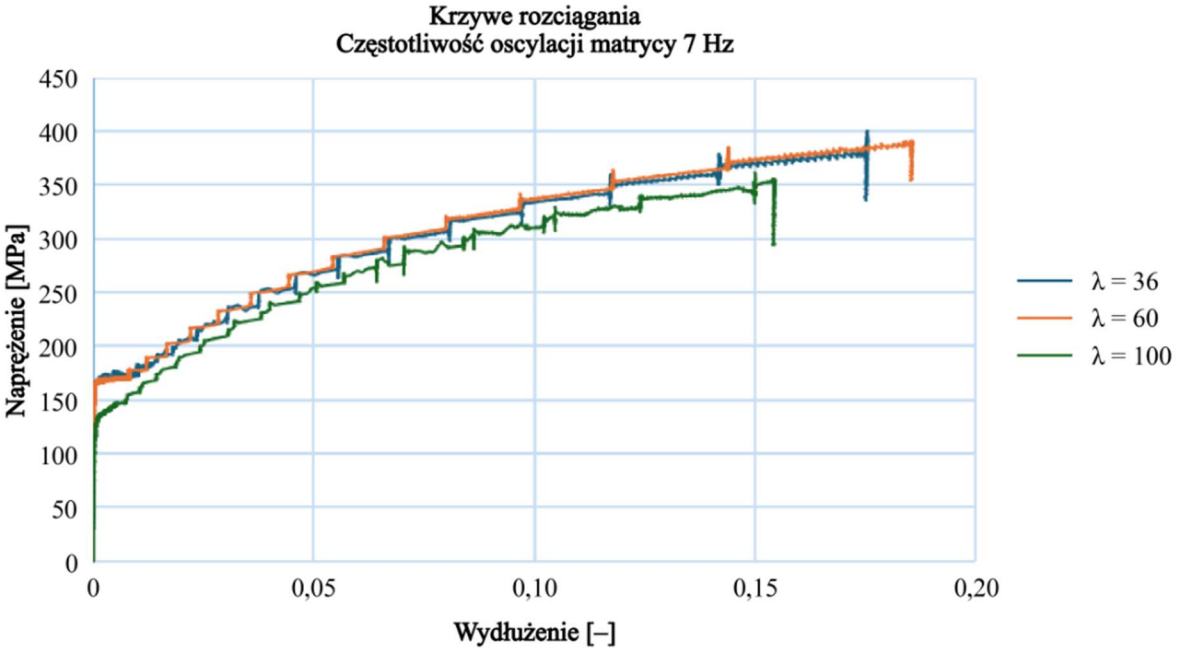


Rysunek 6.10. Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 przy częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz.

Na krzywych można też zauważyć lokalne, skokowe zmiany naprężeń, które pojawiają się zwłaszcza w fazie odkształcenia plastycznego. Taki przebieg może być spowodowany niestabilnością plastyczną charakterystyczną dla stopów Al-Mg, czyli tak zwanym efektem Portevina-Le Chateliera. Z zebranych wyników wynika, że zmiana współczynnika wyciskania przy stałej częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 5 Hz ma realny wpływ na sposób umocnienia materiału, poziom naprężeń oraz to, jak bardzo stop Al 5083 może się odkształcić przed pęknięciem.

Na rysunku 6.11 przedstawiono porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100. Dla wszystkich analizowanych wariantów

obserwuje się systematyczny wzrost naprężenia wraz ze zwiększaniem odkształcenia, co wskazuje na występowanie umocnienia odkształceniowego materiału. Krzywe odpowiadające λ=36 i λ=60 przebiegają bardzo podobnie w znacznej części zakresu odkształcenia, przy czym dla λ=60 uzyskano nieco wyższe wartości naprężenia w końcowym etapie próby oraz większe wydłużenie do zerwania.

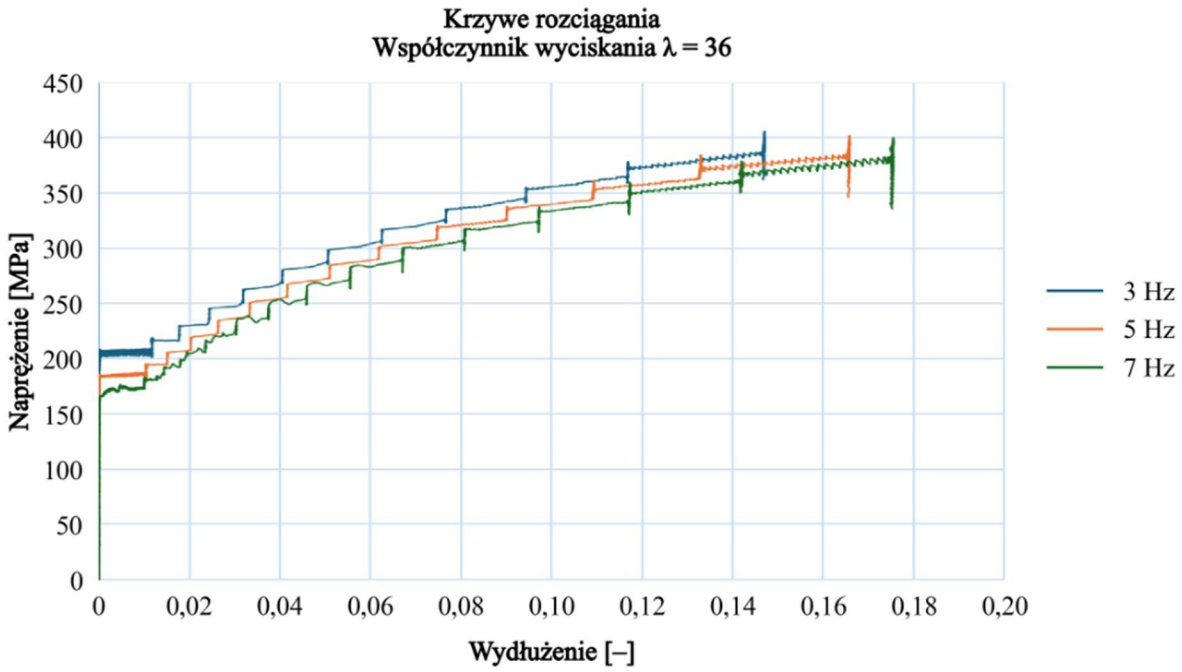


Rysunek 6.11 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz.

Przy λ=100 krzywa znajduje się na niższym poziomie naprężeń niż w przypadku λ=36 i λ=60, co widać zwłaszcza przy większych odkształceniach. Próbka zachowuje znaczną zdolność do odkształcania plastycznego. Wynika z tego, że zwiększenie współczynnika wyciskania do 100 przy częstotliwości 7 Hz pozwala obniżyć naprężenia, nie tracąc przy tym znaczącego zakresu odkształcenia.

Na wszystkich wykresach można też zauważyć lokalne, skokowe zmiany naprężeń, które są najbardziej wyraźne dla λ=100. To zjawisko może wynikać z niestabilnego odkształcania plastycznego, typowego dla stopów Al-Mg, oraz z efektu Portevina-Le Chateliera. Wyniki te pokazują więc, że przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 7 Hz współczynnik wyciskania ma wpływ zarówno na poziom naprężeń, jak i na to, jak przebiega odkształcanie plastyczne wyrobów ze stopu Al 5083.

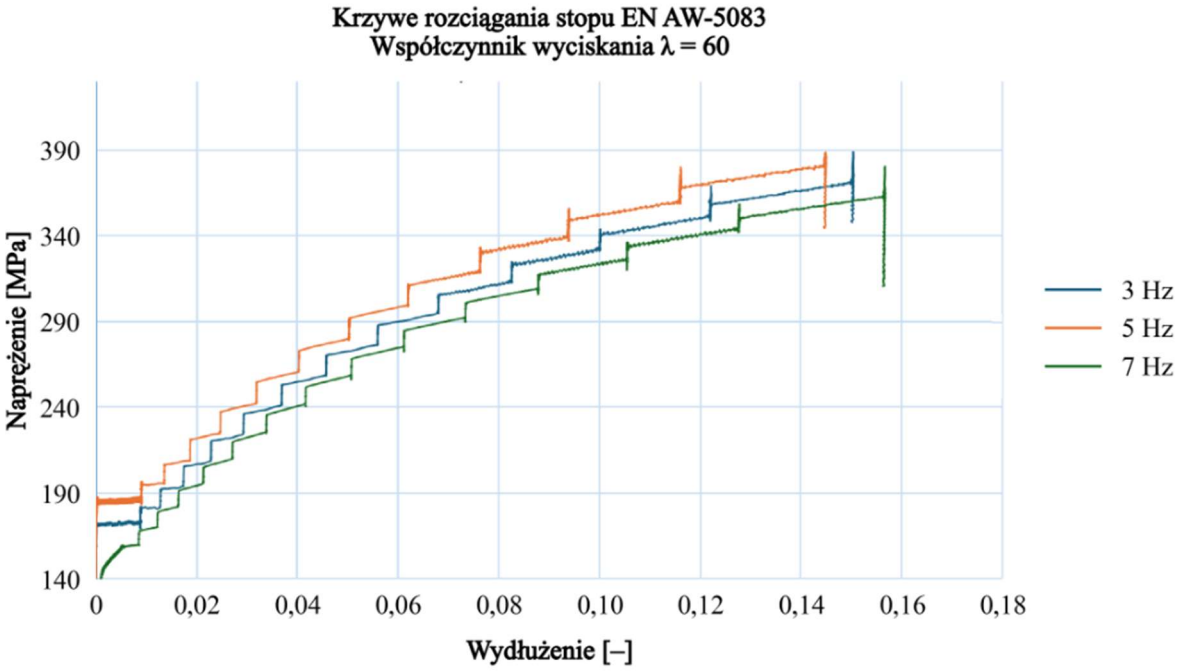
Dla stałego współczynnika wyciskania λ=36 wpływ częstotliwości oscylacji matrycy ujawnia się przede wszystkim w poziomie naprężenia w początkowym i środkowym zakresie odkształcenia. Krzywa odpowiadająca częstotliwości 3 Hz przebiega początkowo powyżej pozostałych, co wskazuje na wyższy poziom naprężeń wymaganych do dalszego odkształcania materiału. Wraz ze wzrostem wydłużenia różnice pomiędzy przebiegami stopniowo maleją, a w końcowym zakresie próby wartości naprężeń dla 3, 5 i 7 Hz stają się do siebie zbliżone. Największe wydłużenie do zerwania obserwuje się dla próbki odkształcanej przy 7 Hz, podczas gdy dla 3 Hz zerwanie następuje przy mniejszej wartości wydłużenia. Widoczne lokalne skoki naprężenia wskazują na niejednorodny przebieg odkształcenia plastycznego, charakterystyczny dla badanych wyrobów ze stopu Al 5083.(Rysunek 6.12)



Rysunek 6.12 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz przy współczynniku wyciskania λ=36.

Dla współczynnika wyciskania λ=60 zmiana częstotliwości oscylacji matrycy wyraźnie wpływa na przebieg krzywych naprężenie-odkształcenie. Najwyższe naprężenia w większości analizowanego zakresu odkształcenia uzyskano przy częstotliwości 5 Hz, podczas gdy krzywa dla 7 Hz przebiega nieco niżej. Krzywa dla 3 Hz przebiega pomiędzy pozostałymi, natomiast pod koniec próby wartości naprężenia dla wszystkich trzech wariantów są zbliżone. Te różnice między krzywymi najlepiej widać w zakresie odkształcenia plastycznego, natomiast tuż przed

zerwaniem poziomy naprężeń zaczynają się do siebie zbliżać. Największe wydłużenie do zerwania odnotowano dla próbki odkształcanej przy 7 Hz. Sugeruje to, że mimo nieco niższych naprężeń, materiał zachowuje bardzo wysoką zdolność do odkształcania plastycznego. Na wszystkich przebiegach można też zauważyć charakterystyczne, skokowe zmiany naprężenia, co potwierdza, że płynięcie plastyczne wyrobów ze stopu Al 5083 ma charakter niestabilny.

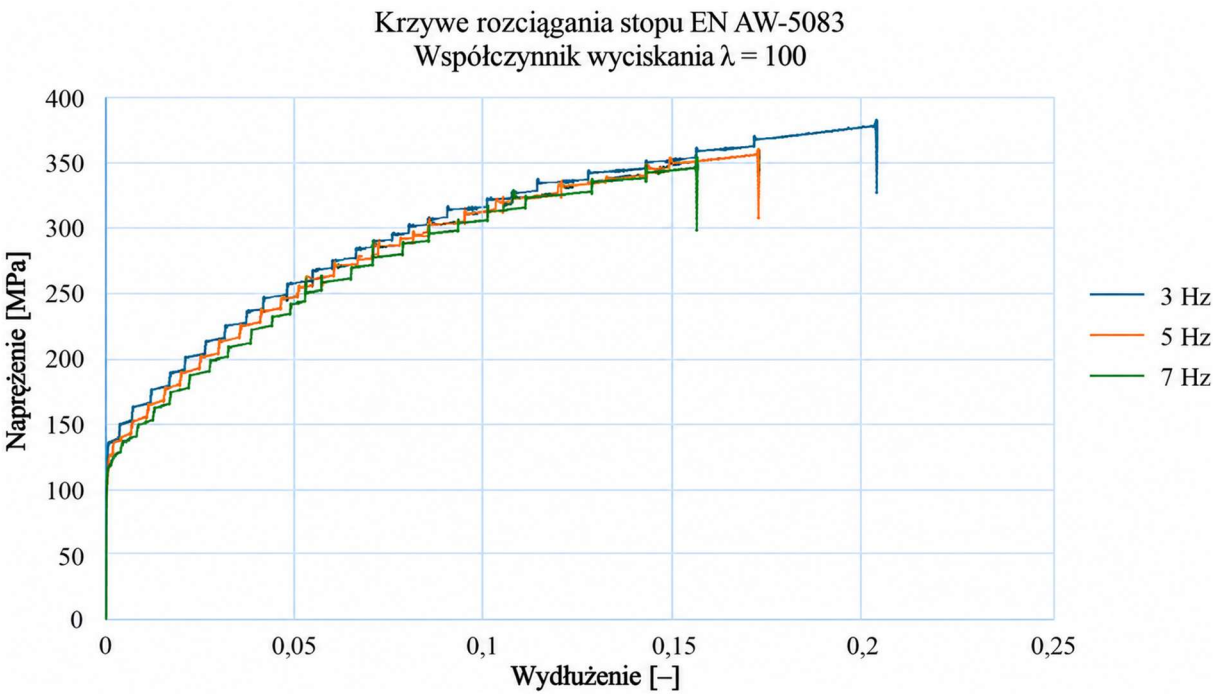


Rysunek 6.13 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=60 dla częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Dla współczynnika wyciskania λ=100 wpływ częstotliwości oscylacji matrycy jest mniej widoczny w początkowej i środkowej fazie przebiegu niż w przypadku niższych wartości λ. Krzywe dla 3, 5 i 7 Hz przez większość zakresu odkształcenia biegną blisko siebie, co sugeruje, że poziomy naprężeń podczas rozciągania są do siebie zbliżone. Wyraźne różnice widać dopiero pod koniec próby. Najwyższe naprężenia oraz największe wydłużenie do zerwania odnotowano przy częstotliwości 3 Hz. W przypadku 5 Hz materiał pęka nieco wcześniej i przy nieco niższym naprężeniu, natomiast próbka odkształcana z częstotliwością 7 Hz wykazuje najmniejsze wydłużenie do zerwania spośród wszystkich badanych wariantów.

Zbliżony przebieg krzywych w szerokim zakresie odkształcenia może świadczyć o mniejszej wrażliwości właściwości mechanicznych materiału na zmianę częstotliwości

oscylacji matrycy przy dużym współczynniku wyciskania. Jednocześnie widoczne na przebiegach lokalne skokowe zmiany naprężenia potwierdzają występowanie niestabilności odkształcenia plastycznego, charakterystycznej dla stopów Al-Mg. (Rysunek 6.14)



Rysunek 6.14 Porównanie krzywych naprężenie-odkształcenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz przy współczynniku wyciskania λ=100.

Analiza zjawiska Portevina-Le Chateliera (PLC)

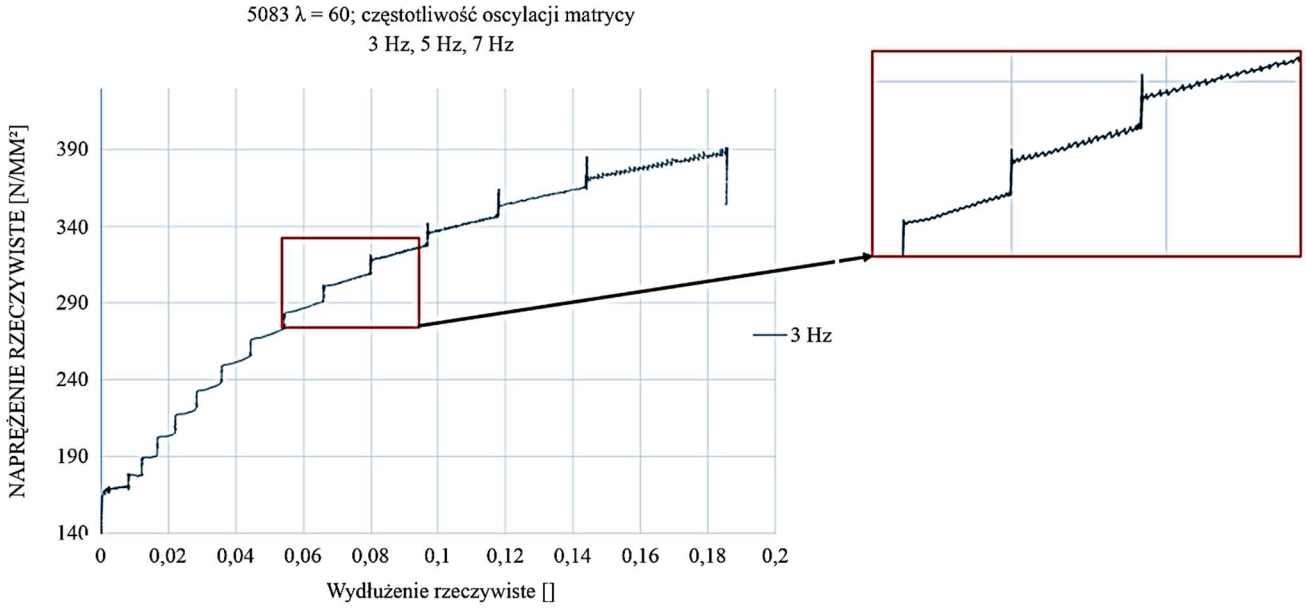
Na krzywych naprężenie-wydłużenie, które otrzymano podczas rozciągania wyrobów ze stopu Al 5083, można zauważyć wyraźne, lokalne wahania naprężenia. Pojawiają się one zaraz po przekroczeniu granicy plastyczności i utrzymują się przez dość duży zakres odkształcenia. To zjawisko objawia się jako naprzemienne wzrosty i spadki naprężenia, co dobrze widać na wykresach krzywych rozciągania (Rysunek 6.15).

Obserwowane serracje są charakterystyczne dla efektu Portevina-Le Chateliera (PLC), który w stopach Al-Mg jest wiązany z mechanizmem dynamicznego starzenia odkształceniowego. Mechanizm ten polega na okresowym oddziaływaniu atomów magnezu

znajdujących się w roztworze stałym z poruszającymi się dyslokacjami, czego skutkiem są lokalne zmiany naprężenia rejestrowane podczas próby rozciągania.

Stop Al 5083, w którym znajduje się około 4-5% magnezu, to materiał, o którym w literaturze pisze się wielokrotnie w kontekście występowania właśnie takich serracji. W badaniach ząbkowanie krzywych pojawiało się we wszystkich badanych wariantach procesu KOBO, bez względu na to, jaki współczynnik wyciskania czy częstotliwość oscylacji matrycy zastosowano. Co ważne, amplituda tych zmian naprężenia była stosunkowo mała.

Trzeba jednak pamiętać, że samo pojawienie się serracji na krzywych nie jest ostatecznym dowodem na występowanie efektu Portevina-Le Chateliera. Niemniej jednak, przebieg uzyskanych krzywych jest zgodny z tym, jak opisuje się to zjawisko dla stopów Al-Mg, co stanowi przesłankę występowania tego zjawiska w badanych próbkach.



Rysunek 6.15 Fragment krzywej naprężenie-wydłużenie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO (λ=60, 3 Hz) wraz z powiększeniem obszaru przedstawiającego charakterystyczne serracje naprężenia wskazujące na możliwość występowania efektu Portevina-Le Chateliera (PLC).

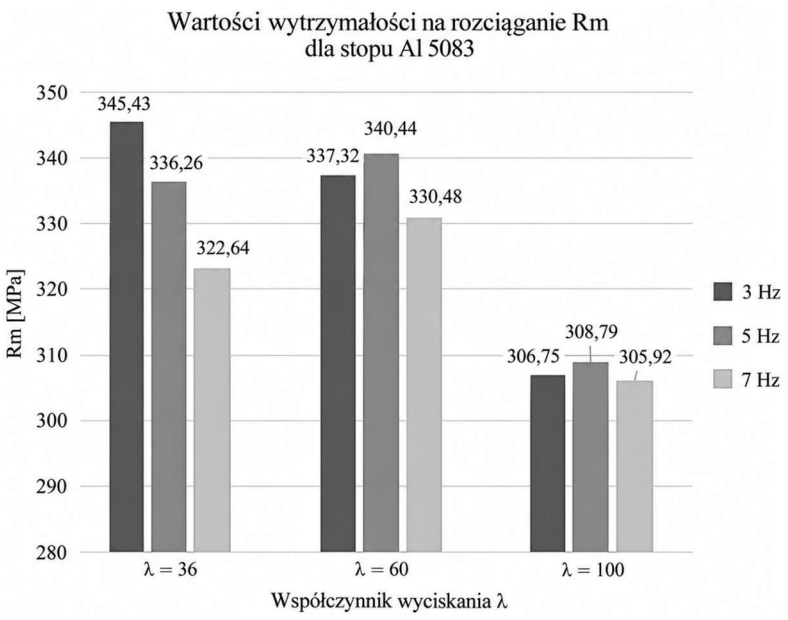
Na rysunku 6.15 przedstawiono fragment krzywej naprężenie-odkształcenie uzyskanej dla wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=60 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz. Powiększenie wybranego obszaru umożliwia dokładniejszą obserwację lokalnych zmian wartości naprężenia.

W analizowanym zakresie odkształcenia widoczne są powtarzające się niewielkie wzrosty naprężenia zakończone gwałtownymi spadkami, tworzące charakterystyczny ząbkowany przebieg krzywej. Tego typu lokalne fluktuacje naprężenia określane są jako serracje i są często obserwowane podczas rozciągania stopów Al-Mg.

Przebieg przedstawiony na wykresie jest zgodny z charakterem serracji opisywanych w literaturze dla efektu Portevina-Le Chateliera. Ze względu na to, że identyfikacja efektu PLC wymaga dodatkowych badań potwierdzających mechanizm jego powstawania, przedstawione wyniki należy traktować jako przesłankę wskazującą na możliwość występowania tego zjawiska w badanym stopie Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO.

Wytrzymałość na rozciąganie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO

Badania wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono dla próbek wyrobów ze stopu Al 5083 wyciskanego metodą KOBO przy współczynnikach wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwościach oscylacji matrycy wynoszących 3, 5 i 7 Hz. Próbki do badań pobierano z początku, środkowej oraz końcowej części wyciśniętych prętów. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm dla poszczególnych wariantów procesu. Wartości wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich analizowanych wariantów przedstawiono na rysunku 6.16.



Rysunek 6.16 Wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz

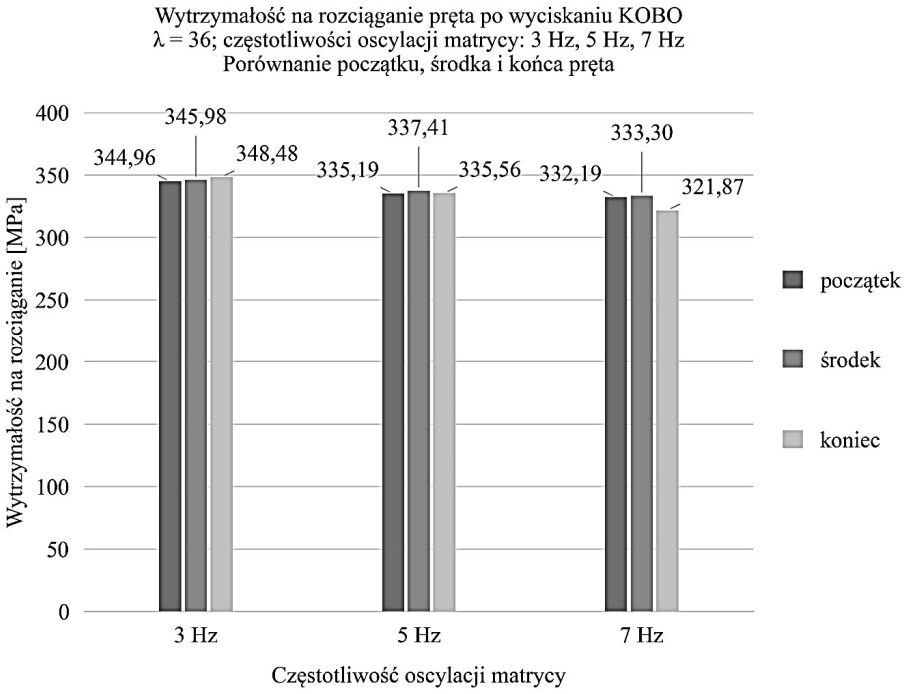
Dla współczynnika wyciskania λ=36 najwyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie uzyskano przy częstotliwości 3 Hz, dla której Rm wyniosła 345,43 MPa. Zwiększenie częstotliwości oscylacji do 5 Hz wiązało się ze spadkiem wytrzymałości do 336,26 MPa, natomiast dla 7 Hz odnotowano wartość 322,64 MPa. Różnica pomiędzy skrajnymi wariantami (3 Hz i 7 Hz) wyniosła 22,79 MPa, co odpowiada spadkowi o około 6,6%.

Dla współczynnika wyciskania λ=60 najwyższą wartość Rm uzyskano przy częstotliwości 5 Hz, gdzie osiągnęła ona 340,44 MPa. Nieznacznie niższą wartość odnotowano dla 3 Hz (337,32 MPa), natomiast przy 7 Hz wytrzymałość na rozciąganie zmniejszyła się do 330,48 MPa. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 9,96 MPa, czyli około 2,9%.

Najniższe wartości wytrzymałości na rozciąganie uzyskano dla współczynnika wyciskania λ=100. Dla częstotliwości 5 Hz wartość Rm wyniosła 308,79 MPa, dla 3 Hz 306,75 MPa, natomiast dla 7 Hz 305,92 MPa. Maksymalna różnica pomiędzy analizowanymi częstotliwościami wyniosła jedynie 2,87 MPa, co odpowiada około 0,9%.

Porównanie wszystkich analizowanych wariantów wskazuje, że najwyższą wytrzymałość na rozciąganie uzyskano dla współczynnika wyciskania λ=36 przy częstotliwości 3 Hz, natomiast najniższą dla λ=100 przy 7 Hz. Wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania z λ=36 do λ=100 obserwuje się obniżenie wartości wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich analizowanych częstotliwości oscylacji matrycy. Jednocześnie wpływ częstotliwości oscylacji na wartość Rm jest najbardziej widoczny dla współczynnika wyciskania λ=36, natomiast dla λ=100 różnice pomiędzy poszczególnymi częstotliwościami są niewielkie.

Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36 przedstawiono na rysunku 6.17. Analiza wyników wskazuje, że przy tym współczynniku odkształcenia materiał charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz niewielkim zróżnicowaniem właściwości mechanicznych wzdłuż długości wyciśniętego pręta.



Rysunek 6.17 Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm stopu Al 5083 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz

Przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 3 Hz, wartości wytrzymałości we wszystkich badanych strefach pręta okazały się do siebie bardzo zbliżone. Na początku pręta Rm wyniosło 344,96 MPa, w środku 345,98 MPa, a na końcu 348,48 MPa. Ponieważ różnica między najwyższym a najniższym wynikiem nie przekroczyła 4 MPa, można stwierdzić, że właściwości mechaniczne materiału są wyjątkowo jednorodne.

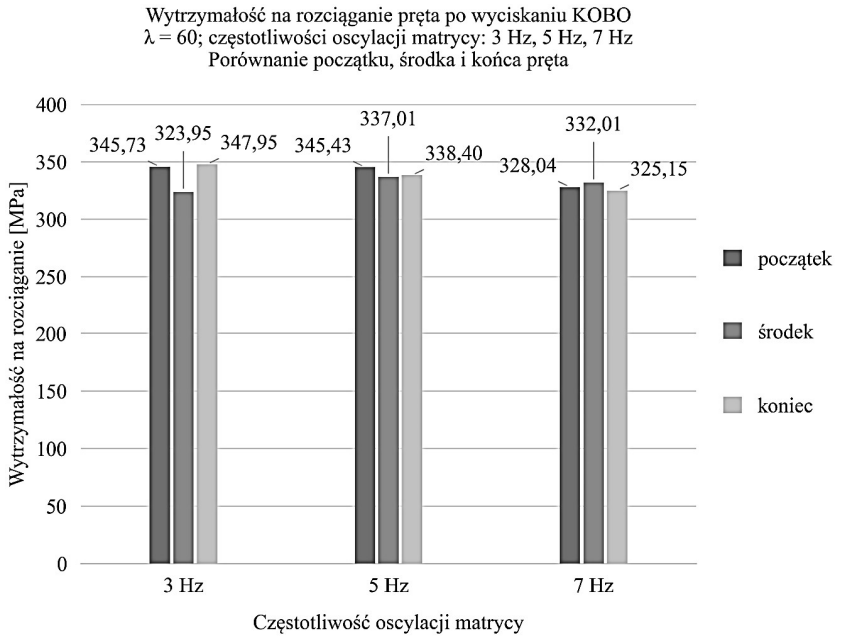
Podobnie sytuacja wyglądała przy 5 Hz, gdzie wytrzymałość utrzymała się na zbliżonym poziomie. W początkowej części pręta odnotowano 335,19 MPa, w środkowej 337,41 MPa, a na końcu 335,56 MPa. Maksymalna różnica między strefami wyniosła zaledwie około 2 MPa, co potwierdza, że proces KOBO przebiega stabilnie, a odkształcenie plastyczne rozkłada się równomiernie.

Zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy do 7 Hz spowodowało niewielkie obniżenie wytrzymałości na rozciąganie. Wartość Rm na początku pręta wyniosła 332,19 MPa, w środkowej części 333,30 MPa, natomiast na końcu 321,87 MPa. W porównaniu z częstotliwościami 3 i 5 Hz widoczny jest niewielki spadek wytrzymałości, szczególnie w końcowej części pręta, jednak uzyskane wartości nadal pozostają na wysokim poziomie charakterystycznym dla wyrobów ze stopu Al 5083.

Patrząc na wszystkie przebadane częstotliwości, widać wyraźnie, że najwyższą wytrzymałość osiągnięto przy 3 Hz. Zwiększenie częstotliwości do 5 Hz przyniosło tylko niewielkie obniżenie Rm, a największy spadek nastąpił przy 7 Hz. Mimo to różnice między poszczególnymi wariantami nie przekroczyły około 7-8%. Wyniki te sugerują, że przy współczynniku wyciskania λ=36 częstotliwość oscylacji matrycy ma stosunkowo mały wpływ na wytrzymałość na rozciąganie, W badanych warunkach uzyskano niewielkie zróżnicowanie wytrzymałości wzdłuż pręta.

Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 przedstawiono na rysunku 6.18. Wykres pokazuje wyniki dla próbek pobranych z początku, środka oraz końca pręta, przy częstotliwościach oscylacji matrycy wynoszących odpowiednio 3, 5 i 7 Hz. Dla częstotliwości 3 Hz najwyższą wartość wytrzymałość odnotowano w końcowej części pręta (347,95 MPa), podczas gdy na początku wyniosła ona 345,73 MPa. Najsłabszy wynik uzyskano dla próbki ze środkowej części pręta, gdzie Rm wyniosło 323,95 MPa. Różnica między skrajnymi wartościami wyniosła w tym przypadku 24,00 MPa.

Przy częstotliwości 5 Hz najwyższy poziom Rm zaobserwowano na początku pręta (345,43 MPa). W końcowej części wytrzymałość wyniosła 338,40 MPa, a w środkowej 337,01 MPa. Maksymalna różnica między badanymi strefami pręta wyniosła tutaj 8,42 MPa.

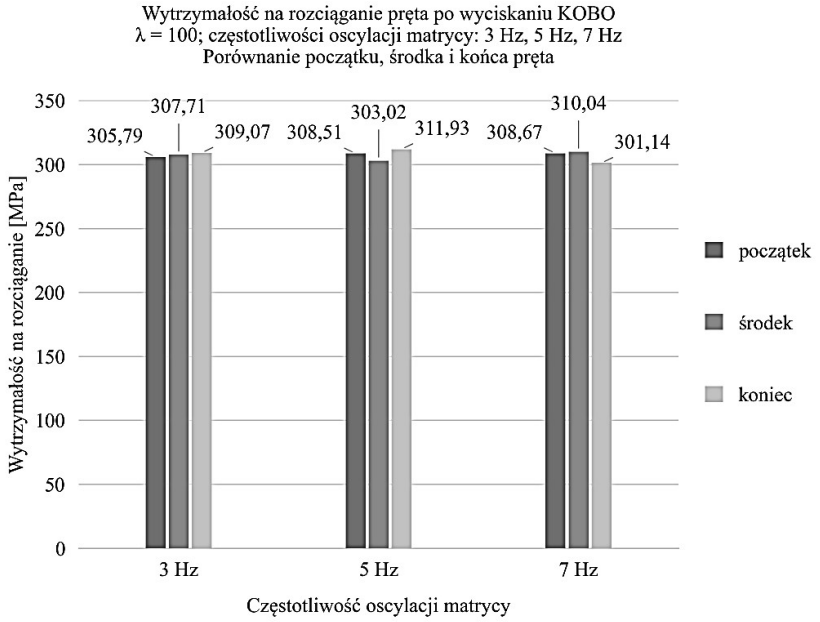


Rysunek 6.18 Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu Al 5083 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Przy częstotliwości 7 Hz najwyższą wytrzymałość na rozciąganie odnotowano w środkowej części pręta, gdzie osiągnęła ona 332,01 MPa. Na początku pręta wartość Rm wyniosła 328,04 MPa, a na jego końcu 325,15 MPa. Różnica między tymi skrajnymi wynikami wyniosła zatem 6,86 MPa.

Porównanie wyników uzyskanych dla poszczególnych częstotliwości wskazuje, że najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie zarejestrowano dla częstotliwości 3 Hz i 5 Hz, natomiast dla 7 Hz wartości Rm były niższe w każdej z analizowanych stref pręta. Największe zróżnicowanie wytrzymałości wzdłuż długości pręta wystąpiło dla częstotliwości 3 Hz, podczas gdy dla 5 Hz i 7 Hz różnice pomiędzy początkiem, środkiem i końcem pręta były wyraźnie mniejsze.

Z uzyskanych danych wynika, że przy współczynniku wyciskania λ=60 rozkład wytrzymałości na rozciąganie zależy zarówno od tego, z jakiej części pręta pobrano próbkę, jak i od częstotliwości oscylacji matrycy. Najmniejsze zróżnicowanie wartości Rm wzdłuż pręta zaobserwowano przy 7 Hz, a największe przy 3 Hz. Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 przedstawiono rysunku 6.19. Na wykresie zestawiono wartości wytrzymałości na rozciąganie próbek pobranych z początku, środkowej oraz końcowej części pręta dla częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.



Rysunek 6.19 Rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu Al 5083 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Dla częstotliwości 3 Hz wartości wytrzymałości na rozciąganie były zbliżone na całej długości pręta. Na początku pręta wartość Rm wyniosła 305,73 MPa, w środkowej części 307,71 MPa, natomiast na końcu 309,07 MPa. Maksymalna różnica pomiędzy analizowanymi strefami wyniosła 3,34 MPa.

Przy częstotliwości 5 Hz najwyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie odnotowano w końcowej części pręta (311,93 MPa). Dla próbki pobranej z początku pręta wartość Rm wyniosła 308,51 MPa, natomiast dla próbki ze środkowej części 303,02 MPa. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 8,91 MPa.

Dla częstotliwości 7 Hz najwyższą wartość Rm uzyskano w środkowej części pręta (310,04 MPa). Na początku pręta wytrzymałość na rozciąganie wyniosła 308,67 MPa, natomiast na końcu 301,14 MPa. Maksymalna różnica pomiędzy analizowanymi strefami osiągnęła 8,90 MPa.

W tabeli 6.3 przedstawiono wartości Rm i Rp0,2 wyrobów ze stopu Al 5083 dla próbek pobranych ze środkowej części pręta. Wytrzymałość na rozciąganie mieściła się w zakresie od 303,02 do 345,98 MPa. Najwyższą wartość uzyskano dla λ=36 przy częstotliwości 3 Hz, a najniższą dla λ=100 przy 5 Hz. Przy każdej analizowanej częstotliwości wartości Rm zmniejszały się wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania.

Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy zależał od wartości λ. Dla λ=36 zwiększenie częstotliwości z 3 do 7 Hz prowadziło do obniżenia Rm z 345,98 do 333,30 MPa. Dla λ=60 najwyższą wartość odnotowano przy 5 Hz (337,01 MPa), natomiast dla λ=100 przy 7 Hz (310,04 MPa). W tych dwóch wariantach zależność Rm od częstotliwości była niemonotoniczna.

Zestawione wartości Rp0,2 wynosiły od 117,3 do 204,9 MPa. Najwyższą wartość uzyskano dla λ=36 przy 3 Hz, a najniższą dla λ=100 również przy 3 Hz. Dla λ=36 parametr ten zmniejszał się wraz ze wzrostem częstotliwości, dla λ=60 osiągał maksimum przy 5 Hz, natomiast dla λ=100 wzrastał wraz ze zwiększaniem częstotliwości. Zestawienie wskazuje, że zmiany Rm i Rp0,2 zależały od łącznego doboru współczynnika wyciskania oraz częstotliwości oscylacji matrycy.

Tabela 6.3 Wpływ współczynnika wyciskania i częstotliwości na wartość wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO w zależności od współczynnika wyciskania λ i częstotliwości oscylacji matrycy-próbki pobrane ze środkowej części pręta.

Współczynnik wyciskania λ	Częstotliwość oscylacji matrycy [Hz]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Granica plastyczności Rp0,2 [MPa]
36	3	345,98	204,9
36	5	337,41	184,6
36	7	333,30	171,5
60	3	323,95	171,1
60	5	337,01	184,3
60	7	332,01	147,5
100	3	307,71	117,3
100	5	303,02	130,0
100	7	310,04	137,0

Dane w tabeli 6.4 wskazują, że wartości wytrzymałości na rozciąganie Rm różnią się w zależności od położenia próbki na długości pręta, a skala tych różnic zależy od współczynnika wyciskania oraz częstotliwości oscylacji matrycy. Dla λ=36 najwyższe wartości Rm uzyskano przy 3 Hz, a różnica pomiędzy największą i najmniejszą wartością wyniosła 3,52 MPa. Przy 5 Hz wartości były jeszcze bardziej wyrównane, z różnicą 2,22 MPa. Przy 7 Hz odnotowano obniżenie wytrzymałości w końcowej części pręta, a różnica między wartościami maksymalną i minimalną osiągnęła 11,43 MPa.

Dla λ=60 największe zróżnicowanie wystąpiło przy 3 Hz. W środkowej części pręta Rm wyniosła 323,95 MPa, natomiast na początku i końcu odpowiednio 345,73 i 347,95 MPa. Różnica między największą i najmniejszą wartością osiągnęła 24,00 MPa. Przy 5 i 7 Hz zróżnicowanie było mniejsze i wynosiło odpowiednio 8,42 oraz 6,86 MPa.

Tabela 6.4 Wpływ współczynnika wyciskania i częstotliwości na wartość wytrzymałości na rozciąganie Rm wyrobu ze stopu Al 5083 dla początku, środka i końca pręta po wyciskaniu metodą KOBO

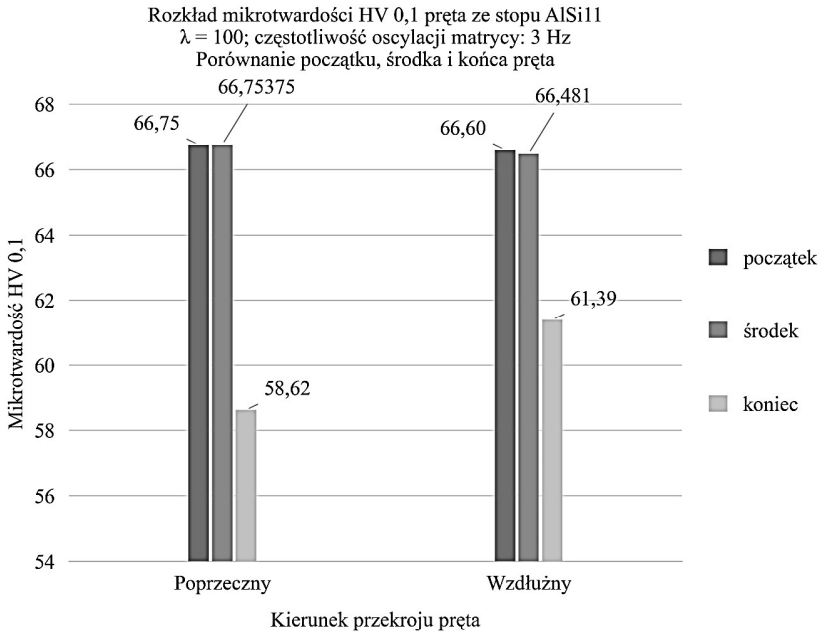
Współczynnik wyciskania λ	Częstotliwość oscylacji matrycy [Hz]	Początek Rm [MPa]	Środek Rm [MPa]	Koniec Rm [MPa]
36	3	344,96	345,98	348,48
36	5	335,19	337,41	335,56
36	7	332,19	333,30	321,87
60	3	345,73	323,95	347,95
60	5	345,43	337,01	338,40
60	7	328,04	332,01	325,15
100	3	305,79	307,71	309,07
100	5	308,51	303,02	311,93
100	7	308,67	310,04	301,14

Dla λ=100 wartości Rm mieściły się w przedziale od 301,14 do 311,93 MPa. Najmniejsze różnice na długości pręta zaobserwowano przy częstotliwości 3 Hz, gdzie wyniosły one zaledwie 3,28 MPa. Przy 5 i 7 Hz różnica ta wzrosła odpowiednio do 8,91 i 8,90 MPa. Choć wariant λ=100 wykazywał niższą wytrzymałość niż λ=36 i λ=60, to zwiększenie współczynnika wyciskania nie spowodowało wyraźnego zmniejszenia rozbieżności Rm wzdłuż pręta. Najbardziej wyrównane wyniki udało się uzyskać dla λ=36 przy częstotliwości 5 Hz.

6.1.1. Analiza porównawcza wyników badań wyrobów ze stopu AlSi11 i Al 5083

Analiza rozkładu mikrotwardości wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO

Rozkład mikrotwardości to ważny wskaźnik, który pozwala sprawdzić, jak jednorodne są właściwości mechaniczne materiału po procesie wyciskania metodą KOBO. Analizując zmiany wartości HV0,1 wzdłuż pręta oraz w dwóch różnych kierunkach, można ocenić, jak parametry procesu wpływają na stopień umocnienia materiału i jak bardzo właściwości różnią się w przekroju wyrobu. Na rysunku 6.20 przedstawiono wartości mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 3 Hz. Wyniki zostały zestawione dla trzech charakterystycznych stref pręta początkowej, środkowej oraz końcowej, z uwzględnieniem kierunku poprzecznego i wzdłużnego.



Rysunek 6.20 Rozkład wartości mikrotwardości HV0,1 pręta ze stopu AlSi11 w strefach początkowej, środkowej i końcowej, w kierunku poprzecznym i wzdłużnym, po wyciskaniu metodą KOBO (λ=100, f=3 Hz).

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że w kierunku poprzecznym najwyższe wartości mikrotwardości uzyskano w części początkowej oraz środkowej pręta, gdzie wyniosły odpowiednio 66,75 HV0,1 i 66,75 HV0,1. W części końcowej odnotowano spadek mikrotwardości do 58,62 HV0,1.

Podobny trend widać także w kierunku wzdłużnym. Tam mikrotwardość wyniosła 66,60 HV0,1 na początku, 66,48 HV0,1 w środku i spadła do 61,39 HV0,1 w części końcowej. Porównując oba kierunki, można zauważyć, że różnice na początku i w środku pręta były niewielkie, ale w jego końcowej części stały się wyraźniejsze, ponieważ wartości w kierunku poprzecznym były wtedy niższe. Takie wyniki dowodzą, że rozkład mikrotwardości wzdłuż wyrobu nie jest jednolity, co wymaga dalszej analizy pod kątem zmian w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11.

Różnice między pomiarami poprzecznymi a wzdłużnymi, szczególnie widoczne na końcu pręta, sugerują, że właściwości mechaniczne materiału nie są wszędzie takie same. W większości badanych przypadków mikrotwardość w kierunku wzdłużnym była wyższa niż poprzecznym, co potwierdza, że właściwości materiału zmieniają się w zależności od kierunku pomiaru (Rysunek 6.21).



Rysunek 6.21 Zestawienie wartości mikrotwardości wyrobów ze stopu AlSi 11 dla różnych parametrów λ, z uwzględnieniem kierunku pomiaru (poprzecznego i wzdłużnego).

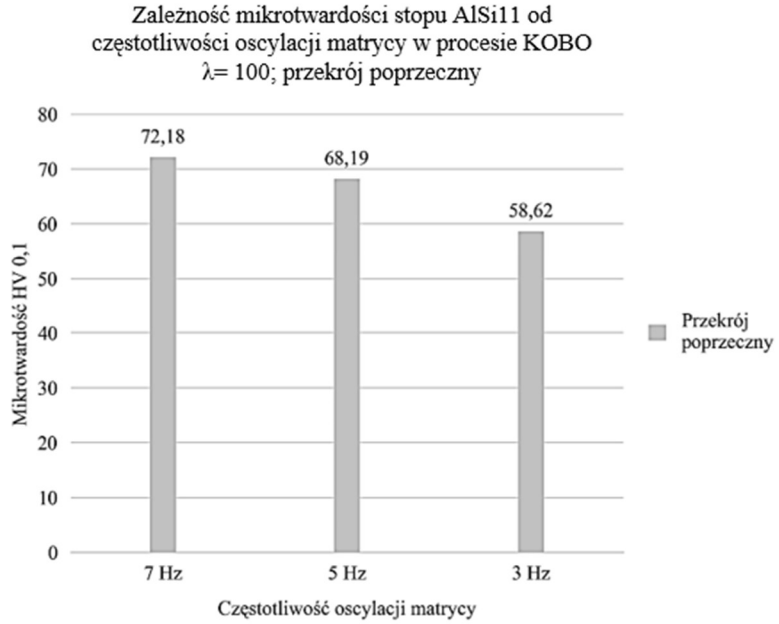
Porównując wyniki dla różnych wartości współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy, można zauważyć, że różnice między kierunkiem poprzecznym a wzdłużnym pojawiają się w większości badanych wariantów. Największe rozbieżności wystąpiły na końcach prętów, podczas gdy w ich środkowej i początkowej części wartości mikrotwardości były zazwyczaj do siebie zbliżone.

Te różnice w mikrotwardości wynikają prawdopodobnie z kierunkowego charakteru odkształcenia podczas wyciskania metodą KOBO oraz zmian, jakie zachodzą w mikrostrukturze materiału. Dokładna interpretacja tych zależności przedstawiona zostanie w dalszej części pracy, opierając się na wynikach badań mikrostrukturalnych. Z uzyskanych danych wynika, że pomiary mikrotwardości to dobra metoda na ocenę jednorodności właściwości mechanicznych wyrobów otrzymanych metodą KOBO. Pozwalają one także porównać, jak poszczególne parametry procesu wpływają na stopień umocnienia materiału. Wyniki te uzupełniają badania wytrzymałościowe i zostaną zestawione ze zmianami mikrostrukturalnymi, o których mowa w kolejnych podrozdziałach.

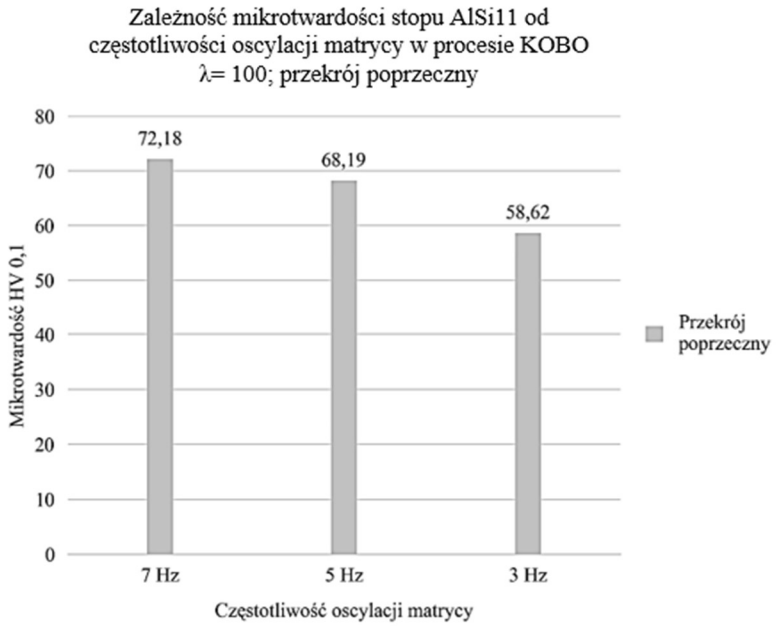
Wpływ częstotliwości oscylacji na mikrotwardość wyrobów ze stopu AlSi11

Częstotliwość oscylacji matrycy to jeden z kluczowych parametrów technicznych w procesie wyciskania metodą KOBO. Ma ona bezpośredni wpływ na to, jak materiał ulega odkształceniu i jakie właściwości ostatecznie zyskuje. Zmieniając tę częstotliwość, można zaobserwować zmiany w mikrotwardości, co pozwala ocenić, jak parametry procesu wpływają na stopień umocnienia wyrobów ze stopu AlSi11.

Z przeprowadzonych pomiarów mikrotwardości wynika, że wpływ częstotliwości oscylacji matrycy zależy od tego, w jakim kierunku wykonywany jest pomiar. W przekroju poprzecznym widać wyraźny wzrost mikrotwardości wraz ze zwiększaniem częstotliwości, ale w przypadku przekroju wzdłużnego te zmiany są znacznie mniej zauważalne. Wyniki te pokazują, że materiał reaguje na zmiany parametrów procesu w różny sposób, zależnie od orientacji pomiaru.



Rysunek 6.22 wskazuje, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy powoduje systematyczny wzrost wartości mikrotwardości w przekroju poprzecznym. Najniższe wartości uzyskano dla częstotliwości 3 Hz, natomiast najwyższe dla 7 Hz. Tendencja ta występuje we wszystkich analizowanych współczynnikach wyciskania, choć jej intensywność jest zróżnicowana.

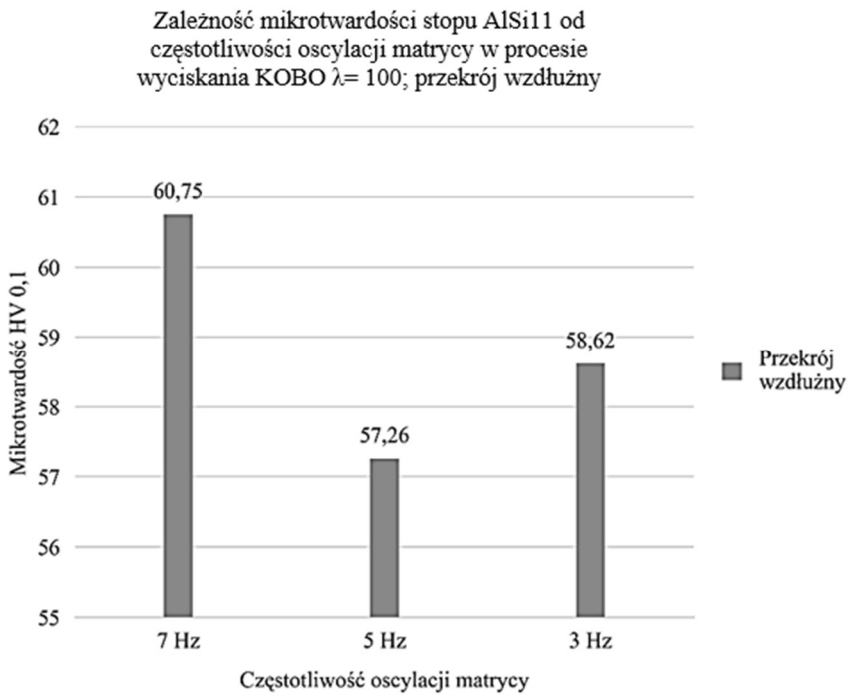


Rysunek 6.22 Zależność mikrotwardości wyrobów ze stopu AlSi11 od częstotliwości oscylacji matrycy w procesie wyciskania KOBO-przekrój poprzeczny.

Wyniki pokazują, że częstotliwość oscylacji matrycy ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne materiału mierzone w przekroju poprzecznym. Zobrazują to wyniki badań mikrostrukturalnych, dzięki którym możliwe będzie powiązanie zmiany mikrotwardości z przebudową wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO.

Odmienny charakter zmian mikrotwardości obserwowany w przekroju wzdłużnym wskazuje, że wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na właściwości materiału zależy od kierunku pomiaru. W przekroju wzdłużnym wartości mikrotwardości zmieniają się w znacznie mniejszym stopniu niż w przekroju poprzecznym, co świadczy o mniejszej wrażliwości tego kierunku na zmianę parametrów procesu.

Analiza wyników przedstawionych na rysunku 6.23 potwierdza, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy nie przekłada się na wyraźny wzrost mikrotwardości w przekroju wzdłużnym. W przeciwieństwie do tego, co obserwowano w przekroju poprzecznym, zmiany tutaj są niewielkie i nie widać w nich jasnej zależności od częstotliwości procesu. Te różnice między przekrojem poprzecznym a wzdłużnym jasno pokazują, że po procesie wyciskania metodą KOBO właściwości mechaniczne materiału stają się niejednorodne.



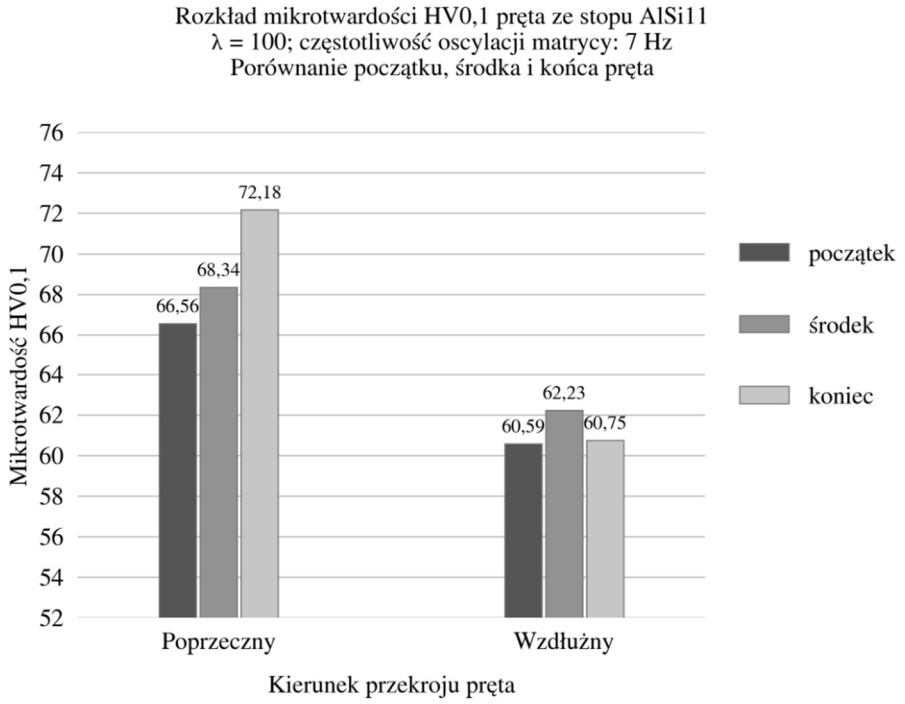
Rysunek 6.23 Zależność mikrotwardości wyrobów ze stopu AlSi11 od częstotliwości oscylacji matrycy w procesie wyciskania KOBO-przekrój wzdłużny

Zaobserwowane zależności należy rozpatrywać łącznie z wynikami badań mikrostrukturalnych przedstawionymi w dalszej części pracy, które umożliwią pełniejszą interpretację wpływu częstotliwości oscylacji na przebudowę struktury wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO.

Zróżnicowanie mikrotwardości wzdłuż pręta ze stopu AlSi11

Jednym z istotnych aspektów oceny procesu wyciskania metodą KOBO jest analiza jednorodności właściwości mechanicznych wzdłuż długości otrzymanego pręta. Rozkład mikrotwardości umożliwia ocenę wpływu parametrów procesu na zróżnicowanie stopnia umocnienia materiału w poszczególnych strefach wyrobu.

Na rysunku 6.24 przedstawiono średnie wartości mikrotwardości HV0,1 wyznaczone na przekrojach poprzecznych i podłużnych próbek pobranych z początkowej, środkowej oraz końcowej części pręta ze stopu AlSi11. Wyrób otrzymano metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz.



Rysunek 6.24 Rozkład mikrotwardości HV 0,1 pręta ze stopu AlSi11 początek, środek, koniec pręta λ=100, 7Hz

Na przekroju poprzecznym mikrotwardość wzrastała wzdłuż długości pręta. W części początkowej wynosiła 66,56 HV0,1, w części środkowej 68,34 HV0,1, a w części końcowej osiągnęła 72,18 HV0,1. Różnica między najwyższą i najniższą średnią wartością, obliczona przed zaokrągleniem wyników, wyniosła 5,61 HV0,1.

Na przekroju podłużnym zaobserwowano odmienny przebieg zmian. Mikrotwardość wzrosła z 60,59 HV0,1 w części początkowej do 62,23 HV0,1 w części środkowej, a następnie zmniejszyła się do 60,75 HV0,1 w części końcowej. Różnica między wartościami maksymalną i minimalną wyniosła 1,64 HV0,1. Zróżnicowanie średniej mikrotwardości na długości pręta było więc mniejsze niż na przekroju poprzecznym.

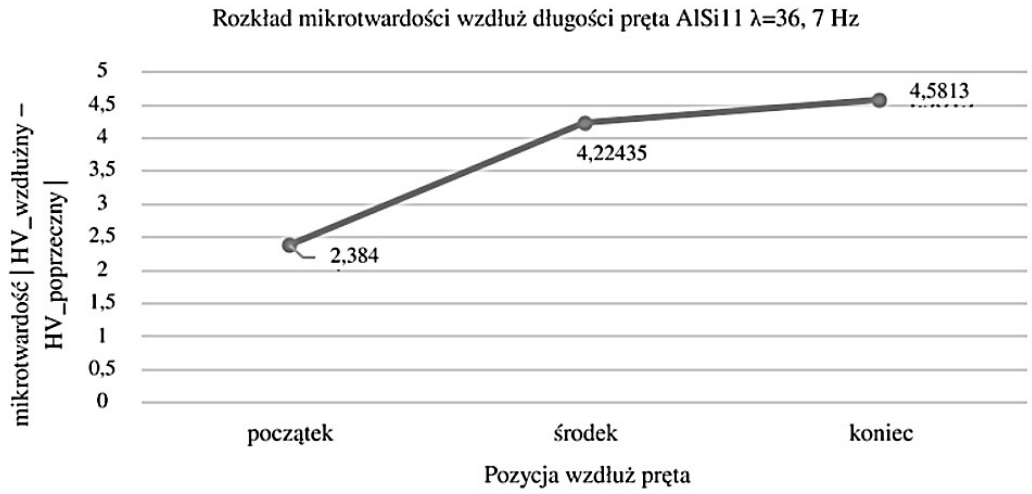
We wszystkich analizowanych częściach pręta średnia mikrotwardość na przekroju poprzecznym była wyższa niż na podłużnym. Największą różnicę między przekrojami odnotowano w części końcowej, gdzie wyniosła 11,43 HV0,1. Wyniki wskazują, że mikrotwardość badanego wyrobu zależała zarówno od miejsca pobrania próbki, jak i od orientacji przekroju. Interpretację tych różnic przedstawiono w dalszej części pracy w odniesieniu do obserwacji mikrostrukturalnych.

Mikrotwardość wyrobów ze stopu AlSi11

Badania mikrotwardości wykonane zarówno w kierunku poprzecznym, jak i wzdłużnym, wykazały, że proces wyciskania metodą KOBO powoduje różnice we właściwościach mechanicznych w zależności od przekroju mierzonej próbki. Porównując wartości z obu tych kierunków, można ocenić, jak bardzo właściwości materiału zmieniają się po tak intensywnym odkształceniu plastycznym (Rysunek 6.25).

W większości badanych wariantów procesów mikrotwardość mierzona wzdłuż pręta była wyższa niż ta mierzona poprzecznie. Takie różnice jasno pokazują, że po wyciskaniu metodą KOBO stop AlSi11 wykazuje odmienne właściwości mechaniczne w zależności od kierunku.

Analiza wyników wykazała również, że intensywność różnic zmienia się wzdłuż długości pręta. Największe różnice pomiędzy kierunkiem poprzecznym i wzdłużnym obserwowano w części środkowej oraz końcowej wyrobu, natomiast w części początkowej wartości mikrotwardości były bardziej zbliżone.



Rysunek 6.25 Rozkład mikrotwardości wzdłuż długości pręta AlSi11 λ=36, 7Hz, wyznaczony jako bezwzględna różnica wartości mikrotwardości HV w kierunku wzdłużnym i poprzecznym dla początku, środka i końca pręta.

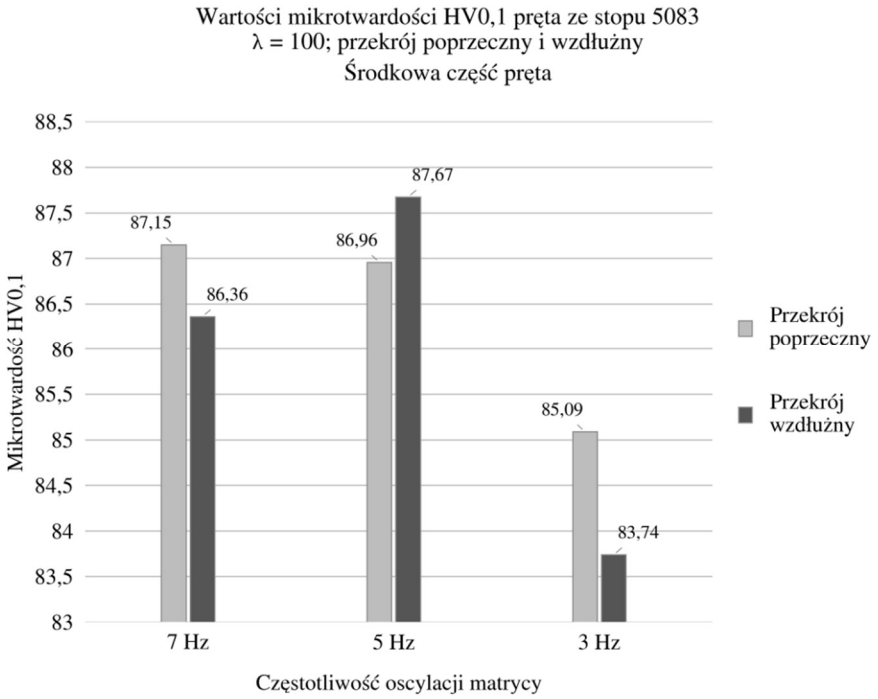
Uzyskane wyniki wskazują, że proces KOBO nie prowadzi do całkowitego wyrównania właściwości mechanicznych w obu kierunkach pomiarowych.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że analiza mikrotwardości stanowi użyteczne narzędzie oceny zróżnicowania właściwości mechanicznych materiałów poddanych wyciskaniu metodą KOBO.

Z technologicznego punktu widzenia ograniczenie zróżnicowania właściwości mechanicznych jest istotne, ponieważ wpływa na jednorodność właściwości użytkowych wyrobów oraz ich zachowanie podczas eksploatacji. Uzyskane wyniki wskazują, że odpowiedni dobór parametrów procesu KOBO może wpływać na stopień zróżnicowania właściwości mechanicznych wyrobów ze stopu AlSi11.

Analiza rozkładu mikrotwardości wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania KOBO

Na rysunku 6.26 przedstawiono wartości mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100, wyznaczone na przekroju poprzecznym oraz wzdłużnym prętów przy częstotliwościach oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.



Rysunek 6.26 Wartości mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100, wyznaczone na przekroju poprzecznym i wzdłużnym prętów przy różnych częstotliwościach oscylacji matrycy.

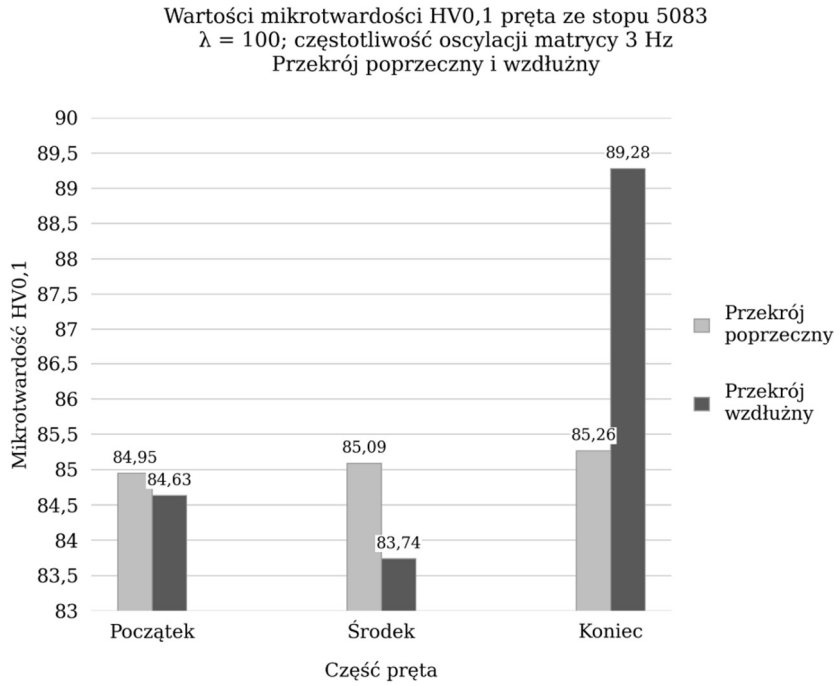
Najwyższą średnią mikrotwardość na przekroju poprzecznym w środkowej części pręta ze stopu Al 5083 uzyskano przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz wyniosła ona 87,15 HV0,1. Przy 5 Hz odnotowano 86,96 HV0,1, natomiast przy 3 Hz wyniosła 85,09 HV0,1. Na przekroju wzdłużnym najwyższą wartość, równą 87,67 HV0,1, uzyskano przy 5 Hz. Przy częstotliwościach 7 Hz i 3 Hz mikrotwardość wynosiła odpowiednio 86,36 HV0,1 i 83,74 HV0,1.

Na przekroju poprzecznym mikrotwardość wzrastała wraz ze zwiększaniem częstotliwości oscylacji matrycy, a różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 2,06 HV0,1. Na przekroju wzdłużnym zwiększeniu częstotliwości z 3 do 5 Hz towarzyszył wzrost mikrotwardości o 3,93 HV0,1. Dalsze zwiększenie częstotliwości do 7 Hz wiązało się z jej obniżeniem o 1,31 HV0,1. Wartość uzyskana przy 7 Hz pozostawała jednak o 2,62 HV0,1 wyższa niż przy 3 Hz.

Przy częstotliwościach 3 i 7 Hz mikrotwardość na przekroju poprzecznym była wyższa niż na przekroju wzdłużnym, odpowiednio o 1,35 HV0,1 i 0,79 HV0,1. Przy 5 Hz zależność była odwrotna mikrotwardość na przekroju wzdłużnym przewyższała wartość na przekroju poprzecznym o 0,71 HV0,1.

Wyniki wskazują, że przy współczynniku wyciskania λ=100 wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na mikrotwardość zależał od orientacji badanego przekroju. Najwyższą mikrotwardość na przekroju poprzecznym uzyskano przy 7 Hz, a na przekroju wzdłużnym - przy 5 Hz. Najniższe wartości na obu przekrojach odnotowano przy 3 Hz.

Na rysunku 6.27 przedstawiono rozkład mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz. Pomiary wykonano na przekroju poprzecznym oraz wzdłużnym pręta dla próbek pobranych z początku, środkowej części oraz końca wyrobu.



Rysunek 6.27 Wartości mikrotwardości HV0,1 na przekrojach poprzecznym i wzdłużnym w początkowej, środkowej i końcowej części pręta ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz

Przedstawiono rozkład średnich wartości mikrotwardości wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz. Pomiary wykonano na przekrojach poprzecznym i wzdłużnym próbek pobranych z początkowej, środkowej i końcowej części pręta.

Na przekroju poprzecznym odnotowano niewielki wzrost mikrotwardości wzdłuż pręta. W części początkowej średnia wartość wyniosła 84,95 HV0,1, w środkowej 85,09 HV0,1,

natomiast w końcowej 85,26 HV0,1. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 0,31 HV0,1.

Na przekroju wzdłużnym zaobserwowano większe zróżnicowanie mikrotwardości. W części początkowej średnia wartość wyniosła 84,63 HV0,1, a w środkowej zmniejszyła się do 83,74 HV0,1. Najwyższą mikrotwardość, równą 89,28 HV0,1, odnotowano w części końcowej. Różnica pomiędzy wartością najwyższą i najniższą wyniosła 5,54 HV0,1.

W początkowej i środkowej części pręta mikrotwardość na przekroju poprzecznym była wyższa niż na przekroju wzdłużnym, odpowiednio o 0,32 HV0,1 i 1,35 HV0,1. W części końcowej zależność była odwrotna - wartość na przekroju wzdłużnym przewyższała wartość na przekroju poprzecznym o 4,02 HV0,1.

Średnie wartości mikrotwardości mieściły się w zakresie od 83,74 do 89,28 HV0,1. Uzyskane wyniki wskazują na niewielkie zróżnicowanie mikrotwardości wzdłuż pręta na przekroju poprzecznym oraz większe różnice na przekroju wzdłużnym, związane przede wszystkim z podwyższoną wartością w końcowej części wyrobu.

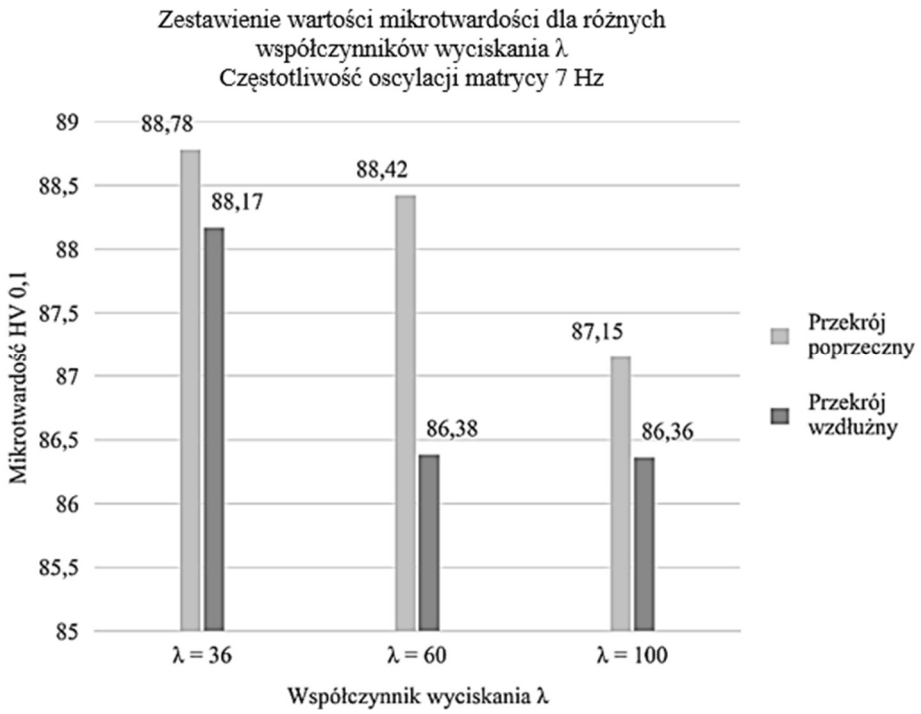
Na rysunku 6.28 przedstawiono zestawienie wartości mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 przy stałej częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 7 Hz. Pomiary wykonano na przekroju poprzecznym oraz wzdłużnym prętów.

Najwyższe wartości mikrotwardości odnotowano dla współczynnika wyciskania λ=36. Na przekroju poprzecznym wartość wyniosła 88,78 HV0,1, natomiast na przekroju wzdłużnym 88,17 HV0,1. Dla współczynnika wyciskania λ=60 uzyskano odpowiednio 88,42 HV0,1 oraz 86,38 HV0,1, natomiast dla λ=100 mikrotwardość wyniosła 87,15 HV0,1 na przekroju poprzecznym oraz 86,36 HV0,1 na przekroju wzdłużnym.

Porównanie wyników uzyskanych na przekroju poprzecznym wskazuje na stopniowe zmniejszenie mikrotwardości wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania z λ=36 do λ=100. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 1,63 HV0,1.

Na przekroju wzdłużnym najwyższą wartość mikrotwardości również odnotowano dla współczynnika wyciskania λ=36. Dla współczynników wyciskania λ=60 i λ=100 uzyskano

bardzo zbliżone wartości, różniące się jedynie o 0,02 HV0,1. Różnica pomiędzy najwyższą wartością dla λ=36 a najniższą dla λ=100 wyniosła 1,81 HV0,1.



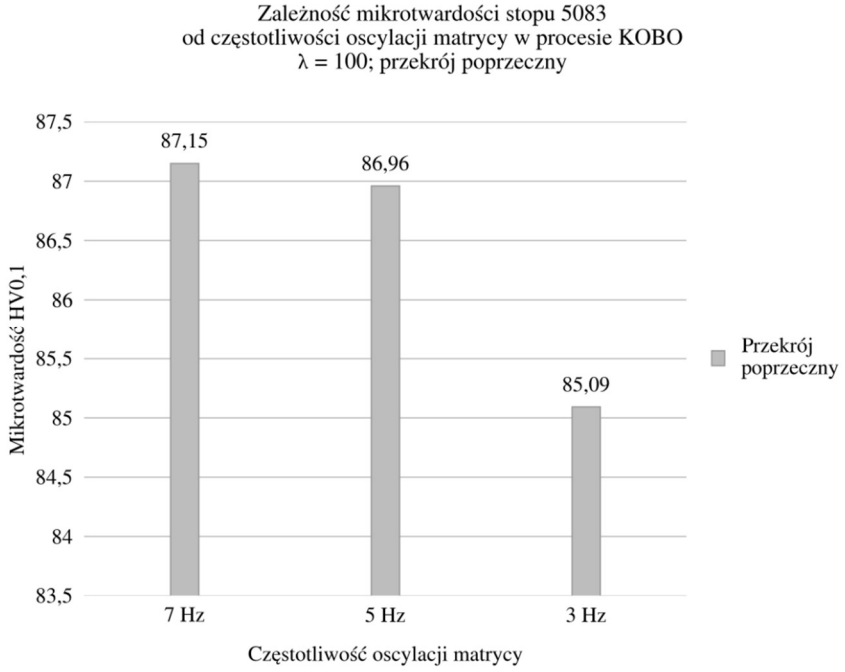
Rysunek 6.28 Wartości mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO dla różnych współczynników wyciskania (λ=36, 60 i 100) przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz, wyznaczone na przekroju poprzecznym i wzdłużnym prętów.

We wszystkich analizowanych wariantach wartości mikrotwardości wyznaczone na przekroju poprzecznym były wyższe od wartości uzyskanych na przekroju wzdłużnym. Najmniejszą różnicę pomiędzy przekrojami odnotowano dla współczynnika wyciskania λ=36 (0,61 HV0,1), natomiast największą dla λ=60, gdzie wyniosła 2,04 HV0,1. Dla współczynnika wyciskania λ=100 różnica osiągnęła 0,79 HV0,1.

Porównanie wszystkich analizowanych wariantów wskazuje, że przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz najwyższe wartości mikrotwardości uzyskano dla współczynnika wyciskania λ=36, natomiast najniższe dla λ=100. Jednocześnie wartości uzyskane dla współczynników wyciskania λ=60 i λ=100 na przekroju wzdłużnym były praktycznie identyczne, podczas gdy na przekroju poprzecznym obserwowano stopniowe obniżenie mikrotwardości wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania.

Wpływ częstotliwości oscylacji na mikrotwardość wyrobów ze stopu Al 5083

Na rysunku 6.29 przedstawiono zależność mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 od częstotliwości oscylacji matrycy podczas wyciskania metodą KOBO. Analizę przeprowadzono dla stałego współczynnika wyciskania λ=100, natomiast zmiennym parametrem procesu była częstotliwość oscylacji matrycy wynosząca 3, 5 i 7 Hz. Wartości mikrotwardości wyznaczono na podstawie pomiarów wykonanych na przekroju poprzecznym prętów.



Rysunek 6.29 Zależność mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 od częstotliwości oscylacji matrycy podczas wyciskania metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100, wyznaczona na przekroju poprzecznym prętów.

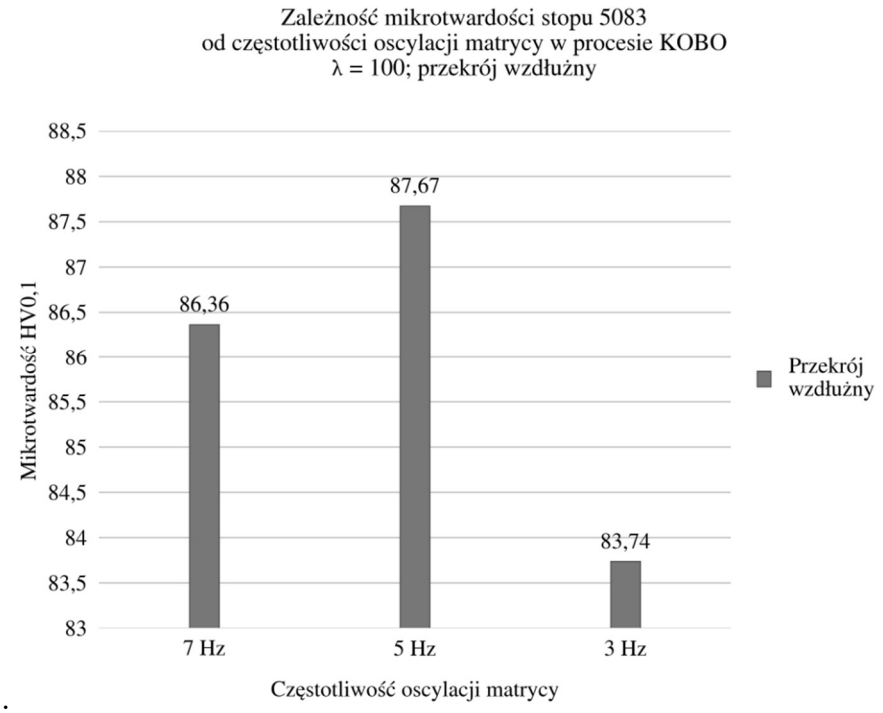
Najwyższą średnią mikrotwardość na przekroju poprzecznym pręta ze stopu Al 5083, wynoszącą 87,15 HV0,1, zarejestrowano przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Przy 5 Hz uzyskano 86,96 HV0,1, natomiast najniższą wartość, równą 85,09 HV0,1, odnotowano przy 3 Hz.

Zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy z 3 do 5 Hz wiązało się ze wzrostem mikrotwardości o 1,87 HV0,1. Dalsze zwiększenie częstotliwości do 7 Hz spowodowało niewielki wzrost o 0,19 HV0,1. Łączna różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi przy 3 i 7 Hz wyniosła 2,06 HV0,1.

Wyniki wskazują, że przy współczynniku wyciskania λ=100 mikrotwardość na przekroju poprzecznym wzrastała wraz ze zwiększaniem częstotliwości oscylacji matrycy. Największą zmianę odnotowano między 3 a 5 Hz, natomiast wartości uzyskane przy 5 i 7 Hz były zbliżone. Interpretację tych zależności w odniesieniu do zmian mikrostrukturalnych przedstawiono w dalszej części pracy.

Na rysunku 6.30 przedstawiono wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na mikrotwardość HV0,1 stopu Al 5083. Pomiary wykonano na przekroju wzdłużnym prętów uzyskanych metodą KOBO przy stałym współczynniku wyciskania λ=100. Analizę przeprowadzono dla trzech różnych częstotliwości 3, 5 oraz 7 Hz.

Najlepsze wyniki odnotowano przy 5 Hz, osiągając mikrotwardość na poziomie 87,67 HV0,1. Zwiększeniu częstotliwości do 7 Hz, towarzyszyło niewielkie obniżenie mikrotwardości. Najniższą mikrotwardość uzyskano przy 3 Hz, gdzie mikrotwardość wyniosła 83,74 HV0,1. W porównaniu z wartością dla 5 Hz jest to spadek o 3,93 HV0,1, a względem 7 Hz o 2,62 HV0,1.



Rysunek 6.30 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na mikrotwardość HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO (λ=100), wyznaczoną na przekroju wzdłużnym prętów.

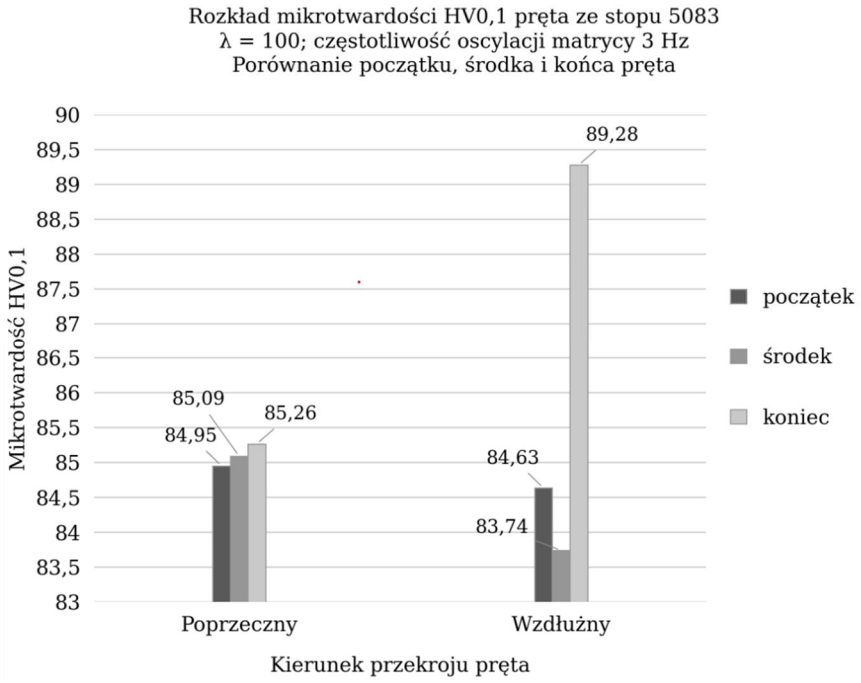
Z zestawienia danych wynika, że podniesienie częstotliwości z 3 Hz do 5 Hz powoduje wzrost mikrotwardości. Dalsze zwiększanie jej do 7 Hz skutkuje lekkim spadkiem parametru, ale wciąż pozostaje on wyższy niż w przypadku 3 Hz. Podsumowując, przy współczynniku wyciskania λ równym 100 najwyższą mikrotwardość uzyskano przy 5 Hz, a najniższą przy 3 Hz. Warto też zauważyć, że różnica między wynikami dla 5 Hz i 7 Hz jest minimalna, co oznacza, że oba te warianty procesu dają bardzo zbliżone rezultaty

Zróżnicowanie mikrotwardości wzdłuż pręta ze stopu Al 5083

Na rysunku 6.31 pokazano rozkład mikrotwardości HV0,1 wyrobów ze stopu Al 5083. Pomiary wykonano na początku, w środku oraz na końcu pręta otrzymanego metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz. Badania przeprowadzono zarówno na przekroju poprzecznym, jak i wzdłużnym pręta.

Na przekroju poprzecznym odnotowano niewielki wzrost średniej mikrotwardości wzdłuż pręta. W części początkowej wyniosła ona 84,95 HV0,1, w środkowej 85,09 HV0,1, natomiast w końcowej 85,26 HV0,1. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 0,31 HV0,1.

Na przekroju wzdłużnym zaobserwowano większe zróżnicowanie mikrotwardości. W części początkowej średnia wartość wyniosła 84,63 HV0,1, a w środkowej zmniejszyła się do 83,74 HV0,1. Najwyższą mikrotwardość, równą 89,28 HV0,1, odnotowano w części końcowej. Różnica pomiędzy wartością najwyższą i najniższą osiągnęła 5,54 HV0,1.



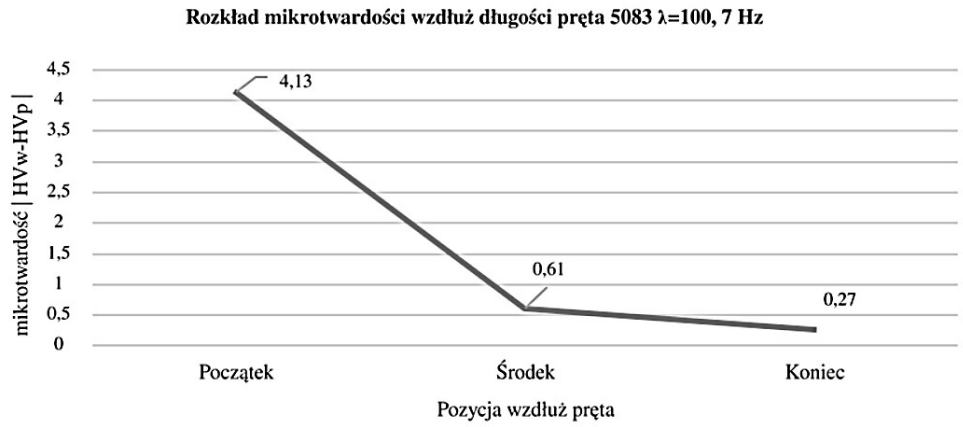
Rysunek 6.31 Rozkład wartości mikrotwardości HV0,1 w początkowej, środkowej i końcowej części pręta ze stopu Al 5083 na przekrojach poprzecznym i wzdłużnym po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz.

Porównanie obu przekrojów wykazało, że w początkowej i środkowej części pręta mikrotwardość na przekroju poprzecznym była wyższa niż na wzdłużnym, odpowiednio o 0,32 HV0,1 i 1,35 HV0,1. W części końcowej zależność była odwrotna - mikrotwardość na przekroju wzdłużnym przewyższała wartość na przekroju poprzecznym o 4,02 HV0,1.

Średnie wartości mikrotwardości mieściły się w zakresie od 83,74 do 89,28 HV0,1. Wyniki wskazują na niewielkie zróżnicowanie mikrotwardości wzdłuż pręta na przekroju poprzecznym oraz wyraźnie większe różnice na przekroju wzdłużnym, związane przede wszystkim z podwyższoną wartością w końcowej części wyrobu.

Badania mikrotwardości wyrobów ze stopu Al 5083

Na rysunku 6.32 przedstawiono zróżnicowanie mikrotwardości wyrobów ze stopu Al 5083 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Stopień zróżnicowania określono jako bezwzględną różnicę pomiędzy wartościami mikrotwardości wyznaczonymi na przekroju poprzecznym i wzdłużnym.



Rysunek 6.32 Bezwzględna różnica wartości mikrotwardości HV0,1 między przekrojem poprzecznym i podłużnym w poszczególnych częściach pręta ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO (λ=100, f=7 Hz)

Największe rozbieżności między przekrojem poprzecznym a wzdłużnym wystąpiły na samym początku pręta, gdzie różnica wyniosła 4,13 HV0,1. W środkowej części pręta różnica ta spadła do 0,61 HV0,1, a na samym końcu osiągnęła jedynie 0,27 HV0,1.

Porównując te wyniki z początkiem pręta, to w części środkowej różnica jest mniejsza o 3,52 HV0,1, czyli o około 85%. Na końcu pręta różnica względem początku wynosi 3,86 HV0,1, co oznacza spadek o około 93%. Z kolei między środkiem a końcem pręta różnica ta zmniejszyła się jeszcze o 0,34 HV0,1, czyli o około 56%.

Przedstawione wyniki wskazują, że największe zróżnicowanie wartości mikrotwardości pomiędzy przekrojem poprzecznym i wzdłużnym występuje na początku pręta. W kolejnych strefach materiału różnice te są znacznie mniejsze. Najniższą wartość różnicy odnotowano na końcu pręta, gdzie wyniosła ona 0,27 HV0,1.

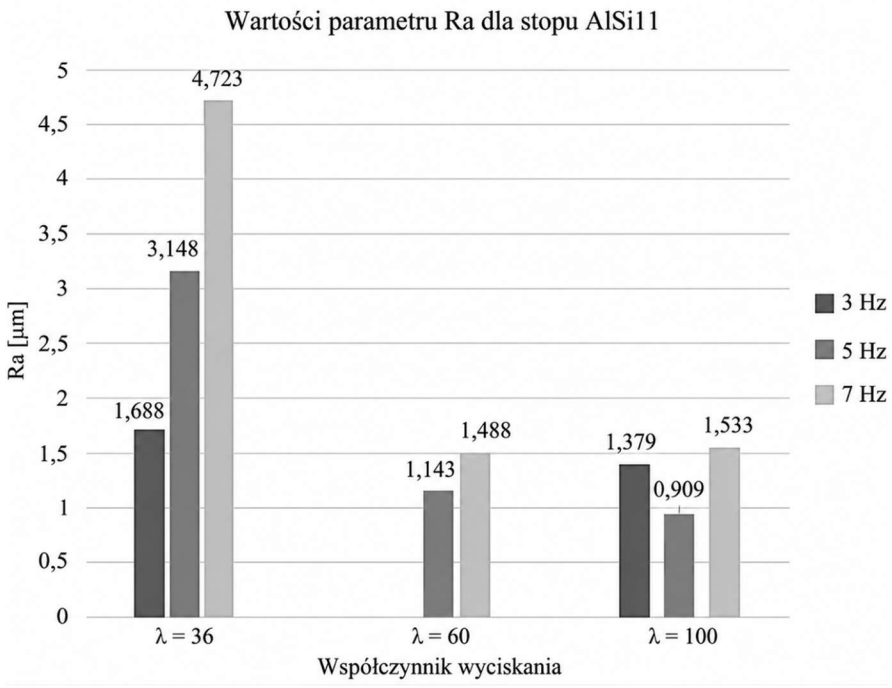
Uzyskane wyniki pokazują, że w analizowanym wariancie procesu zróżnicowanie mikrotwardości pomiędzy kierunkiem poprzecznym i wzdłużnym zmniejsza się wraz z długością pręta. Szczegółowa interpretacja obserwowanych zmian oraz ich związek z przebiegiem procesu wyciskania metodą KOBO została przedstawiona w rozdziale poświęconym analizie mikrostruktury i mechanizmom umocnienia wyrobów ze stopu Al 5083.

6.2. Badania struktury powierzchni wyciskanych profili

Chropowatość powierzchni wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO

Stan powierzchni wyrobów otrzymanych w procesach przeróbki plastycznej stanowi jedno z podstawowych kryteriów oceny jakości technologicznej wyrobów. Parametry chropowatości powierzchni odzwierciedlają warunki prowadzenia procesu, jakość współpracy materiału z narzędziem oraz wpływ zastosowanych parametrów technologicznych na końcową jakość powierzchni. Jednym z najczęściej stosowanych parametrów opisujących stan powierzchni jest średnia arytmetyczna profilu chropowatości Ra.

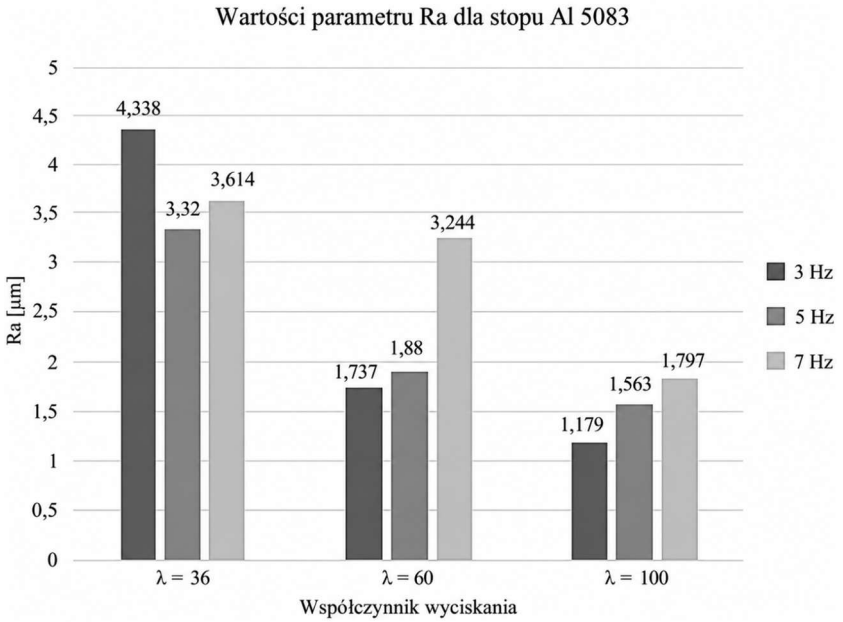
W celu określenia wpływu parametrów procesu KOBO na jakość powierzchni wyznaczono wartości parametru Ra dla wyrobów ze stopu AlSi11 wyciskanego przy współczynnikach wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwościach oscylacji matrycy wynoszących 3, 5 i 7 Hz. Pomiary wykonano dla próbek pobranych z części początkowej, środkowej oraz końcowej prętów. Wartości parametru Ra przedstawiono na rysunku 6.33



Rysunek 6.33 Wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Chropowatość powierzchni wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO

Wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przedstawiono na rysunku 6.34. Wyniki zestawiono dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.



Rysunek 6.34 Wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Przy współczynniku wyciskania λ=36 odnotowano najwyższe wartości chropowatości Ra spośród wszystkich badanych wariantów. Najwyższy, uzyskano przy częstotliwości 3 Hz, gdzie Ra wyniosło 4,338 µm. Gdy zwiększono częstotliwość do 5 Hz, wartość ta spadła do 3,320 µm, a przy 7 Hz wyniosła 3,614 µm.

Kiedy współczynnik wyciskania zwiększono do λ=60, parametry Ra dla częstotliwości 3 Hz i 5 Hz spadły odpowiednio do 1,737 µm oraz 1,880 µm. W przypadku 7 Hz wartość wyniosła 3,244 µm, co okazało się wynikiem wyższym niż przy pozostałych częstotliwościach dla tego samego współczynnika wyciskania.

Najniższe wartości Ra zarejestrowano przy współczynniku wyciskania λ=100. Dla częstotliwości 3 Hz chropowatość wyniosła 1,179 µm, dla 5 Hz było to 1,563 µm, a dla 7 Hz 1,797 µm.

Porównując poszczególne współczynniki wyciskania, widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem λ z 36 do 100, wartości Ra maleją dla każdej analizowanej częstotliwości oscylacji matrycy. Największy spadek zaobserwowano przy 3 Hz, gdzie Ra zmniejszyło się z 4,338 μm do 1,179 μm. Dla częstotliwości 5 Hz i 7 Hz spadki wyniosły odpowiednio z 3,320 μm do 1,563 μm oraz z 3,614 μm do 1,797 μm.

Warto jednak zauważyć, że częstotliwość oscylacji matrycy wpływa na wyniki w różny sposób, zależnie od współczynnika wyciskania. Przy λ=36 najniższe Ra uzyskano przy 5 Hz, ale dla λ=60 i λ=100 najniższe wartości odnotowano już przy 3 Hz. Z kolei najwyższe wartości Ra dla współczynników λ=60 i λ=100 wystąpiły przy częstotliwości 7 Hz.

Podsumowując wszystkie analizy, najniższą chropowatość powierzchni (Ra=1,179 μm) uzyskano przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości 3 Hz, natomiast najwyższą (Ra=4,338 μm) przy λ=36 i tej samej częstotliwości 3 Hz.

6.2.1. Analiza wyników

Przy współczynniku wyciskania λ=36 zauważalny jest wyraźny wzrost chropowatości Ra wraz z podnoszeniem częstotliwości oscylacji matrycy. Gdy częstotliwość wynosiła 3 Hz, wartość Ra oscylowała wokół 1,688 μm, ale po zwiększeniu jej do 5 Hz parametr ten skoczył do 3,148 μm. Najgorsze wyniki odnotowano przy 7 Hz, gdzie chropowatość osiągnęła 4,723 μm. W praktyce oznacza to, że przy tej częstotliwości powierzchnia jest niemal trzykrotnie bardziej chropowata niż przy 3 Hz.

W przypadku współczynnika wyciskania λ=60 uzyskano znacznie niższe wartości parametru Ra. Dla częstotliwości 5 Hz chropowatość powierzchni wyniosła 1,143 μm, natomiast dla 7 Hz zwiększyła się nieznacznie do 1,488 μm. Wartości te są ponad dwukrotnie niższe od uzyskanych dla współczynnika wyciskania λ=36 przy tych samych częstotliwościach oscylacji matrycy.

Najlepszą gładkość powierzchni udało się uzyskać przy współczynniku λ=100. Najniższą wartość Ra odnotowano przy 5 Hz, osiągając zaledwie 0,909 μm. Dla pozostałych częstotliwości (3 Hz i 7 Hz) wyniki wyniosły odpowiednio 1,379 μm oraz 1,533 μm. Z tych danych jasno wynika, że połączenie λ=100 z częstotliwością 5 Hz daje najlepszą jakość powierzchni spośród wszystkich badanych opcji.

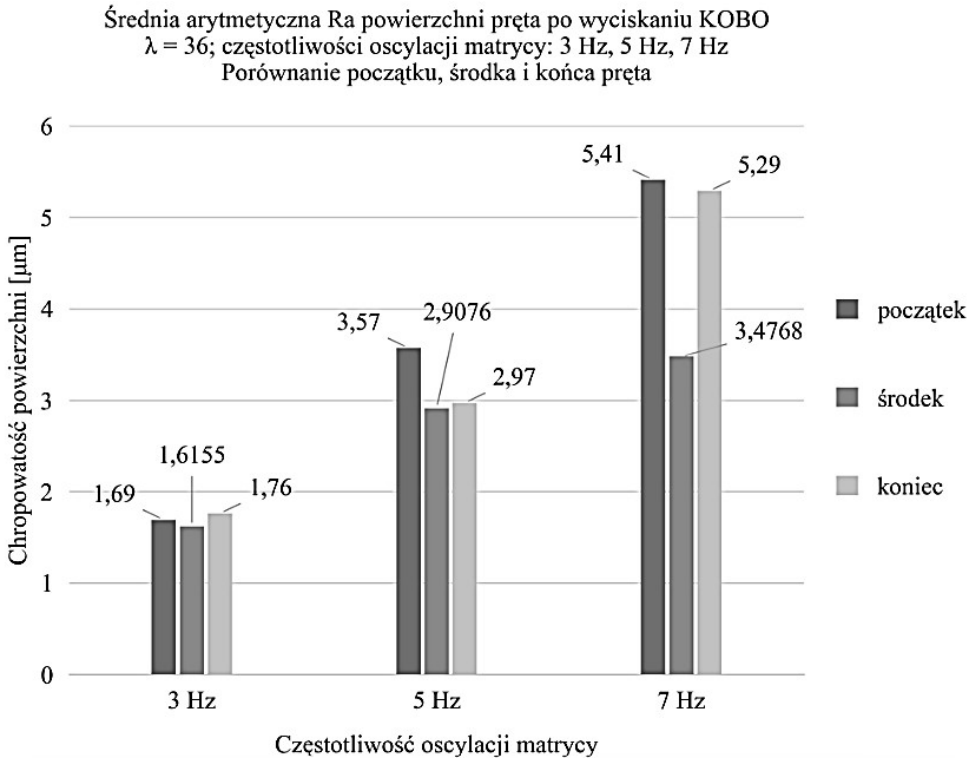
Porównując wszystkie parametry, można stwierdzić, że to współczynnik wyciskania ma większy wpływ na chropowatość Ra niż częstotliwość oscylacji matrycy. Im wyższy współczynnik wyciskania, tym powierzchnia staje się systematycznie gładsza. Sam wpływ częstotliwości zależy jednak od tego, jaki współczynnik wyciskania zostanie przyjęty.

Przy λ=36 wyższa częstotliwość wyraźnie pogarsza jakość powierzchni, natomiast przy λ=100 najlepsze efekty daje właśnie 5 Hz. Pokazuje to, że odpowiednie zestawienie obu tych parametrów pozwala precyzyjnie kontrolować jakość otrzymanej powierzchni.

Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36 przedstawiono na rysunku 6.35. Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że przy najmniejszym analizowanym współczynniku wyciskania wzrost częstotliwości oscylacji matrycy prowadzi do wyraźnego zwiększenia chropowatości powierzchni oraz większego zróżnicowania wartości parametru Ra wzdłuż długości wyciśniętego pręta.

Dla częstotliwości 3 Hz (przy λ=36) uzyskano najniższą chropowatość spośród wszystkich badanych wariantów. Wartości w poszczególnych częściach pręta wynosiły 1,69 μm na początku, 1,61 μm w środku i 1,76 μm na końcu. Różnice między tymi strefami nie przekraczały 0,15 μm.

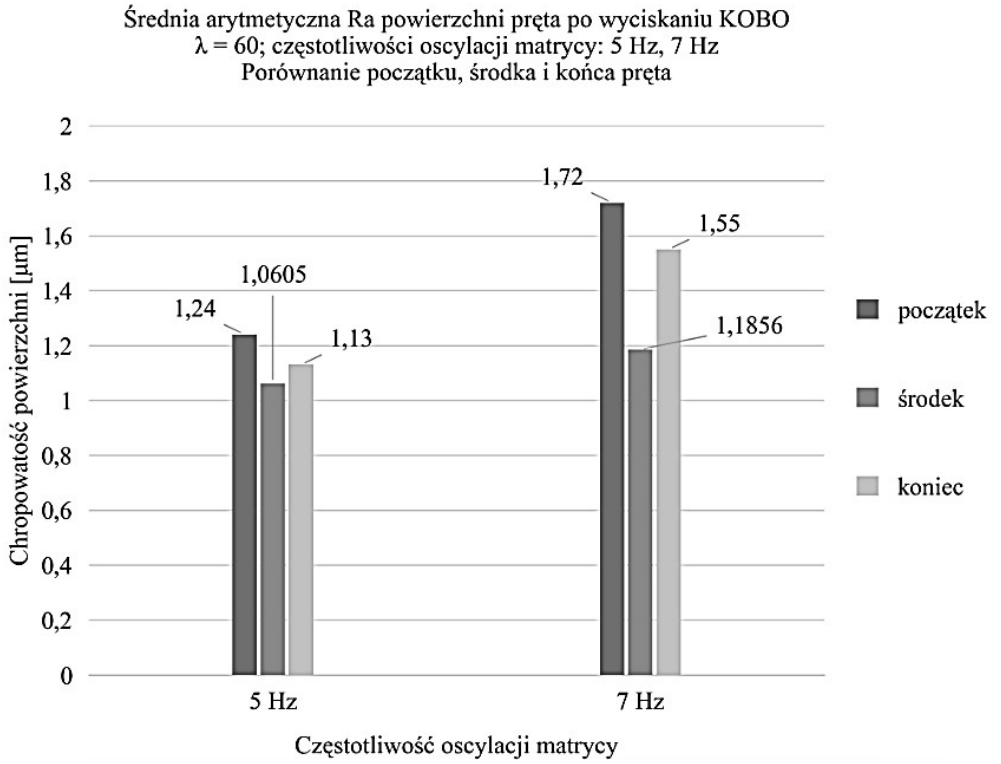
Z kolei podniesienie częstotliwości do 5 Hz spowodowało wyraźne pogorszenie parametrów. Największa chropowatość wystąpiła na początku pręta (Ra=3,57 μm), podczas gdy w części środkowej i końcowej wyniosła odpowiednio 2,89 μm oraz 2,97 μm. Wyniki te jednoznacznie wskazują na spadek jakości powierzchni w porównaniu do wariantu przy 3 Hz.



Rysunek 6.35 Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu AlSi11 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Najwyższe wartości parametru Ra zarejestrowano przy częstotliwości oscylacji wynoszącej 7 Hz. Na początku pręta chropowatość wyniosła 5,41 µm, a na jego końcu 5,29 µm. Najniższy wynik odnotowano natomiast w środkowej części materiału, gdzie Ra spadło do 3,46 µm. W porównaniu do częstotliwości 3 Hz oznacza to ponad trzykrotny wzrost chropowatości. Analiza wszystkich wariantów pokazała, że przy współczynniku wyciskania λ=36 zwiększanie częstotliwości oscylacji matrycy prowadzi do systematycznego wzrostu parametru Ra. Najwyższe wartości występują na końcach pręta, podczas gdy środek ma wyraźnie niższą chropowatość.

Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 przedstawiono na rysunku 6.36. W porównaniu z wariantem λ=36 uzyskano wyraźnie niższe wartości parametru Ra, co świadczy o poprawie jakości powierzchni wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania. Jednocześnie różnice pomiędzy wartościami wyznaczonymi dla początku, środka i końca pręta są niewielkie, co wskazuje na dobrą jednorodność jakości powierzchni na całej długości wyrobu.



Rysunek 6.36 Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu AlSi11 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 5 i 7 Hz.

Przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 5 Hz najniższą chropowatość Ra odnotowano w środku pręta, gdzie wyniosła ona 1,06 µm. Na początku pręta wartość ta osiągnęła 1,24 µm, a na końcu 1,13 µm. Maksymalna różnica między poszczególnymi strefami nie przekroczyła 0,18 µm, co pokazuje, że jakość powierzchni jest bardzo jednorodna.

Zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy do 7 Hz spowodowało wzrost wartości parametru Ra we wszystkich analizowanych strefach pręta. Największą chropowatość powierzchni odnotowano w części początkowej, gdzie wartość Ra wyniosła 1,72 µm. W części środkowej parametr Ra osiągnął wartość 1,19 µm, natomiast w części końcowej 1,55 µm. Otrzymane wyniki wskazują, że wzrost chropowatości jest najbardziej widoczny w początkowej i końcowej części wyrobu.

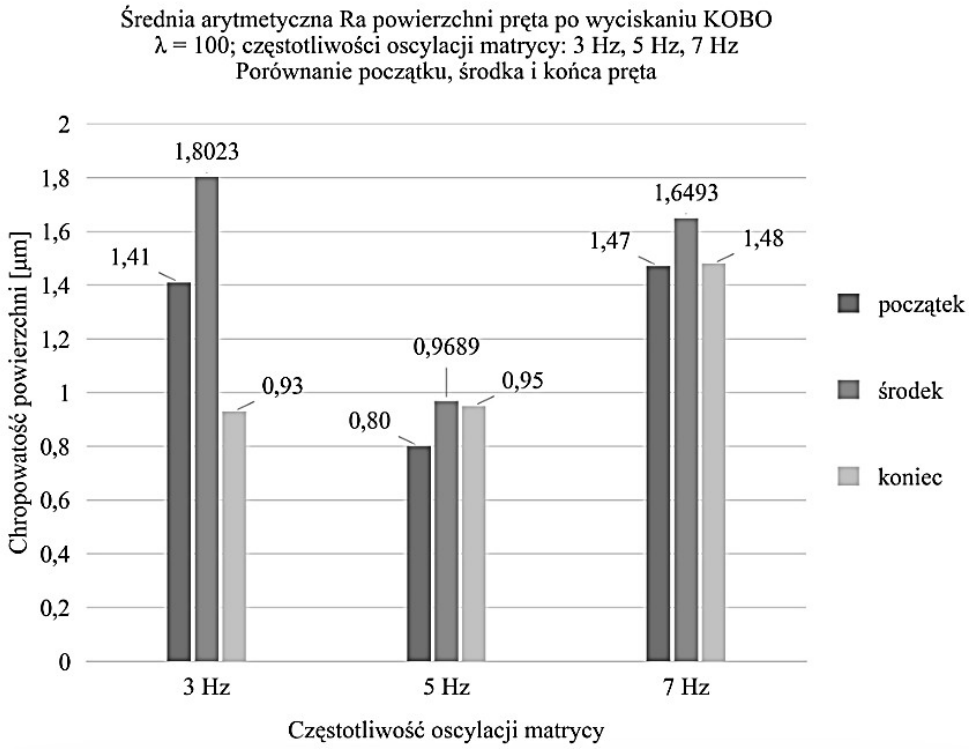
Porównując oba warianty, widać wyraźnie, że częstotliwość 5 Hz pozwala uzyskać niższe wartości Ra i bardziej równomierny rozkład chropowatości wzdłuż całego pręta. Zwiększenie częstotliwości do 7 Hz pogarsza jakość powierzchni, szczególnie na jej końcach. Mimo to, uzyskane parametry Ra są wciąż znacznie niższe niż te, które otrzymano przy współczynniku wyciskania λ=36.

Wyniki wskazują, że zwiększenie współczynnika wyciskania do λ=60 pozytywnie wpływa na jakość powierzchni wyprasek. Najlepsze rezultaty, czyli najniższe Ra i najmniejsze różnice w chropowatości wzdłuż pręta, uzyskano przy częstotliwości 5 Hz. To właśnie ten wariant okazał się najbardziej korzystny.

Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 przedstawiono na rysunku 6.37. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie najwyższego analizowanego współczynnika wyciskania umożliwia uzyskanie powierzchni o bardzo dobrej jakości. Wartość parametru Ra zależy jednak również od częstotliwości oscylacji matrycy. Najniższe wartości chropowatości uzyskano dla częstotliwości 5 Hz, natomiast zarówno zmniejszenie, jak i zwiększenie częstotliwości powodowało wzrost wartości parametru Ra.

Przy częstotliwości 3 Hz wartości Ra najbardziej różniły się od siebie w zależności od części pręta. Na początku chropowatość wyniosła 1,41 μm, natomiast w środku osiągnęła najwyższy poziom 1,80 μm. Najniższy wynik odnotowano na końcu pręta, gdzie Ra wyniosło 0,93 μm. Różnica między wartością maksymalną a minimalną wyniosła prawie 0,9 μm, co oznacza, że przy tej częstotliwości jakość powierzchni była najbardziej nierównomierna.

Z kolei przy 5 Hz uzyskano najniższe wartości Ra spośród wszystkich badanych wariantów. Na początku pręta chropowatość wyniosła 0,80 μm, a w części środkowej i końcowej odpowiednio 0,97 μm oraz 0,95 μm. Różnice między strefami nie przekroczyły 0,17 μm, co potwierdza bardzo dobrą jednorodność powierzchni na całej długości wyrobu.



Rysunek 6.37 Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobu ze stopu AlSi11 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

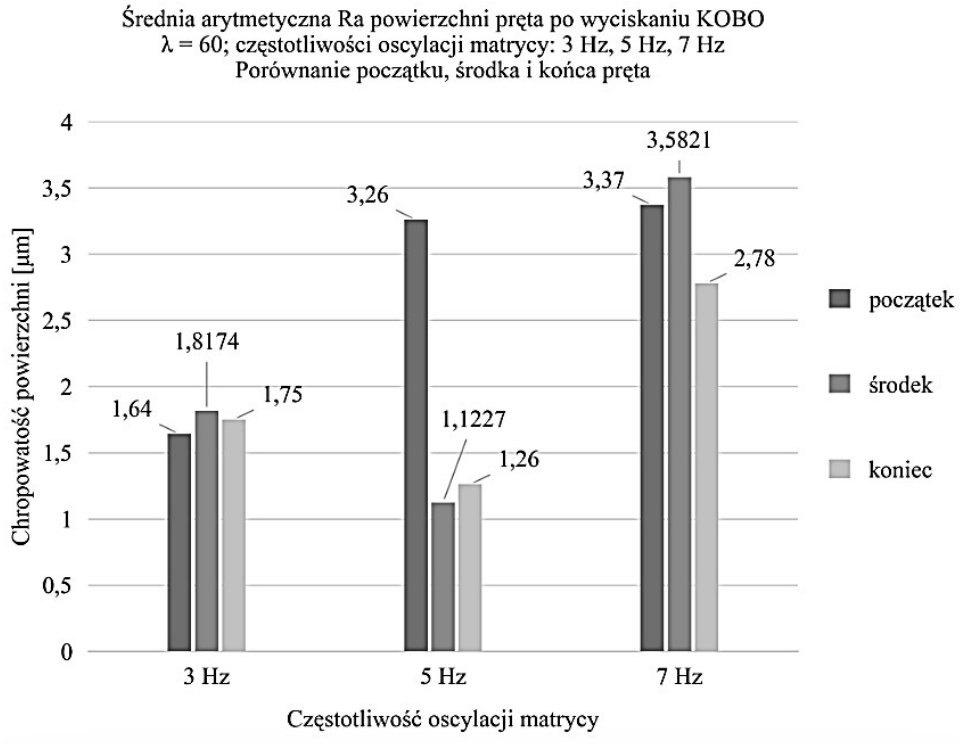
Zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy do 7 Hz spowodowało ponowny wzrost wartości parametru Ra. W części początkowej pręta uzyskano wartość 1,47 µm, w części środkowej 1,65 µm, natomiast w części końcowej 1,48 µm. Chociaż wartości te były wyższe niż uzyskane dla częstotliwości 5 Hz, pozostawały zdecydowanie niższe od największych wartości odnotowanych dla współczynnika wyciskania λ=36.

Porównując wszystkie badane częstotliwości, można zauważyć, że przy współczynniku wyciskania λ=100 najlepszą jakość powierzchni daje oscylacja matrycy na poziomie 5 Hz. W tym przypadku udało się uzyskać nie tylko najniższe wartości Ra, ale też najbardziej równomierny rozkład chropowatości na całej długości pręta. Z kolei zarówno zmniejszenie częstotliwości do 3 Hz, jak i jej podniesienie do 7 Hz skutkowało wzrostem parametru Ra, choć wartości te wciąż były stosunkowo niskie.

Zestawienie wyników dla współczynników λ=36, 60 i 100 pokazuje wyraźnie, że wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania jakość powierzchni ulega poprawie. Najgorsze wyniki zaobserwowano przy λ=36, ale zwiększenie tego parametru do 60 lub 100 pozwoliło znacząco

zmniejszyć chropowatość. Co więcej, dla λ=100 najlepsze rezultaty uzyskano właśnie przy 5 Hz. Te dane pokrywają się z wcześniejszą analizą właściwości mechanicznych i potwierdzają, że odpowiednio dobrane parametry procesu KOBO pozwalają jednocześnie uzyskać wysoką wytrzymałość i dobrą jakość powierzchni.

Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 przedstawiono na rysunku 6.38. Na wykresie zestawiono wartości parametru Ra dla próbek pobranych z początku, środkowej oraz końcowej części pręta przy częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.



Rysunek 6.38 Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu Al 5083 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Przy częstotliwości 3 Hz wartości parametru Ra były do siebie zbliżone na całej długości pręta. Na samym początku chropowatość wyniosła 1,64 µm, w środku 1,80 µm, a na końcu 1,75 µm. Największa różnica między tymi strefami wyniosła zaledwie 0,16 µm.

Przy częstotliwości 5 Hz najwyższą wartość parametru Ra odnotowano na początku pręta (3,26 μm). W środkowej części pręta wartość wyniosła 1,11 μm, natomiast na końcu 1,26 μm. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością osiągnęła 2,15 μm.

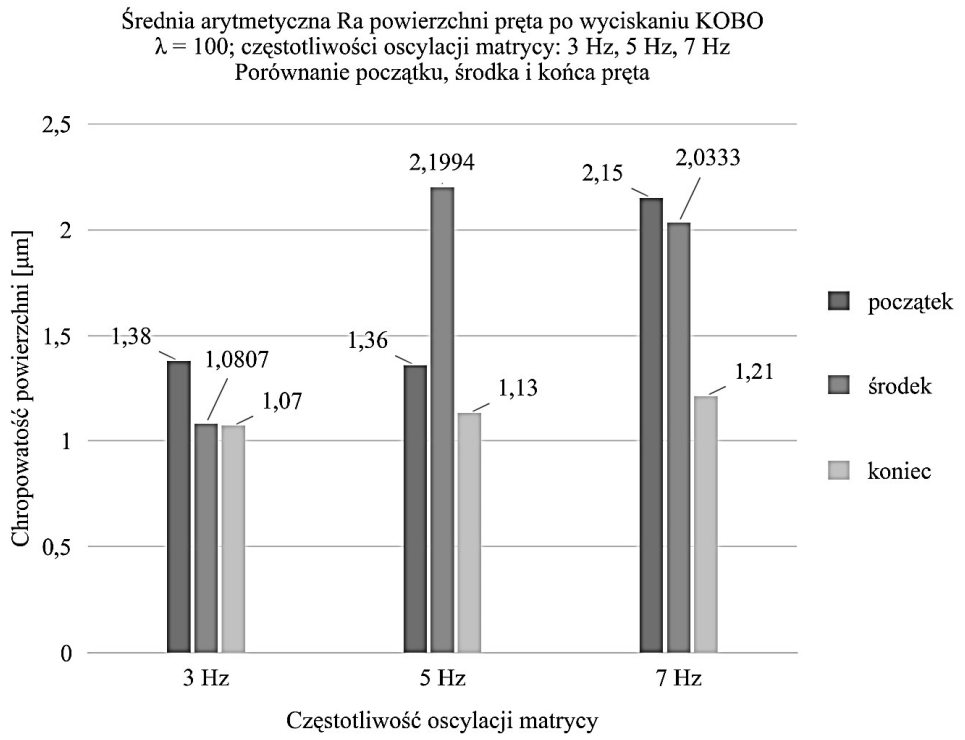
Jeśli chodzi o częstotliwość 7 Hz, to najwyższą chropowatość (3,58 μm) zaobserwowano w środkowej części pręta. Na początku wartość ta wynosiła 3,37 μm, natomiast na końcu spadła do 2,78 μm. Maksymalna różnica między badanymi strefami wyniosła tutaj 0,80 μm.

Porównując te wyniki, można zauważyć, że najniższe wartości Ra na całej długości pręta uzyskano przy 3 Hz. Przy 5 Hz największa chropowatość występowała na początku, a wartości w środku i na końcu pręta były do siebie podobne. Z kolei przy 7 Hz najwyższy parametr Ra odnotowano w środku, a najniższy na samym końcu.

Podsumowując, najmniejsze zróżnicowanie chropowatości wzdłuż pręta wystąpiło przy 3 Hz, a największe przy 5 Hz. W przypadku 7 Hz wartości Ra były wyższe niż przy 3 Hz, ale różnice między poszczególnymi strefami nie były aż tak duże jak przy 5 Hz. Wszystko to pokazuje, że dla współczynnika wyciskania $\lambda=60$ zarówno sama wartość Ra, jak i to, jak rozkłada się ona wzdłuż pręta, zależą od częstotliwości oscylacji matrycy.

Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania $\lambda=100$ przedstawiono na rysunku 6.39. Na wykresie zestawiono wartości parametru Ra dla próbek pobranych z początku, środkowej oraz końcowej części pręta przy częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Przy 3 Hz wartości Ra na całej długości pręta były do siebie bliskie. Na początku chropowatość wyniosła 1,38 μm, w środkowej części 1,0807 μm, a na końcu 1,07 μm. Maksymalna różnica między analizowanymi strefami wyniosła w tym przypadku 0,31 μm.



Rysunek 6.39 Rozkład wartości parametru chropowatości powierzchni Ra wyrobów ze stopu Al 5083 wzdłuż długości pręta po wyciskaniu metodą KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz.

Przy częstotliwości 5 Hz najwyższą chropowatość Ra zmierzono w środkowej części pręta, gdzie wyniosła ona 2,1994 µm. Na początku pręta wartość ta była niższa i wynosiła 1,36 µm, a na samym końcu 1,13 µm. Różnica między skrajnymi pomiarami wyniosła zatem 1,07 µm.

Dla częstotliwości 7 Hz najwyższą wartość parametru Ra uzyskano na początku pręta (2,15 µm), natomiast w środkowej części wyniosła ona 2,0333 µm. Najniższą wartość odnotowano na końcu pręta (1,21 µm). Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wyniosła 0,94 µm.

Porównanie wyników uzyskanych dla poszczególnych częstotliwości wskazuje, że najniższe wartości parametru Ra oraz najmniejsze zróżnicowanie chropowatości wzdłuż długości pręta uzyskano dla częstotliwości 3 Hz. Zwiększenie częstotliwości do 5 Hz i 7 Hz wiązało się ze wzrostem wartości parametru Ra, przy czym najwyższą wartość (2,1994 µm) odnotowano dla próbki pobranej ze środkowej części pręta przy częstotliwości 5 Hz.

Porównując wyniki dla różnych współczynników wyciskania (λ=36, 60 i 100), widać wyraźną zależność im większy współczynnik wyciskania, tym niższa chropowatość Ra. Najlepsze rezultaty, czyli najniższe wartości chropowatości, osiągnięto przy λ=100. Warto jednak pamiętać, że wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na Ra zależy od tego, skąd pobrano próbkę. Niezależnie od częstotliwości, w przynajmniej jednej części pręta chropowatość spadała do około 1,1 μm, a najwyższe wartości nigdy nie przekroczyły 2,20 μm.

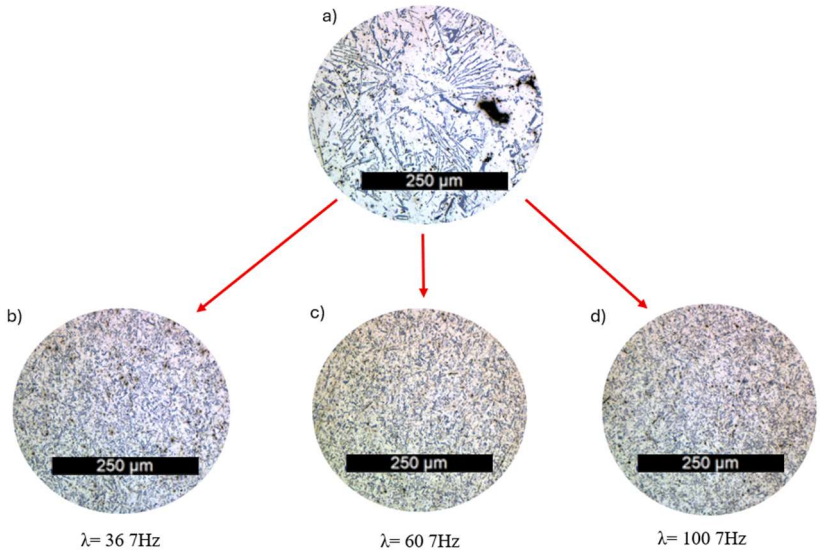
Zestawienie wszystkich wyników wskazuje, że najniższą wartość parametru Ra (1,07 μm) uzyskano dla próbki pobranej z końcowej części pręta wyciskanego przy λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz, natomiast najwyższą wartość (4,338 μm) odnotowano dla współczynnika wyciskania λ=36 i częstotliwości 3 Hz. Obserwowane wyniki wskazują na wyraźne zmniejszenie wartości parametru Ra wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania dla wszystkich analizowanych częstotliwości oscylacji matrycy.

6.3. Badania mikrostruktury wyciskanych stopów aluminium AlSi11 oraz Al 5083

Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11- wpływ częstotliwości oscylacji matrycy

Analizę mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO przeprowadzono na przekrojach wzdłużnych próbek pobranych ze środkowej części prętów. Dzięki temu udało się ocenić materiał w obszarze, gdzie przebieg procesu był już w pełni ustabilizowany. Badania wykonano przy stałym współczynniku wyciskania λ=100 oraz trzech różnych częstotliwościach oscylacji matrycy 3, 5 i 7 Hz. Przyjęty zakres parametrów pozwolił sprawdzić, jak częstotliwość oscylacji wpływa na zmiany zachodzące w mikrostrukturze podczas procesu KOBO.

W porównaniu ze stanem wyjściowym mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO ulega wyraźnej przebudowie. Charakterystyczna dla materiału odlewanego gruboziarnista i niejednorodna struktura zostaje zastąpiona przez strukturę o bardziej rozdrobnionym i równomiernym rozmieszczeniu składników. Szczególnie widoczna jest zmiana morfologii eutektyki oraz cząstek krzemu, które po procesie wyciskania wykazują większy stopień fragmentacji i bardziej jednorodny rozkład w osnowie aluminiowej.

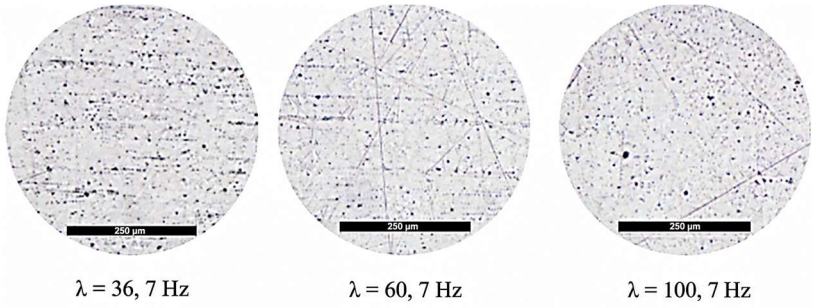


Rysunek 6.40 Zmiany mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 w funkcji współczynnika wyciskania λ podczas procesu KOBO f=7 Hz, współczynnik wyciskania λ=36, λ=60 oraz λ=100.

We wszystkich analizowanych wariantach mikrostruktura składa się z osnowy α-Al oraz cząstek krzemu eutektycznego i faz międzymetalicznych. Zmiany pomiędzy poszczególnymi wariantami dotyczą przede wszystkim stopnia rozdrobnienia składników strukturalnych oraz ich rozmieszczenia, które zależą od zastosowanej częstotliwości oscylacji matrycy.

Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083

Analiza mikrostruktury stanowi istotny element oceny wpływu procesu wyciskania metodą KOBO na właściwości stopów aluminium. Obserwacje metalograficzne umożliwiają ocenę zmian zachodzących w strukturze materiału po odkształceniu plastycznym oraz ich odniesienie do wyników badań właściwości mechanicznych, takich jak mikrotwardość czy wytrzymałość na rozciąganie.



Rysunek 6.41 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy $f = 7$Hz i współczynniku wyciskania a) $\lambda = 36$, b) $\lambda = 60$, c) $\lambda = 100$, przekrój poprzeczny, środkowa część pręta.

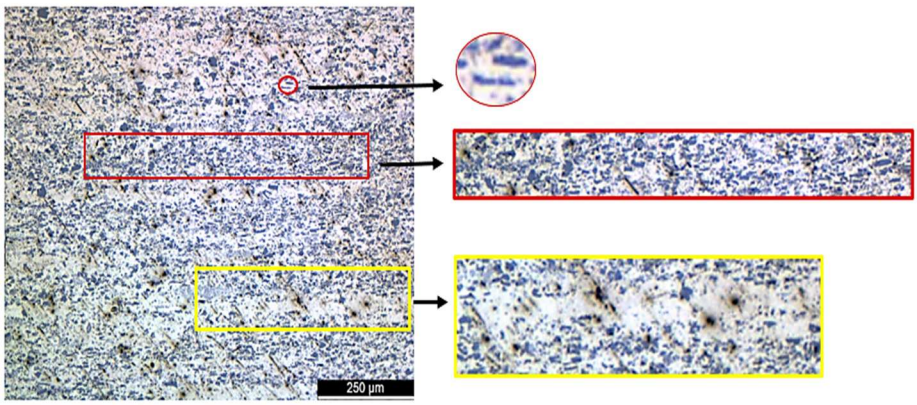
Na zdjęciach mikrostruktury wyrobów ze stopu aluminium Al 5083 obserwuje się liczne drobne cząstki faz międzymetalicznych, które są rozproszone w osnowie aluminiowej. Przy najniższym współczynniku wyciskania, czyli λ=36, ich rozkład wykazuje lokalne niejednorodności, bo miejscami można dostrzec skupiska cząstek. Jednak, gdy zwiększa się współczynnik wyciskania do λ=60 i λ=100, struktura staje się znacznie bardziej jednorodna, a fazy wtórne rozkładają się równomiernie na całym badanym obszarze. Najlepiej widać to przy λ=100, gdzie lokalne zagęszczenia cząstek pojawiają się już bardzo rzadko.

Te zmiany pokazują, że wyższy współczynnik wyciskania mocniej odkształca materiał, co pomaga rozdrabniać i lepiej rozprowadzić cząstki faz międzymetalicznych w stopie. Dzięki temu, że w procesie KOBO matryca porusza się oscylacyjnie, kierunek odkształcenia ciągle się zmienia. To sprawia, że materiał jest intensywnie przebudowywany nawet w środkowej części pręta, co pozwala wyeliminować lokalne niejednorodności. Współczynnik wyciskania pozytywnie wpływa na jednorodność mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083. Warto też zaznaczyć, że widoczne na zdjęciach długie i cienkie linie to tylko ślady powstałe przy przygotowywaniu zgładów metalograficznych, a nie rzeczywiste elementy struktury samego stopu.

6.3.1. Analiza wyników

Dla częstotliwości f=3 Hz (Rysunek 6.42) mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 wciąż wykazuje cechy materiału, którego struktura nie została jeszcze w pełni przebudowana. Można zauważyć lokalne obszary, gdzie cząstki krzemu są bardziej skoncentrowane i rozmieszczone w sposób niejednorodny. Same cząstki krzemu są częściowo wydłużone i miejscami ustawione zgodnie z kierunkiem przepływu materiału podczas wyciskania. Co więcej, ich rozdrobnienie jest mniejsze niż w przypadku próbek, które były wyciskane przy wyższych częstotliwościach oscylacji matrycy.

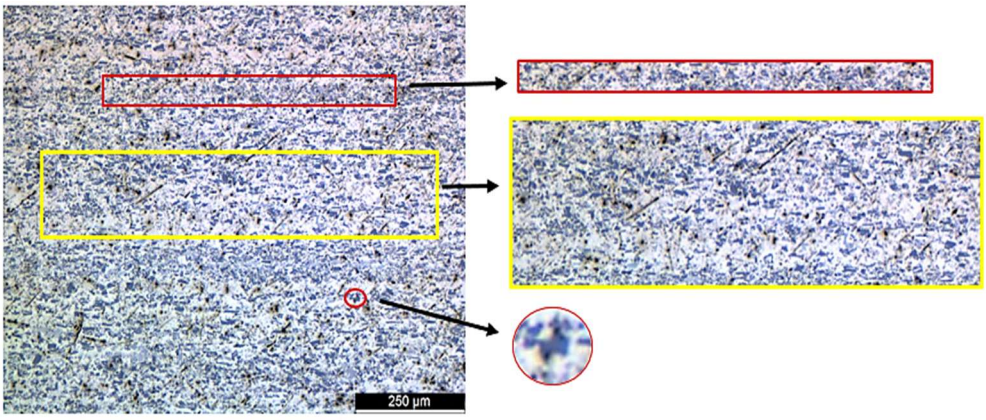
Osnowa α-Al nie jest jednolita, a w badanym obszarze wciąż widać miejsca o różnej morfologii składników strukturalnych. Choć w porównaniu ze stanem wyjściowym mikrostruktura uległa wyraźnej przebudowie, to stopień jej ujednorodnienia jest wciąż mniejszy niż w wariantach procesu przy częstotliwościach 5 i 7 Hz.



Rysunek 6.42 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój wzdłużny, część środkowa pręta, λ=100, f=3 Hz.

Zwiększenie częstotliwości oscylacji do f=5 Hz (Rysunek 6.43) prowadzi do wyraźnych zmian w obrazie mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11. W porównaniu z próbką wyciskaną przy częstotliwości 3 Hz obserwuje się większy stopień rozdrobnienia cząstek krzemu oraz ich bardziej równomierne rozmieszczenie w osnowie aluminiowej. Struktura staje się bardziej jednorodna, a obszary o podwyższonej koncentracji składników fazowych są mniej wyraźne.

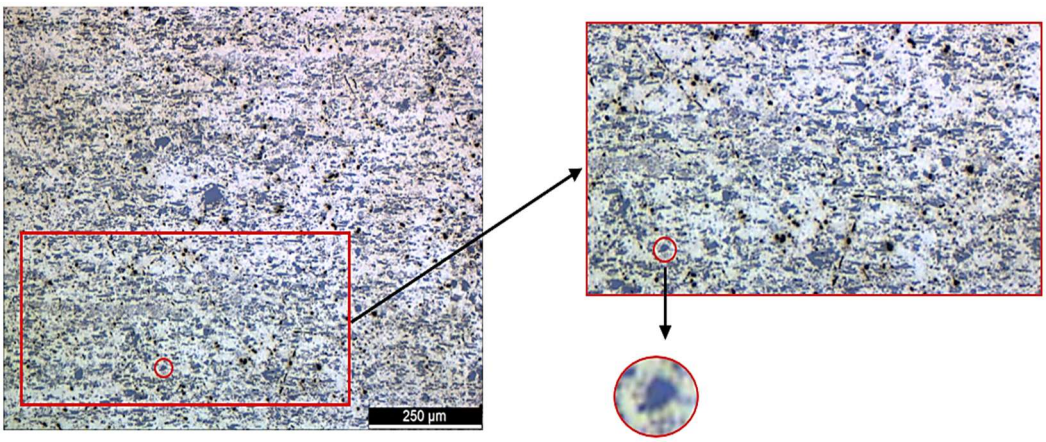
Widać też, że składniki mikrostruktury rozkładają się po całym badanym obszarze znacznie lepiej, co sugeruje, że przy tej częstotliwości proces wyciskania przebiega korzystniej. W porównaniu do wariantu 3 Hz, lokalne niejednorodności struktury maleją, a cząstki krzemu układają się w bardziej regularny sposób w osnowie α-Al.



Rysunek 6.43 Mikrostruktura wyrobów ze stopu aluminium AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój wzdłużny, część środkowa pręta, λ=100, f=5 Hz.

Zaobserwowane zmiany pokazują, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy pozytywnie wpływa na przebudowę mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO, co pozwala uzyskać bardziej jednorodny materiał.

Najbardziej zaawansowaną przebudowę mikrostruktury obserwuje się dla f=7 Hz (Rysunek 6.44). To właśnie w tym przypadku mikrostruktura jest najbardziej jednorodna spośród wszystkich badanych wariantów. Cząstki krzemu występują tu głównie jako drobne, równomiernie rozłożone wydzielenia w osnowie α-Al, a lokalne skupiska faz wtórnych są znacznie mniej widoczne niż w próbkach wyciskanych przy niższych częstotliwościach. W porównaniu do wariantów f=3 Hz oraz f=5 Hz, tutaj składniki strukturalne są rozłożone bardziej równomiernie, a cząstki krzemu są wyraźnie drobniejsze. Tak wysoki stopień ujednorodnienia potwierdza, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy ma korzystny wpływ na przebieg wyciskania metodą KOBO.



Rysunek 6.44 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój wzdłużny, część środkowa pręta, λ=100, f=7 Hz.

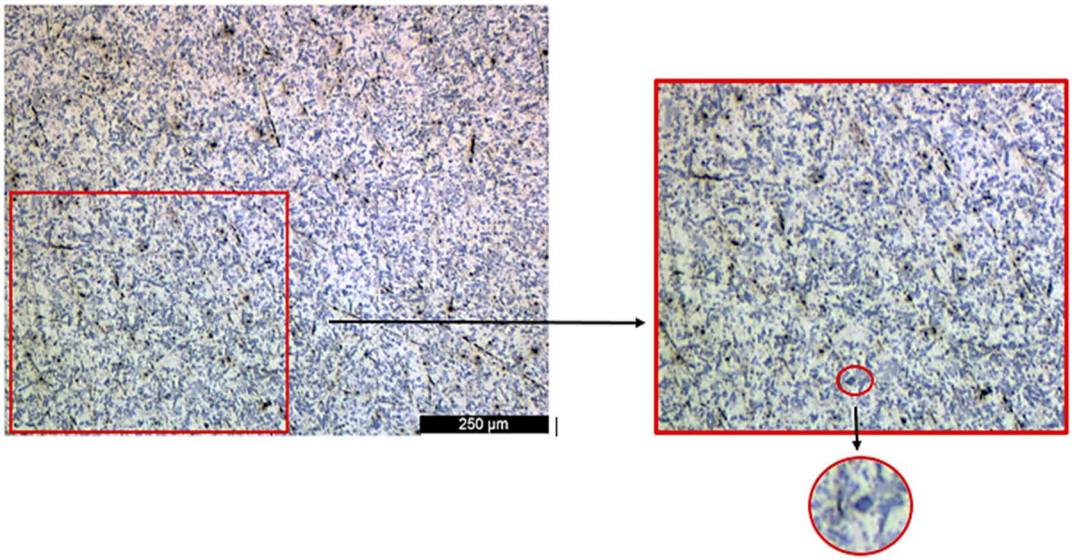
Porównując mikrostruktury uzyskane przy częstotliwościach 3, 5 i 7 Hz (przy stałym współczynniku wyciskania λ=100), można zauważyć, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy stopniowo zmienia strukturę wyrobów ze stopu AlSi11. Im wyższa częstotliwość, tym lepiej rozdrobnione są cząstki krzemu, które są rozmieszczone w osnowie bardziej równomiernie, co ogranicza powstawanie lokalnych niejednorodności.

Z wyników jasno wynika, że częstotliwość 7 Hz pozwala uzyskać najbardziej jednorodną mikrostrukturę spośród wszystkich badanych wariantów. Te obserwacje pokrywają się z wcześniejszymi badaniami właściwości mechanicznych i mikrotwardości, gdzie również

wykazano, że wyższa częstotliwość oscylacji matrycy pozytywnie wpływa na właściwości wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO.

Analizę mikrostruktury przeprowadzono na przekrojach poprzecznych próbek pobranych ze środkowej części pręta. Dzięki temu udało się ocenić strukturę materiału w miejscu, gdzie przebieg procesu jest już w pełni ustabilizowany. Badania wykonano dla stałego współczynnika wyciskania λ= 100 i trzech różnych częstotliwości oscylacji matrycy 3, 5 oraz 7 Hz, aby sprawdzić, jak ten parametr wpływa na przebudowę mikrostruktury. Przy częstotliwości 3 Hz (Rysunek 6.45) struktura wyrobów ze stopu AlSi11 wciąż wykazuje pewne zróżnicowanie.

Widać tam lokalne miejsca, gdzie cząstki krzemu są bardziej skoncentrowane, oraz fragmenty, w których składniki mikrostruktury zachowały swój kierunkowy układ. Cząstki krzemu występują zarówno jako drobne wydzielenia, jak i większe, częściowo wydłużone fragmenty. Świadczy to o tym, że przy tej częstotliwości cząstki krzemu wykazywały mniejszy stopień rozdrobnienia, jak w przypadku próbek wyciskanych przy wyższych wartościach oscylacji matrycy.



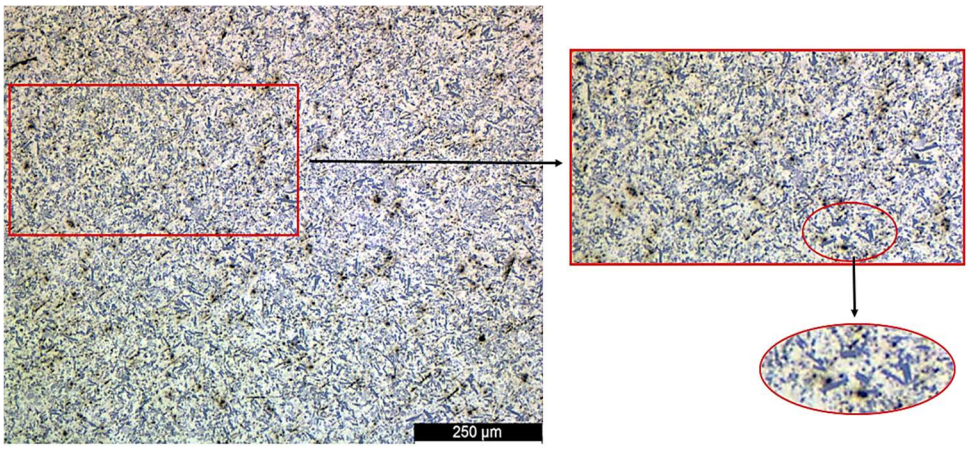
Rysunek 6.45 Mikrostruktura wyrobów ze stopu aluminium AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój poprzeczny, część środkowa pręta, λ=100, f=3 Hz.

Podstawą struktury jest faza α-Al, w której znajdują się cząstki krzemu oraz fazy międzymetaliczne. Choć ich rozkład jest teraz bardziej równomierny niż w materiale wyjściowym, to wciąż można zauważyć lokalne różnice w koncentracji poszczególnych

składników. Zestawiając to z wariantami procesu przy częstotliwościach 5 Hz i 7 Hz, widać, że stopień ujednorodnienia mikrostruktury jest nieco mniejszy.

Gdy zwiększy się częstotliwość oscylacji matrycy do 5 Hz, obraz mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 wyraźnie się zmienia, co widać na rysunku 6.46. W porównaniu do próbki wyciskanej przy 3 Hz, cząstki krzemu są znacznie drobniejsze i lepiej rozłożone w osnowie α-Al.

Struktura traci swój pasmowy charakter, a lokalne różnice w rozmieszczeniu składników stają się mniej widoczne. Cała mikrostruktura staje się bardziej jednorodna, a cząstki krzemu i fazy międzymetaliczne tworzą drobniejszą dyspersję.

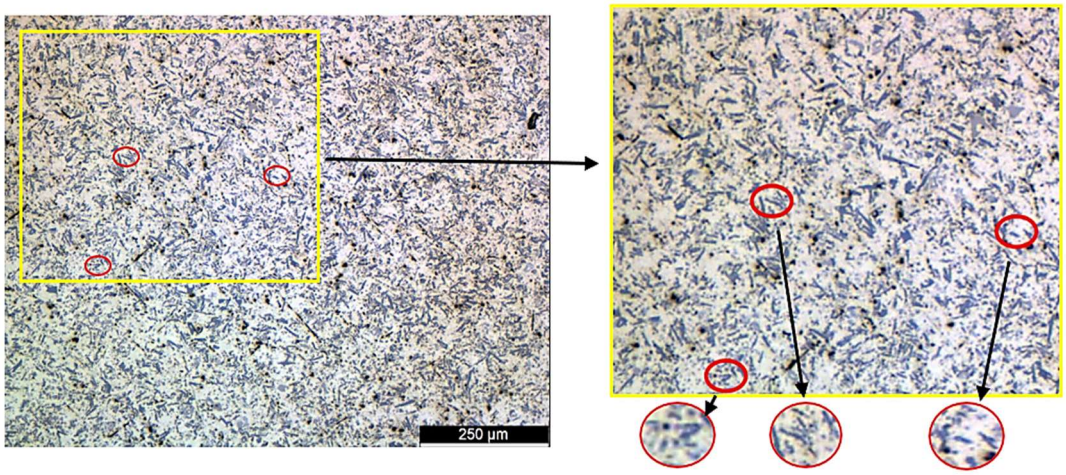


Rysunek 6.46 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy f=5 Hz (przekrój poprzeczny, obszar środkowy).

Zaobserwowane zmiany wskazują, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy sprzyja uzyskaniu bardziej jednorodnej mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11. W porównaniu z wariantem f=3 Hz zmniejsza się zróżnicowanie rozmieszczenia składników strukturalnych, a rozdrobnienie faz wtórnych jest bardziej wyraźne.

Dla najwyższej analizowanej częstotliwości oscylacji matrycy f=7 Hz mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 charakteryzuje się najwyższym stopniem jednorodności spośród analizowanych wariantów procesu (Rysunek 6.47). Cząstki krzemu występują głównie w postaci drobnych, krótkich, izometrycznych lub nieznacznie wydłużonych wydzieleń, równomiernie rozmieszczonych w osnowie α-Al.

W obrazie mikrostruktury nie obserwuje się wyraźnych obszarów pasmowania ani lokalnych skupisk faz wtórnych. W porównaniu z próbkami wyciskanymi przy częstotliwościach 3 Hz i 5 Hz widoczny jest większy stopień rozdrobnienia cząstek krzemu oraz bardziej jednorodny rozkład składników strukturalnych w całej analizowanej powierzchni przekroju.



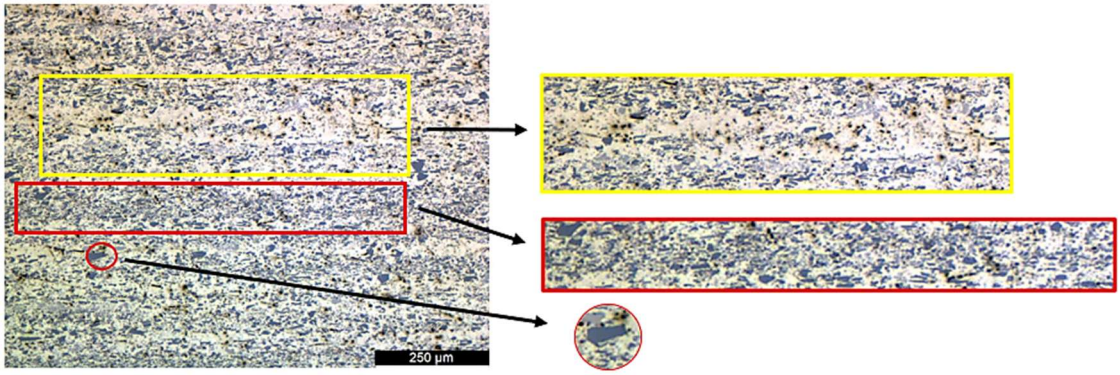
Rysunek 6.47 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO (λ=100, f=7 Hz), przekrój poprzeczny- próbka pobrana ze środkowej części pręta.

Zdjęcie mikrostruktury pokazuje, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy do 7 Hz pozwala uzyskać najbardziej jednorodną strukturę spośród wszystkich badanych wariantów. Mniejsza liczba lokalnych niejednorodności i bardziej równomierne rozmieszczenie cząstek fazy wtórnej kolorują z wynikami badań właściwości mechanicznych oraz mikrotwardości, gdzie również zaobserwowano pozytywny wpływ wyższej częstotliwości oscylacji.

Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11- Wpływ współczynnika wyciskania λ

Mikrostrukturę wyrobów ze stopu AlSi11 przeanalizowano na przekrojach wzdłużnych próbek pobranych ze środka pręta. Proces wyciskania odbył się metodą KOBO przy stałej częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 7 Hz i trzech różnych współczynnikach wyciskania λ=36, 60 oraz 100. Dzięki tak dobranym parametrom udało się ocenić, jak współczynnik wyciskania wpływa na zmiany zachodzące w mikrostrukturze.

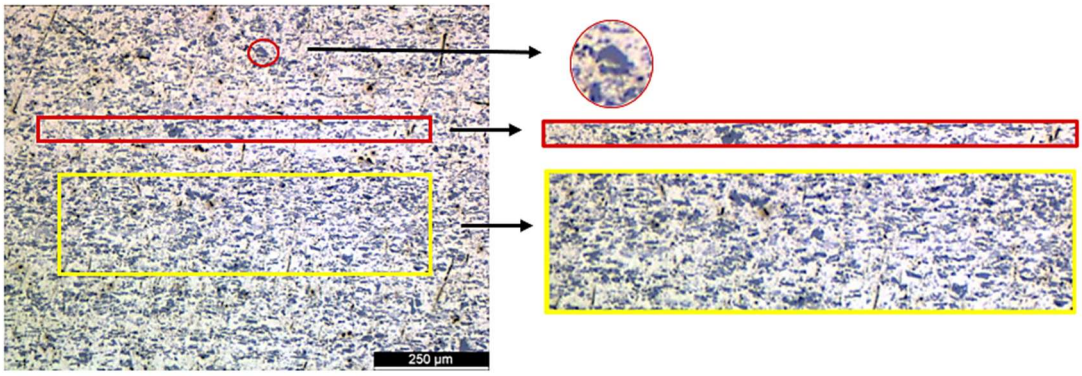
Przy najniższym współczynniku, czyli λ=36, w strukturze wyrobów ze stopu AlSi11 wciąż widać wyraźne zróżnicowanie. Można zaobserwować lokalne miejsca, gdzie cząstki krzemu są bardziej skoncentrowane, a składniki mikrostruktury zachowują częściowo pasmowe ułożenie. Krzem występuje tu zarówno w formie większych, nieregularnych wydzieleń, jak i częściowo wydłużonych fragmentów. To pokazuje, że przy tym współczynniku wyciskania stopień rozdrobnienia cząstek krzemu był mniejszy niż w próbkach wyciskanych przy wyższych wartościach λ (Rysunek 6.48).



Rysunek 6.48 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój wzdłużny, środkowa część pręta, λ=36, f=7 Hz.

Mimo że mikrostruktura nie zmieniła się drastycznie względem materiału wyjściowego, w analizowanym wariancie wciąż widać lokalne niejednorodności w rozmieszczeniu faz wtórnych. Jeśli zestawimy go z wariantami o λ=60 i λ=100, zauważyć można, że struktura jest mniej jednorodna, a morfologia cząstek krzemu wykazuje większe zróżnicowanie.

Zwiększenie współczynnika wyciskania do λ=60 prowadzi do wyraźnych zmian w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11 (Rysunek 6.49). W porównaniu do próbki wyciskanej przy λ=36, pasmowy charakter mikrostruktury staje się mniej wyraźny, a cząstki krzemu są znacznie drobniejsze. Fazy wtórne rozkładają się też bardziej równomiernie w osnowie α-Al, a miejsca, w których cząstki występują w większym zagęszczeniu, pojawiają się znacznie rzadziej.



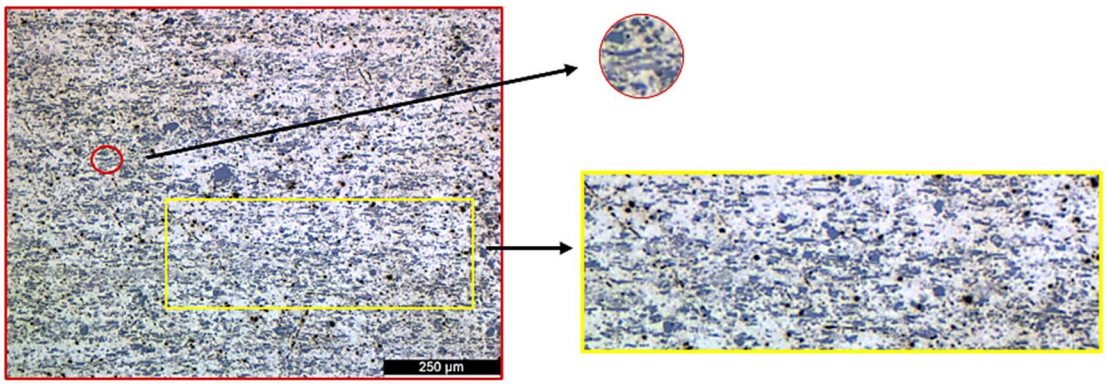
Rysunek 6.49 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=60, f=7Hz (przekrój wzdłużny, próbka pobrana ze środkowej części pręta).

Można też zauważyć, że morfologia cząstek krzemu staje się mniej zróżnicowana, ponieważ częściej występują one w formie drobnych wydzieleń. Mikrostruktura staje się przez to bardziej jednorodna, choć wciąż można znaleźć lokalne miejsca, gdzie składniki fazowe są nieco bardziej skoncentrowane.

Z uzyskanych obrazów wynika, że zwiększenie współczynnika wyciskania do λ=60 pomaga w bardziej równomiernym rozłożeniu składników strukturalnych i sprawia, że cząstki krzemu są drobniejsze niż w przypadku wariantu λ=36.

Najbardziej zaawansowaną przebudowę mikrostruktury obserwuje się dla najwyższego współczynnika wyciskania λ=100 (Rysunek 6.50) To właśnie ten wariant charakteryzuje się największą jednorodnością spośród wszystkich badanych. Cząstki krzemu to tutaj głównie drobne, równomiernie rozproszone wydzielenia w osnowie α-Al, a skupiska faz wtórnych są znacznie mniej widoczne niż w próbkach o niższym współczynniku wyciskania.

W porównaniu z wariantami λ=36 oraz λ=60, przy λ=100 cząstki krzemu są wyraźnie bardziej rozdrobnione, a składniki strukturalne rozkładają się równomiernie na całym badanym obszarze. Co ważne, nie widać już wyraźnego pasmowego charakteru mikrostruktury, który był dość widoczny przy mniejszych współczynnikach wyciskania.



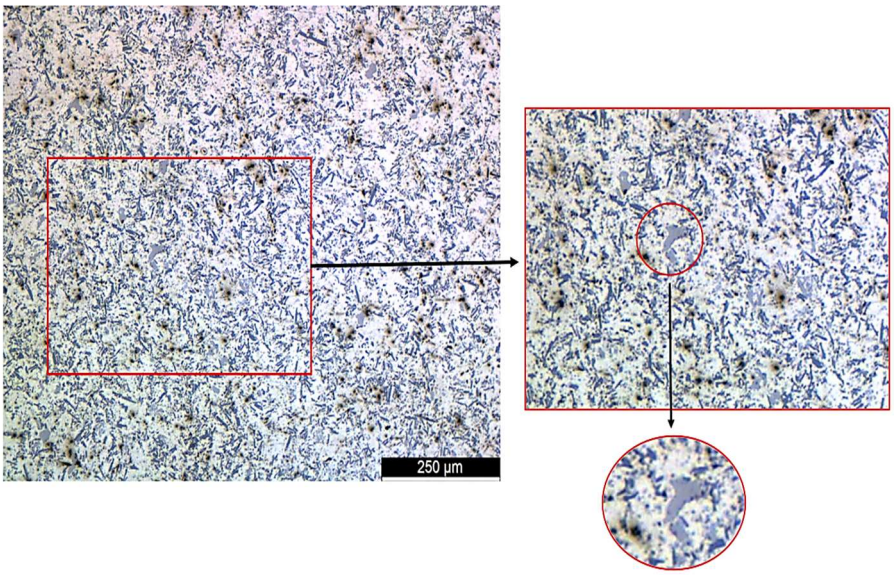
Rysunek 6.50 Mikrostruktura wyrobów ze stopu aluminium AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój wzdłużny, część środkowa pręta, λ=100, f=7Hz.

Porównując mikrostruktury uzyskane przy różnych współczynnikach wyciskania (przy stałej częstotliwości oscylacji matrycy f=7 Hz), można zauważyć, że zwiększenie współczynnika λ powoduje stopniową przebudowę struktury stopu AlSi11. Im wyższa wartość λ, tym mniej pasmowa staje się mikrostruktura, a cząstki krzemu stają się mniejsze i bardziej równomiernie rozłożone w osnowie aluminiowej.

Z przeprowadzonych badań wynika, że najbardziej jednorodną strukturę udało się uzyskać przy λ=100. Te obserwacje pokrywają się z wynikami testów właściwości mechanicznych oraz mikrotwardości, które również potwierdziły, że wyższy współczynnik wyciskania korzystnie wpływa na właściwości wyrobów ze stopu AlSi11 wytwarzanych metodą KOBO.

Analizę mikrostruktury przeprowadzono na przekrojach poprzecznych próbek pobranych ze środkowej części pręta po wyciskaniu metodą KOBO (f=7 Hz) dla trzech współczynników wyciskania λ=36, 60 oraz 100. Taki zakres parametrów pozwolił dokładnie ocenić, jak współczynnik wyciskania wpływa na zmiany zachodzące w strukturze materiału.

Dla najmniejszego współczynnika wyciskania λ=36 (Rysunek 6.51) mikrostruktura w przekroju poprzecznym jest najbardziej niejednorodna spośród wszystkich badanych wariantów. Cząstki krzemu mają tutaj postać stosunkowo dużych, nieregularnych, a momentami nawet wydłużonych wydzieleń. Widać też wyraźne różnice w rozmieszczeniu faz wtórnych, ponieważ występują miejsca, gdzie krzem jest mocno skoncentrowany, oraz strefy, w których jest go znacznie mniej.

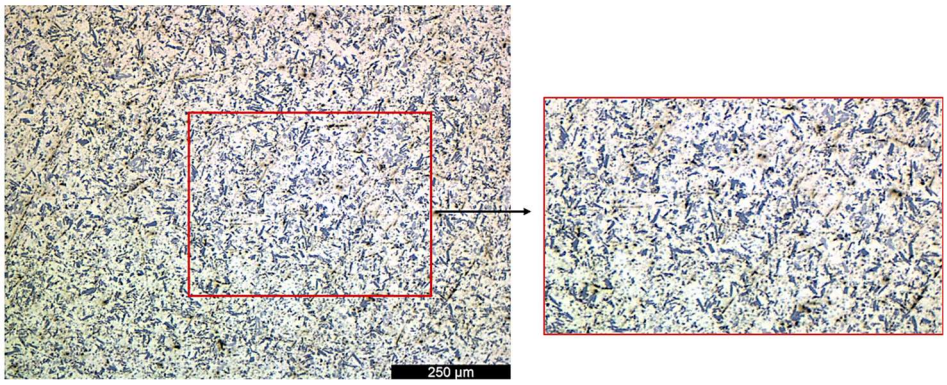


Rysunek 6.51 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przekrój poprzeczny, λ=36 (środkowa część pręta), f=7 Hz.

Podstawę struktury tworzy faza α-Al, w której znajdują się cząstki krzemu oraz fazy międzymetaliczne. W porównaniu do próbek poddanych większemu współczynnikowi wyciskania, tutaj widać wyraźniejsze różnice w morfologii i rozmieszczeniu poszczególnych składników. Cząstki krzemu są słabiej rozdrobnione, a cała mikrostruktura jest znacznie mniej jednorodna niż w przypadku wariantów λ=60 i λ=100.

Zwiększenie współczynnika wyciskania do λ=60 prowadzi do wyraźnych zmian w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11 (Rysunek 6.52). W stosunku do próbki o λ=36, cząstki krzemu stają się drobniejsze i rozkładają się w osnowie α-Al znacznie bardziej równomiernie. Analizując przekrój poprzeczny, zauważyć można, że struktura staje się bardziej spójna, a różnice między obszarami o różnym stężeniu faz wtórnych stają się mniej widoczne.

Cząstki krzemu są w tym przypadku wyraźnie mniejsze i mają bardziej regularny kształt niż przy λ=36. Co więcej, ich wielkość oraz rozmieszczenie stają się bardziej przewidywalne, co pokazuje, że mikrostruktura staje się coraz bardziej jednorodna. Choć miejscami wciąż można dostrzec niewielkie różnice w koncentracji składników, to nie są one już tak intensywne jak przy najniższym współczynniku wyciskania.

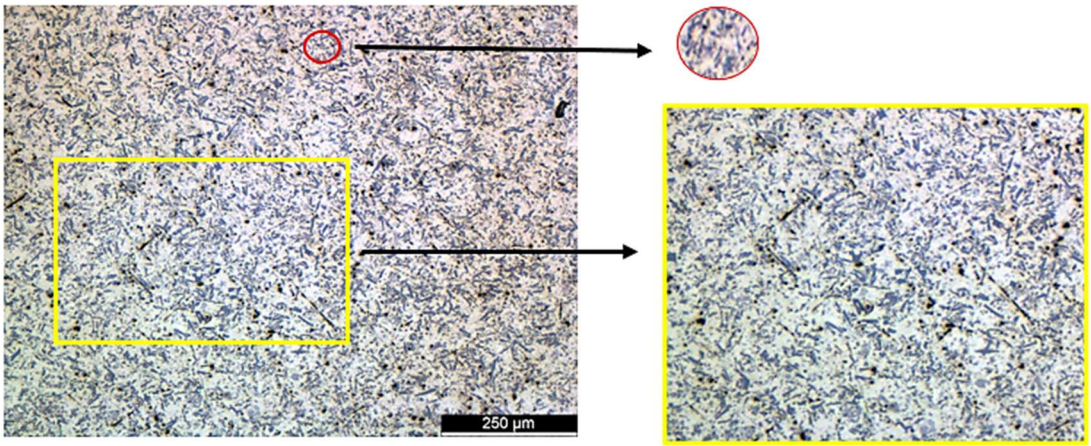


Rysunek 6.52 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO (przekrój poprzeczny, częstotliwość 7 Hz, λ=60, obszar środkowy pręta-Middle).

Uzyskany obraz mikrostruktury pokazuje, że podniesienie współczynnika wyciskania do poziomu λ=60 pomaga uzyskać bardziej jednolitą strukturę i lepiej rozdrobnione cząstki krzemu niż w przypadku wariantu λ=36.

Przy najwyższym współczynniku, czyli λ=100, mikrostruktura w przekroju poprzecznym jest najbardziej jednorodna spośród wszystkich badanych wariantów (Rysunek 6.53). Cząstki krzemu pojawiają się tu głównie jako drobne, równomiernie rozłożone wydzielenia, które mają mniejsze wymiary i bardziej regularny kształt niż w próbkach wyciskanych przy niższych współczynnikach wyciskania.

Rozkład faz wtórnych w osnowie α-Al jest równomierny w całej przestrzeni, a lokalne różnice w koncentracji cząstek krzemu są minimalne. Porównując ten wynik z wariantami λ=36 i λ=60, widać wyraźnie, że to właśnie tutaj cząstki krzemu są najbardziej rozdrobnione, a składniki strukturalne są najlepiej rozmieszczone na całym badanym obszarze.



Rysunek 6.53 Mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO (przekrój poprzeczny), f=7 Hz, λ=100, próbka pobrana ze strefy środkowej pręta.

Zdjęcia mikrostruktury pokazują, że zwiększenie współczynnika wyciskania do poziomu λ=100 pozwala uzyskać najbardziej jednorodną strukturę spośród wszystkich badanych wariantów. Mniejsza liczba lokalnych niejednorodności oraz wyraźniejsze rozdrobnienie cząstek krzemu kolorują z wynikami badań właściwości mechanicznych i mikrotwardości. W obu tych przypadkach widać, że wyższy współczynnik wyciskania korzystnie wpływa na właściwości wyrobów ze stopu AlSi11 poddanych procesowi KOBO.

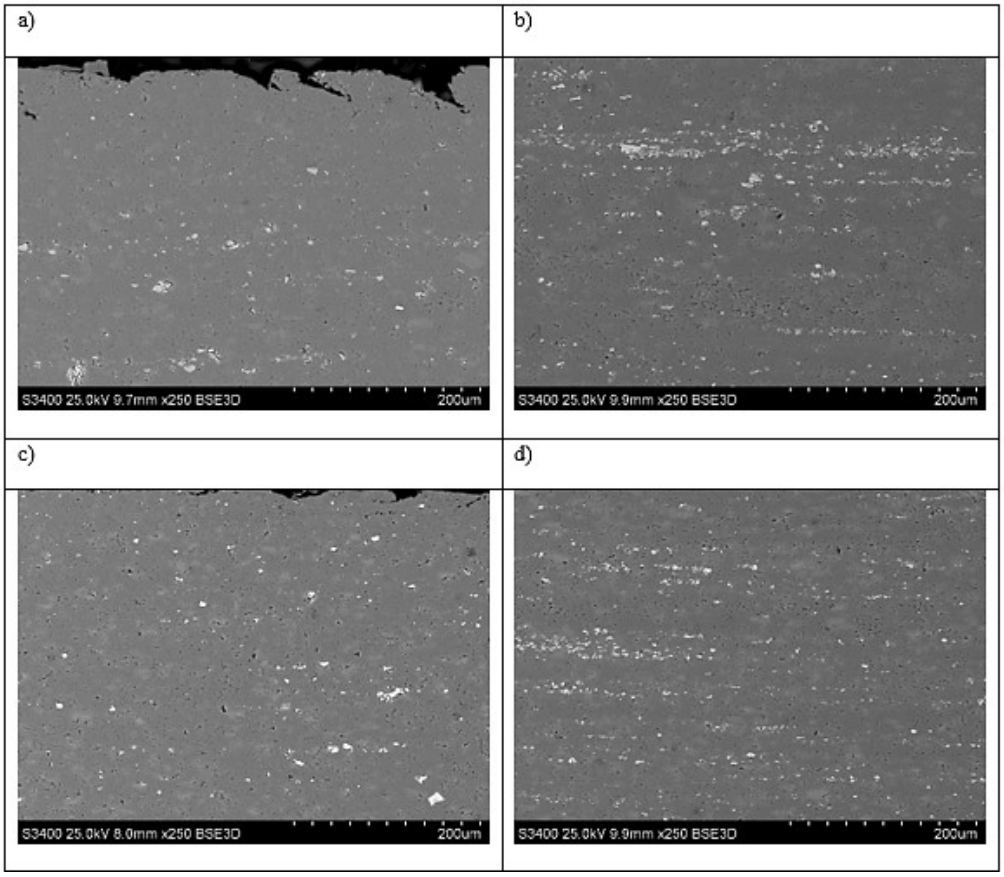
Analiza wykazała, że zarówno częstotliwość oscylacji matrycy, jak i współczynnik wyciskania λ mają wyraźny wpływ na to, jak zmienia się mikrostruktura. Gdy zwiększono częstotliwość oscylacji (z 3 do 7 Hz) oraz współczynnik wyciskania (z 36 do 100), cząstki krzemu stawały się coraz mniejsze, były bardziej równomiernie rozmieszczone w osnowie α-Al, a cała mikrostruktura stawała się coraz bardziej jednorodna.

Przy niższych wartościach współczynnika wyciskania materiał wciąż zachowuje cechy charakterystyczne dla mniejszego odkształcenia, co objawia się lokalnymi niejednorodnościami i obecnością większych wydzieleń faz wtórnych. Jednak wraz ze wzrostem λ, cząstki krzemu maleją, różnice w ich rozmieszczeniu znikają, a kierunkowość struktury stopniowo zanika.

Najlepsze efekty, czyli najbardziej rozdrobnioną i jednorodną mikrostrukturę, osiągnięto przy najwyższym współczynniku λ=100 i częstotliwości 7 Hz. Wyniki te potwierdzają, że intensywniejszy proces KOBO sprzyja rozbijaniu faz wtórnych i ujednolicaniu struktury stopu AlSi11, co pokrywa się z tym, co zaobserwowano w badaniach mechanicznych i mikrotwardości.

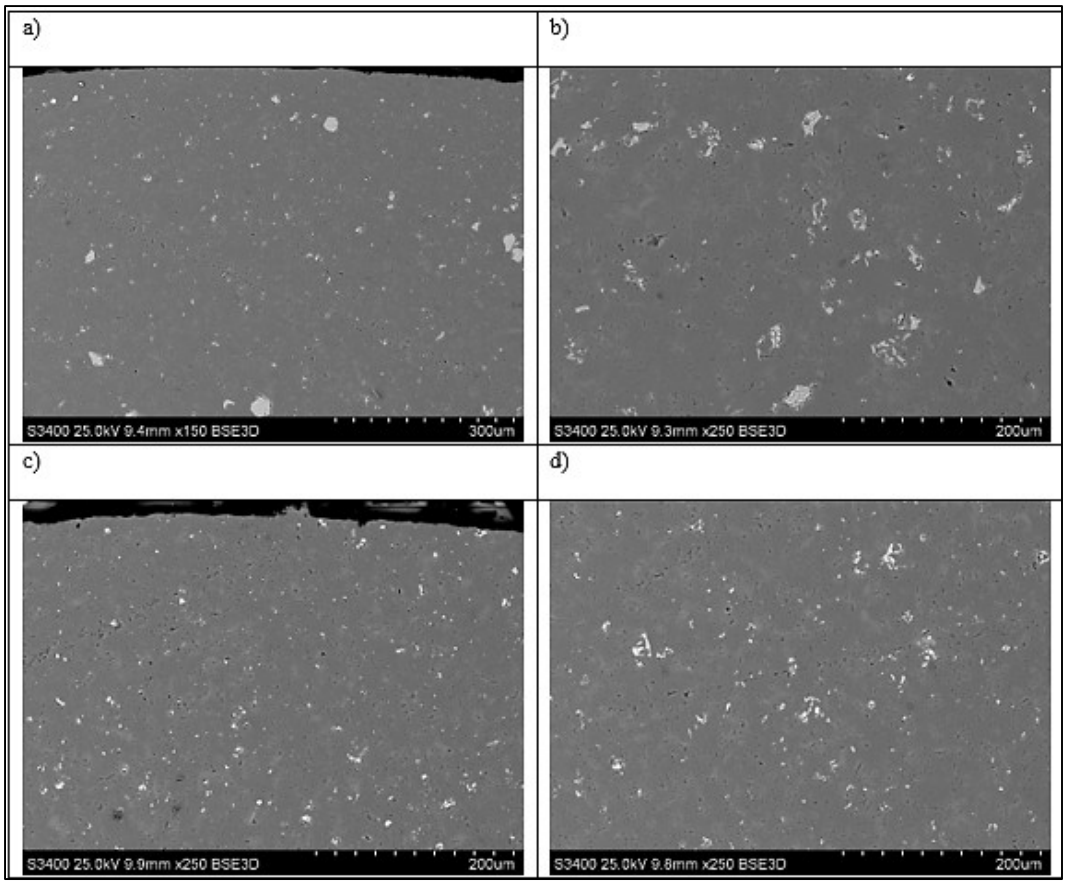
Sam proces wyciskania metodą KOBO wyraźnie przebudowuje mikrostrukturę stopu AlSi11. Widać to po bardziej równomiernym rozmieszczeniu poszczególnych faz oraz zmianie kształtu cząstek krzemu eutektycznego i faz międzymetalicznych w osnowie aluminiowej. W analizowanych próbkach, patrząc na przekroje podłużne, można dostrzec charakterystyczne pasma, które są wynikiem linii płynięcia materiału podczas procesu KOBO. Tworzą je wydłużone cząstki krzemu oraz fazy bogate w Fe i Mn, które ustawiają się zgodnie z kierunkiem wyciskania. Ta pasmowa struktura jest szczególnie widoczna w próbkach wyciskanych przy 7 Hz dla średnic 10 mm (λ=36) oraz 6 mm (λ=100). Z kolei w przekrojach poprzecznych układ faz jest znacznie mniej kierunkowy, ponieważ linie

płynięcia materiału są tam przecinane prostopadle do kierunku wyciskania (Rysunek 6.54 i Rysunek 6.55).



Rysunek 6.54 Mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 w przekroju podłużnym po wyciskaniu metodą KOBO. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) obszar przypowierzchniowy, (b) środkowa część próbki, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) obszar przypowierzchniowy, (d) środkowa część próbki.

Na przekrojach podłużnych obu próbek widać wyraźny, pasmowy układ cząstek krzemu oraz faz międzymetalicznych. Pasma te rozciągają się przez cały analizowany przekrój, ale są najwyraźniej widoczne w centralnej części próbek. Tam fazy wtórne tworzą niemal ciągłe linie ułożone równolegle do kierunku wyciskania. Z kolei w obszarach blisko powierzchni wydzielenia są mniejsze i rozłożone bardziej równomiernie niż w centrum, co oznacza, że mikrostruktura jest tam bardziej jednorodna.



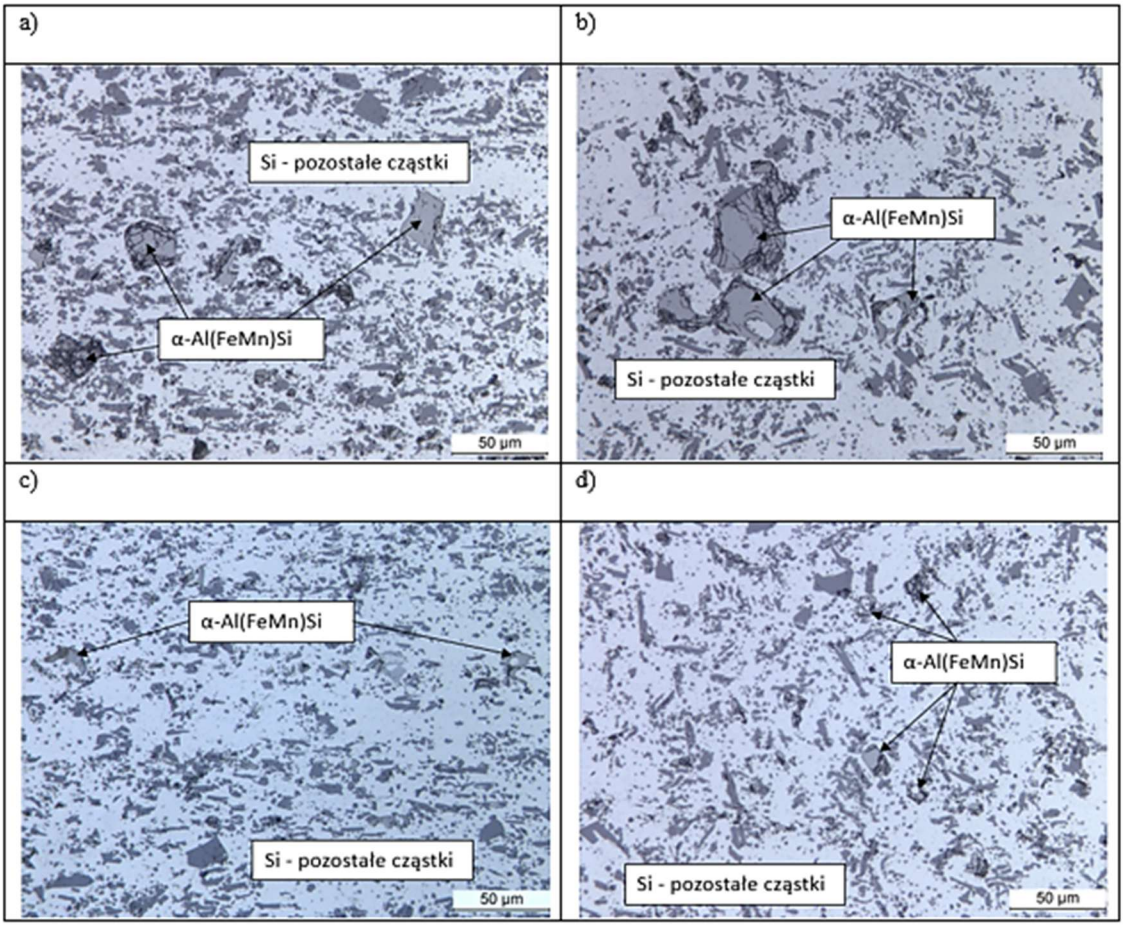
Rysunek 6.55 Mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 w przekroju poprzecznym po wyciskaniu metodą KOBO. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) obszar przypowierzchniowy, (b) środkowa część próbki, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) obszar przypowierzchniowy, (d) środkowa część próbki.

W przekrojach poprzecznych pasmowa struktura, którą wyraźnie widać w przekrojach podłużnych, jest znacznie mniej zauważalna. Wynika to z faktu, że linie płynięcia materiału są tu przecinane prostopadle do kierunku wyciskania. Przez to cząstki krzemu i fazy międzymetaliczne wydają się rozłożone bardziej równomiernie i mniej kierunkowo w osnowie aluminiowej.

Różnice między przekrojami podłużnymi a poprzecznymi pokazują, jak fazy składowe orientują się w przestrzeni podczas procesu KOBO. Choć w obu przypadkach zauważalne są te same elementy mikrostruktury, ich wygląd i sposób rozmieszczenia zależą od tego, pod jakim kątem wykonano przekrój względem kierunku płynięcia materiału. To potwierdza, że pasmowy układ składników mikrostruktury wynika z ich ukierunkowania.

Badania SEM oraz analizy EDS przeprowadzone na obu rodzajach przekrojów potwierdziły, że w stopie AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO znajdują się cząstki bogate krzem oraz fazy międzymetaliczne Al-Fe-Mn-Si. Punkty analizy, w których zawartość krzemu

wynosiła około 47-94% mas., zidentyfikowano jako cząstki krzemu eutektycznego. Jeśli w widmach EDS pojawiało się aluminium, wynikało to z faktu, że wiązka elektronów obejmowała również otaczającą osnowę alfa-Al. Z kolei wydzielenia bogate w żelazo i mangan to fazy z rodziny alfa-Al (FeMn)Si, które naturalnie występują w tym stopie po procesie wyciskania. (Rysunek 6.56.)

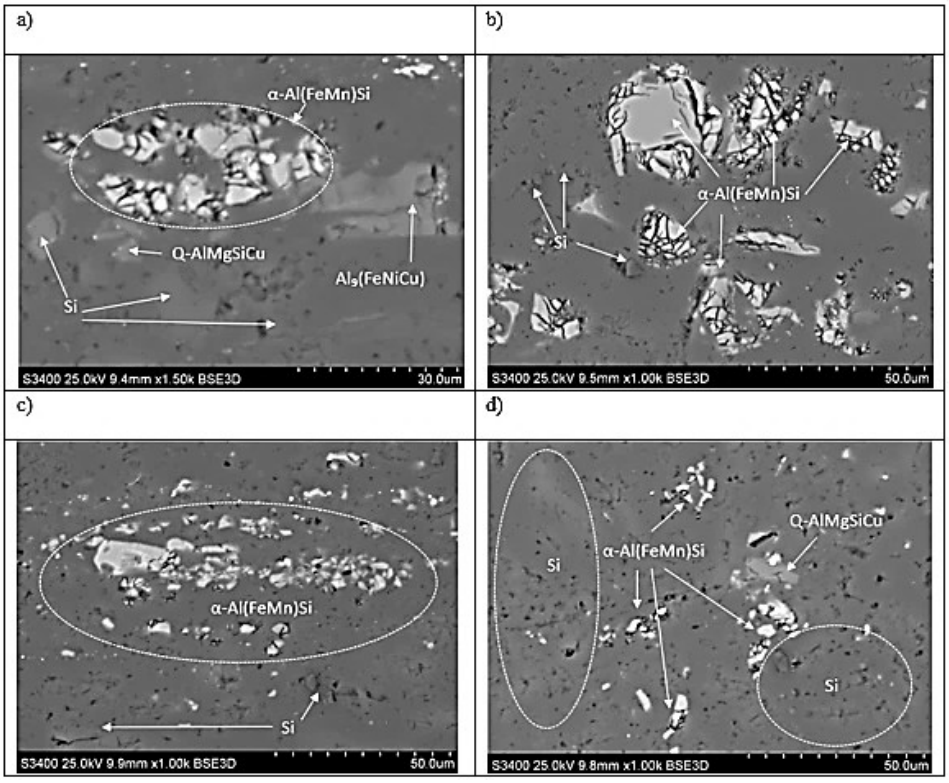


Rysunek 6.56 Mikrostruktury przedstawiające stop AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO wraz z identyfikacją głównych składników mikrostruktury. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) przekrój podłużny, (b) przekrój poprzeczny, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) przekrój podłużny, (d) przekrój poprzeczny.

Analiza zmian mikrostrukturalnych wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie wyciskania metodą KOBO z wykorzystaniem SEM

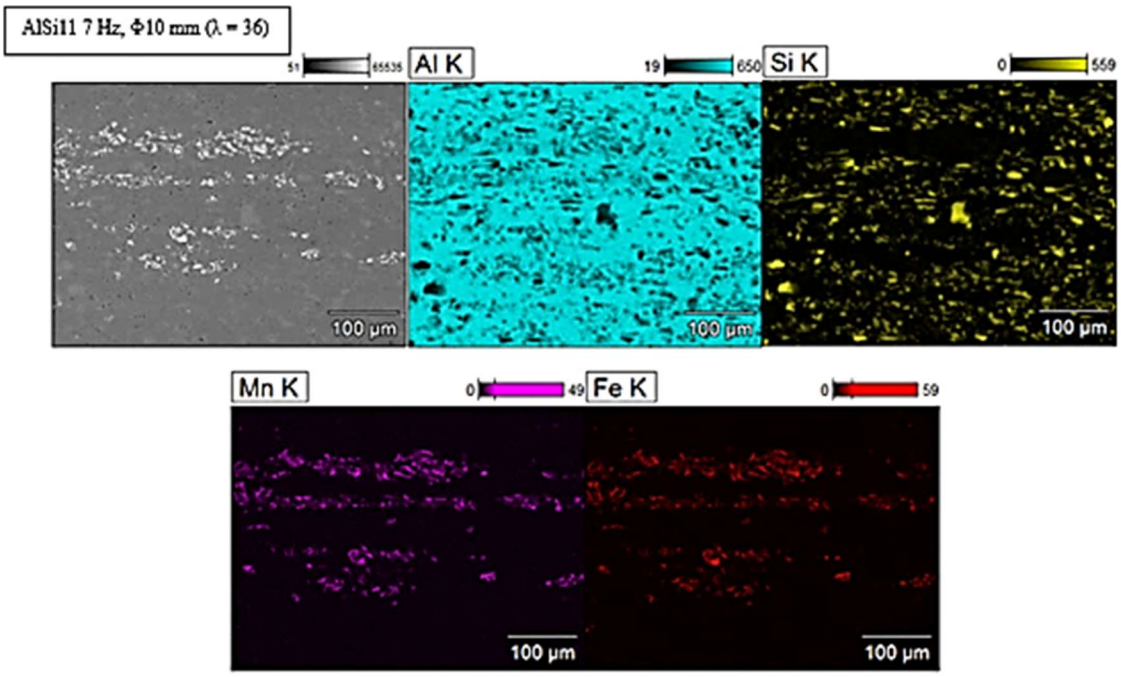
Aby sprawdzić, jakie fazy znajdują się w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO, przeprowadzono analizę za pomocą mikroskopii SEM oraz lokalne badania składu chemicznego metodą EDS. Dzięki temu udało się określić kształt i rozmieszczenie poszczególnych wydzieleń, a także ocenić, jak w materiale rozłożone są wybrane pierwiastki.

W kilku punktach analizy EDS jednocześnie wykryto obecność Mg, Si, Cu oraz Al, co sugeruje występowanie fazy Q-AlMgSiCu. Dodatkowo zidentyfikowano lokalne wydzielenia zawierające Mg, Cu, Fe i Ni. Patrząc na ich skład chemiczny, można przypuszczać, że są to fazy międzymetaliczne Al9 (Fe, Ni, Cu) lub złożone wydzielenia wielofazowe, które powstały podczas krzepnięcia stopu. To, że po procesie KOBO te wydzielenia mają nieregularny kształt i są rozproszone w osnowie, pokazuje, że intensywne odkształcenie plastyczne pomogło je rozdrabniać i bardziej równomiernie rozprowadzić w aluminium (Rysunek 6.57)



Rysunek 6.57 Obrazy SEM (BSE) przedstawiające charakterystyczne składniki mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) przekrój podłużny, (b) przekrój poprzeczny, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) przekrój podłużny, (d) przekrój poprzeczny. Zaznaczono cząstki krzemu (Si), fazy α-Al (Fe, Mn) Si oraz lokalnie występujące wydzielenia typu Q-AlMgSiCu i Al_9 (Fe, Ni, Cu).

Mapowanie rozkładu pierwiastków za pomocą metody EDS potwierdziło, że główne składniki stopu AlSi11 są rozmieszczone nierównomiernie po procesie wyciskania metodą KOBO. Aluminium rozkłada się równomiernie w całej objętości osnowy, co dowodzi ciągłości fazy α-Al. Z kolei krzem zachowuje się zupełnie inaczej. Jego sygnał skupia się w wydzieleniach eutektycznych, które tworzą pasma biegnące zgodnie z kierunkiem wyciskania (Rysunek 6.58)



Rysunek 6.58 Mapy rozkładu pierwiastków uzyskane metodą EDS dla wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO (7 Hz, Φ10 mm, λ=36), przedstawiające rozmieszczenie Al, Si, Mn i Fe w przekroju podłużnym równoległym do kierunku wyciskania.

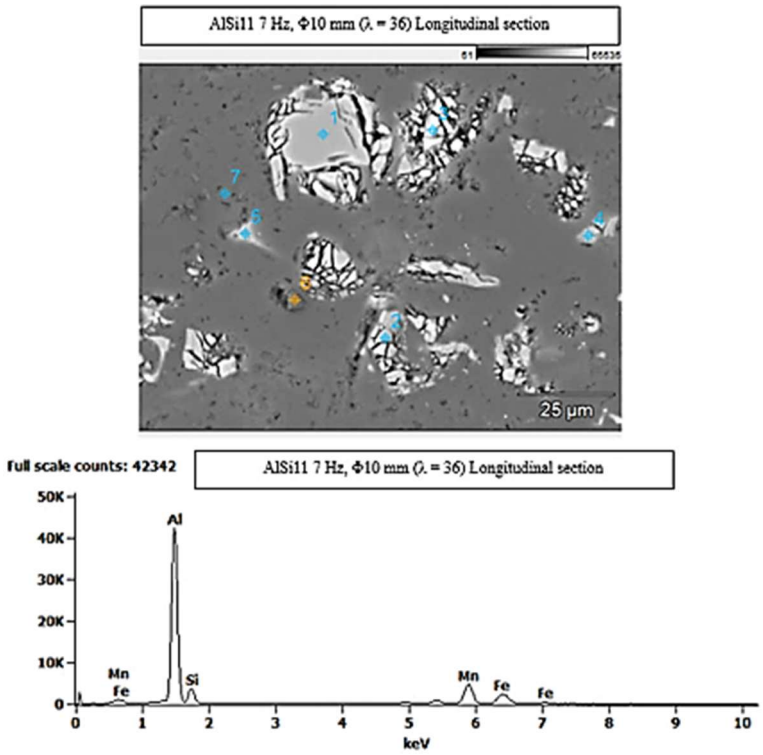
Mapy rozkładu manganu i żelaza pokazują, że oba pierwiastki występują w tych samych miejscach. Ich sygnały nakładają się na siebie w wydzieleniach o wydłużonym kształcie, co sugeruje obecność faz międzymetalicznych z układu Al-Fe-Mn-Si. Pierwiastki te są rozmieszczone w pasmach biegnących równolegle do kierunku płynięcia materiału, a wynika to bezpośrednio z odkształcenia podczas procesu KOBO.

Porównując mapy poszczególnych pierwiastków, można zauważyć, że krzem znajduje się głównie w wydzieleniach eutektycznych, podczas gdy żelazo i mangan skupiają się w fazach międzymetalicznych. Nie widać też wyraźnego nakładania się sygnału krzemu na obszary o najwyższym stężeniu żelaza i manganu, co potwierdza, że występowanie odrębnych składników mikrostruktury.

To, że wydzielenia są zorientowane zgodnie z kierunkiem wyciskania, dowodzi, że proces KOBO porządkuje rozmieszczenie faz składowych wzdłuż kierunku płynięcia materiału, przy jednoczesnym zachowaniu ciągłości osnowy aluminiowej.

Punktowa analiza składu chemicznego metodą EDS potwierdziła obecność charakterystycznych składników mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie

wyciskania metodą KOBO. Reprezentatywne widmo EDS przedstawione na rysunku 6.59 odpowiada analizie wydzielenia zawierającego Al, Fe, Mn oraz Si, co wskazuje na obecność fazy międzymetalicznej z układu Al-Fe-Mn-Si.

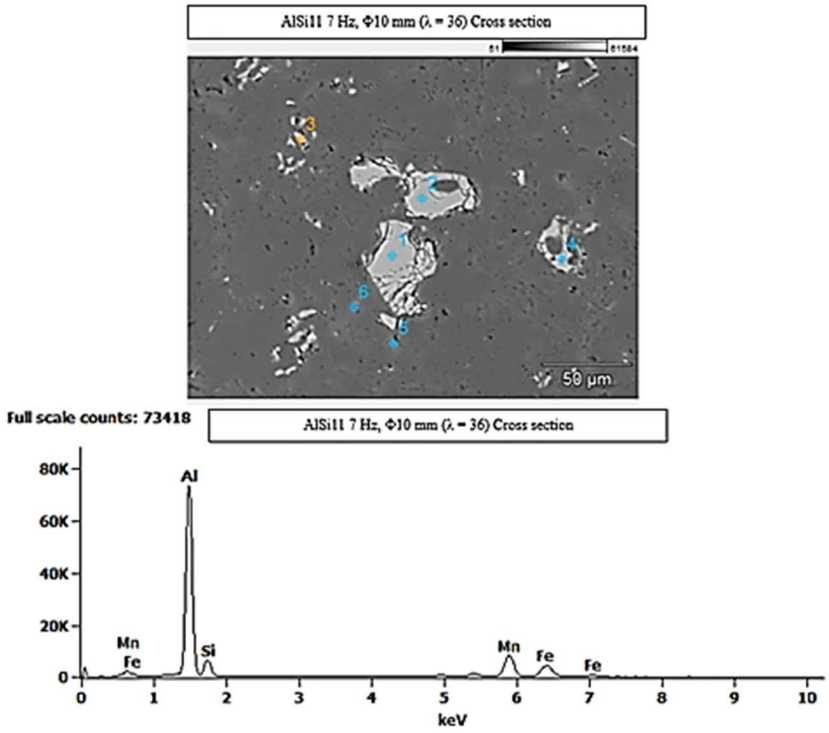


Rysunek 6.59 Obraz SEM (BSE) mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO (7 Hz, Φ10 mm, λ=36), przedstawiający lokalizację punktów analizy EDS w przekroju podłużnym oraz reprezentatywne widmo EDS.

Dominujący pik aluminium wynika z dużej objętości oddziaływania wiązki elektronów, obejmującej zarówno analizowane wydzielenie, jak i otaczającą je osnowę α-Al. Wyraźnie zaznaczone piki żelaza i manganu potwierdzają obecność faz bogatych w te pierwiastki, natomiast obecność krzemu świadczy o jego udziale w składzie analizowanej fazy lub wynika z nakładania się objętości oddziaływania wiązki na sąsiadujące wydzielenia krzemu eutektycznego.

Uzyskane wyniki są zgodne z obserwacjami wykonanymi w obrazach SEM oraz z mapami rozkładu pierwiastków EDS. Łączna analiza potwierdza, że w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO występują liczne fazy międzymetaliczne typu α-Al (Fe, Mn) Si oraz cząstki krzemu eutektycznego rozmieszczone zgodnie z kierunkiem płynięcia materiału.

Punktowa analiza EDS wykonana na przekroju poprzecznym potwierdziła obecność faz międzymetalicznych występujących w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie wyciskania metodą KOBO. Reprezentatywne widmo EDS przedstawione na rysunku 6.60 odpowiada analizie wydzielenia zawierającego Al, Fe, Mn oraz Si, charakterystycznego dla faz z układu Al-Fe-Mn-Si.



Rysunek 6.60 Obraz SEM (BSE) mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO (7 Hz, Φ10 mm, λ=36), przedstawiający lokalizację punktów analizy EDS w przekroju poprzecznym oraz reprezentatywne widmo EDS fazy międzymetalicznej.

Najwyższą intensywność ma pik aluminium, co wynika z faktu, że objętość oddziaływania wiązki elektronów obejmuje nie tylko samo badane wydzielenie, ale też otaczającą je osnowę alfa-Al. Wyraźne piki żelaza i manganu potwierdzają, że w materiale występują fazy bogate w te pierwiastki. Z kolei sygnał krzemu może oznaczać, że jest on częścią składu badanego wydzielenia, lub wynika z faktu, że objętość oddziaływania wiązki nakłada się na sąsiednie cząstki krzemu eutektycznego.

W porównaniu z przekrojem podłużnym analizowane wydzielenia nie wykazują wyraźnej orientacji zgodnej z kierunkiem wyciskania, co wynika z wykonania przekroju prostopadle do kierunku płynięcia materiału. Uzyskane wyniki pozostają zgodne z obserwacjami SEM oraz mapami rozkładu pierwiastków EDS i potwierdzają obecność faz międzymetalicznych typu α-Al (Fe, Mn) Si w mikrostrukturze wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO.

Interpretacja mikrostrukturalna wyrobów ze stopu AlSi11

Zaobserwowane zmiany mikrotwardości wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie wyciskania metodą KOBO pozostają w ścisłej zależności ze zmianami mikrostrukturalnymi zachodzącymi podczas intensywnego odkształcenia plastycznego. Mikrotwardość jest parametrem silnie zależnym od stanu mikrostruktury materiału, w tym stopnia rozdrobnienia składników strukturalnych, rozmieszczenia faz wtórnych oraz stopnia odkształcenia osnowy. Z tego względu stanowi użyteczne narzędzie do pośredniej oceny efektów procesu KOBO.

Przeprowadzone obserwacje mikrostrukturalne wykazały, że zarówno wzrost częstotliwości oscylacji matrycy, jak i zwiększenie współczynnika wyciskania prowadzą do stopniowego ujednorodnienia mikrostruktury oraz rozdrobnienia cząstek krzemu. Najbardziej jednorodną strukturę uzyskano dla najwyższego współczynnika wyciskania (λ=100) oraz częstotliwości oscylacji 7 Hz. Jednocześnie w tych wariantach procesu odnotowano najwyższe wartości właściwości mechanicznych oraz mikrotwardości, co wskazuje na korzystny wpływ przebudowy mikrostruktury na właściwości wyrobów ze stopu AlSi11.

Istotnym elementem obserwowanych zmian jest fragmentacja cząstek krzemu oraz ich bardziej równomierne rozmieszczenie w osnowie α-Al. W porównaniu z materiałem o niższym współczynniku wyciskania cząstki faz wtórnych charakteryzują się mniejszymi wymiarami oraz bardziej regularną morfologią, a lokalne różnice w ich koncentracji ulegają wyraźnemu ograniczeniu. Taki charakter mikrostruktury sprzyja bardziej jednorodnemu rozkładowi właściwości mechanicznych w objętości materiału.

Analiza mikrotwardości wykazała również zróżnicowanie jej wartości wzdłuż długości pręta. Na początku zaobserwowano zazwyczaj niższe wartości mikrotwardości i większy rozrzut wyników, ale w części środkowej oraz końcowej wartości te stały się wyższe i bardziej stabilne. Można to powiązać z samym procesem wyciskania metodą KOBO. W początkowej fazie ma on charakter niestacjonarny, natomiast gdy warunki odkształcenia już się ustabilizują, proces deformacji materiału staje się bardziej jednorodny

Uzyskane wyniki wskazują również na zróżnicowanie wartości mikrotwardości w zależności od kierunku pomiaru. W większości analizowanych wariantów wyższe wartości odnotowano w kierunku wzdłużnym niż poprzecznym, co można wiązać z kierunkowym

charakterem płynięcia materiału podczas wyciskania. Zależność ta znajduje odzwierciedlenie również w obrazach mikrostruktury, w których obserwowano lokalną orientację składników strukturalnych zgodnie z kierunkiem przepływu materiału.

Przeprowadzone badania wykazały ponadto wyraźną zgodność pomiędzy wynikami obserwacji mikrostrukturalnych, pomiarami mikrotwardości oraz właściwościami wytrzymałościowymi. Warianty procesu prowadzące do większego rozdrobnienia i bardziej jednorodnego rozmieszczenia cząstek krzemu charakteryzowały się jednocześnie wyższymi wartościami mikrotwardości oraz korzystniejszymi właściwościami mechanicznymi. Świadczy to o istotnym wpływie parametrów procesu KOBO na przebudowę mikrostruktury oraz kształtowanie właściwości wyrobów ze stopu AlSi11.

Dodatkowych informacji na temat zależności pomiędzy mikrostrukturą a właściwościami mechanicznymi dostarczyły obserwacje wykonane metodą SEM oraz analizy EDS. Obrazy SEM wykazały, że wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania dochodzi do wyraźnej zmiany morfologii faz składowych oraz bardziej równomiernego rozmieszczenia cząstek krzemu eutektycznego i faz międzymetalicznych w osnowie aluminiowej. W przekrojach podłużnych obserwowano charakterystyczny pasmowy układ wydzieleń zgodny z kierunkiem wyciskania, natomiast w przekrojach poprzecznych rozmieszczenie faz było mniej kierunkowe. Analizy punktowe oraz mapy rozkładu pierwiastków EDS potwierdziły obecność cząstek krzemu oraz faz międzymetalicznych typu α-Al (Fe, Mn) Si, a lokalnie również faz zawierających Mg i Cu. Jednocześnie mapy EDS wykazały współlokalizację żelaza i manganu w tych samych wydzieleniach, co potwierdza ich przynależność do faz międzymetalicznych Al-Fe-Mn-Si. Zaobserwowana większa jednorodność rozmieszczenia faz wtórnych pozostaje zgodna z wynikami pomiarów mikrotwardości, wskazując na bardziej równomierny rozkład lokalnych właściwości mechanicznych materiału.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zwiększenie współczynnika wyciskania oraz odpowiedni dobór częstotliwości oscylacji matrycy sprzyjają uzyskaniu bardziej jednorodnej mikrostruktury oraz poprawie właściwości mechanicznych wyrobów ze stopu AlSi11. Zarówno obserwacje pod mikroskopem optycznym, jak i analizy SEM/EDS potwierdziły, że intensywne odkształcenie plastyczne sprawia, że fazy składowe rozkładają się bardziej równomiernie i zmienia się ich morfologia. Widać to wyraźnie w wynikach badań wytrzymałościowych oraz pomiarach mikrotwardości. W badanym zakresie parametrów

najlepsze efekty osiągnięto przy wysokim współczynniku wyciskania λ= 100 i częstotliwości oscylacji 7 Hz. To właśnie wtedy odnotowano najwyższy stopień jednorodności mikrostruktury, najwyższą mikrotwardość oraz najlepsze właściwości wytrzymałościowe.

Związek mikrotwardości z przemianami mikrostrukturalnymi wyrobów ze stopu AlSi11

Zmiany mikrotwardości w wyrobach ze stopu AlSi11, które zaobserwowano po procesie wyciskania metodą KOBO, są ściśle powiązane z przemianami mikrostrukturalnymi zachodzącymi podczas intensywnego odkształcania plastycznego. Mikrotwardość jest parametrem silnie zależnym od stanu mikrostruktury materiału, dlatego jej analiza stanowi cenne uzupełnienie obserwacji prowadzonych z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej. Zestawienie wyników badań pozwala na ocenę wpływu parametrów procesu KOBO na przebudowę mikrostruktury oraz właściwości mechaniczne badanego wyrobu.

Przeprowadzone obserwacje wykazały, że wzrost częstotliwości oscylacji matrycy oraz zwiększenie współczynnika wyciskania prowadzą do stopniowego rozdrobnienia cząstek krzemu oraz ich bardziej równomiernego rozmieszczenia w osnowie α-Al. Jednocześnie w tych samych wariantach procesu odnotowano wyższe wartości mikrotwardości, co wskazuje na wyraźną zależność pomiędzy stopniem ujednorodnienia mikrostruktury a odpornością materiału na odkształcenie wgłębne.

Najwyższe wartości mikrotwardości uzyskano dla próbek charakteryzujących się najbardziej jednorodną mikrostrukturą, w której cząstki krzemu były drobniejsze i równomierniej rozmieszczone. Ograniczenie lokalnych niejednorodności strukturalnych sprzyja bardziej równomiernemu rozkładowi właściwości mechanicznych w objętości materiału, co znajduje odzwierciedlenie zarówno w wynikach pomiarów mikrotwardości, jak i badań wytrzymałościowych.

Analiza rozkładu mikrotwardości wzdłuż długości pręta wykazała również związek z przebiegiem procesu wyciskania. W części początkowej obserwowano większy rozrzut wyników oraz niższe wartości mikrotwardości, natomiast w części środkowej i końcowej wartości te były bardziej stabilne. Jednocześnie obserwacje mikrostrukturalne wskazują, że w tych obszarach materiał charakteryzuje się większym stopniem ujednorodnienia,

co potwierdza zależność pomiędzy przebudową mikrostruktury a uzyskiwanymi właściwościami mechanicznymi.

Na mikrotwardość wpływają również morfologia i rozmieszczenie cząstek krzemu. Im wyższy jest współczynnik wyciskania i częstotliwość oscylacji, tym mniejsze stają się cząstki fazy krzemowej i tym bardziej równomiernie rozkładają się one w osnowie. Taka budowa mikrostruktury pomaga uzyskać wyższe i bardziej stabilne wartości mikrotwardości.

Wyniki jasno pokazują, że mikrotwardość to dobry wskaźnik zmian mikrostrukturalnych, jakie zachodzą podczas procesu KOBO. Widoczna zależność między pomiarami twardości, obserwacjami struktury a właściwościami wytrzymałościowymi dowodzi, że odpowiednie ustawienie parametrów pozwala uzyskać bardziej jednolitą mikrostrukturę i lepsze właściwości mechaniczne stopu AlSi11.

Fragmentacja i rozdrobnienie składników mikrostruktury wyrobów ze stopu AlSi11

Jednym z najważniejszych efektów wyciskania metodą KOBO jest wyraźna zmiana mikrostruktury stopu AlSi11. Badania pokazały, że wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy, składniki mikrostruktury stopniowo się rozdrabniają i bardziej równomiernie rozkładają w osnowie alfa-Al. Materiał wyjściowy miał typową dla odlewów strukturę dendrytyczną. Osnowę stanowił roztwór stały alfa-Al, a między ramionami dendrytów znajdowały się obszary eutektyki krzemowej oraz fazy międzymetaliczne. Struktura ta była dość niejednorodna, a cząstki krzemu były duże i miały nieregularne kształty.

Mikrostruktura materiału wyjściowego charakteryzowała się typową dla odlewniczych stopów Al-Si budową dendrytyczną. Osnowę stanowił roztwór stały α-Al, pomiędzy którego ramionami występowały obszary eutektyki krzemowej oraz faz międzymetalicznych. Struktura ta była wyraźnie niejednorodna, a cząstki krzemu charakteryzowały się znacznymi wymiarami oraz nieregularną morfologią.

Po zastosowaniu procesu KOBO cechy charakterystyczne dla mikrostruktury odlewniczej stopniowo zanikały. W miarę zwiększania współczynnika wyciskania cząstki krzemu stawały się mniejsze i lepiej rozpraszały się w osnowie aluminiowej. Jednocześnie obszary osnowy alfa-Al ulegały zmniejszeniu, a cała mikrostruktura stawała się coraz bardziej jednolita.

Największe zmiany widać było w próbkach wyciskanych przy parametrach λ=100 oraz f=7 Hz. W ich przypadku krzem występował głównie jako drobne, równomiernie rozproszone wydzielenia, a lokalne niejednorodności były znacznie mniej widoczne niż w próbkach przy niższych współczynnikach wyciskania.

Wszystko to wskazuje na to, że zwiększenie intensywności odkształcenia w procesie KOBO sprzyja rozdrabnianiu składników i ujednolicaniu ich rozmieszczenia. Te obserwacje pokrywają się z wynikami badań mikrotwardości i wytrzymałości, gdzie również odnotowano poprawę wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy.

Zależność między zmianami struktury a właściwościami mechanicznymi potwierdza, że to właśnie rozdrobnienie i lepsze rozmieszczenie składników odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu właściwości wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO. Wyższą mikrotwardość i wytrzymałość na rozciąganie można przypisać coraz większej jednorodności struktury oraz ograniczeniu niejednorodności, które są typowe dla materiału w stanie odlewniczym. Badania potwierdzają więc, że proces KOBO wyraźnie przebudowuje mikrostrukturę stopu AlSi11, rozdrabniając krzem i lepiej rozkładając go w osnowie alfa-Al. Ta bardziej jednolita struktura jest jednym z głównych powodów poprawy właściwości mechanicznych materiału.

Zróżnicowanie mikrostruktury wzdłuż długości pręta ze stopu AlSi11

Podczas wyciskania metodą KOBO warunki odkształcenia nie są takie same na całej długości pręta. Przez to zmiany w mikrostrukturze stopu AlSi11 zależą od tego, w którym miejscu materiału dokonana zostanie analiza. Bardzo dobrze widać to przy porównaniu początku, środka i końca pręta.

Na samym początku pręta stopień przebudowy mikrostruktury był najmniejszy. tej strefie proces nie zdążył jeszcze w pełni się ustabilizować, więc w strukturze wciąż można było dostrzec cechy materiału wyjściowego, takie jak większe obszary osnowy alfa-Al czy lokalne fragmenty struktury odlewniczej. Cząstki krzemu miały tu też znacznie większe zróżnicowanie pod względem wielkości i rozmieszczenia.

W środkowej części pręta przebudowa była już bardziej zaawansowana. Struktura stała się bardziej jednolita, a cząstki krzemu były mniejsze i lepiej rozłożone w osnowie alfa-Al.

Jednocześnie obszary osnowy uległy zmniejszeniu, a lokalne niejednorodności stały się mniej wyraźne niż na początku.

Najbardziej jednolitą mikrostrukturę udało się uzyskać w końcowej części pręta. W tej strefie pierwotna struktura odlewnicza została w dużej mierze zatarta, a krzem występował głównie jako drobne, równomiernie rozproszone wydzielenia. Był to obszar o najmniejszym stopniu niejednorodności.

Obserwowane zmiany mikrostruktury są zgodne z wynikami pomiarów mikrotwardości. Na początku pręta twardość była niższa i wyniki bardziej rozbieżne, natomiast w części środkowej i końcowej były one wyższe i bardziej stabilne. To dowodzi, że w dalszych odcinkach pręta struktura jest lepiej ujednolicona, a sam proces wyciskania przebiegał bardziej stabilnie. Uzyskane wyniki wskazują na zależność między przebiegiem technologii a zmianami w mikrostrukturze stopu AlSi11. W miarę postępu procesu struktura staje się bardziej jednolita, krzem się rozdrabnia, a właściwości mechaniczne poprawiają się. Najlepsze efekty uzyskano w środkowej i końcowej części pręta, gdzie warunki procesu KOBO były najbardziej stabilne.

Rola krzemu i faz międzymetalicznych w stopie AlSi11

Stop AlSi11 należy do grupy odlewniczych stopów aluminium i krzemu, a jego właściwości w dużym stopniu zależą od tego, jak wygląda i jak jest rozmieszczony krzem eutektyczny oraz fazy międzymetaliczne.

W materiale w stanie odlewniczym cząstki krzemu charakteryzowały się nieregularną morfologią oraz niejednorodnym rozmieszczeniem. W wyniku procesu wyciskania metodą KOBO obserwowano stopniowe rozdrobnienie cząstek krzemu oraz bardziej równomierne ich rozmieszczenie w osnowie α-Al. Zmiany te były szczególnie wyraźne wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania oraz częstotliwości oscylacji matrycy.

Przeprowadzone obserwacje mikrostrukturalne wykazały, że zwiększenie intensywności procesu prowadziło do ograniczenia lokalnych skupisk faz wtórnych oraz bardziej jednorodnego rozmieszczenia cząstek krzemu w całej objętości materiału. Jednocześnie zmniejszały się charakterystyczne wymiary wydzieleń, a mikrostruktura stopniowo traciła cechy typowe dla materiału w stanie odlewniczym.

Obserwowane zmiany morfologii i rozmieszczenia krzemu są zgodne z wynikami badań wytrzymałościowych i pomiarów mikrotwardości. Warianty procesu, w których struktura była bardziej rozdrobniona, a fazy wtórne rozłożone równomiernie, charakteryzowały się jednocześnie wyższą mikrotwardością i lepszymi parametrami wytrzymałościowymi. To jasno pokazuje, że przebudowa mikrostruktury ma kluczowe znaczenie dla właściwości wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO. Analiza mikrostruktur wskazuje również, że bardziej jednorodne rozmieszczenie cząstek krzemu sprzyja ograniczeniu lokalnych niejednorodności mikrostrukturalnych. W materiale po wyciskaniu metodą KOBO obserwowano bardziej równomierny rozkład składników strukturalnych niż w materiale wyjściowym, co znajduje odzwierciedlenie również w bardziej jednorodnym rozkładzie mikrotwardości wzdłuż długości pręta.

Wyniki badań jasno pokazują, że krzem eutektyczny i fazy międzymetaliczne mają duży wpływ na to, jak wygląda mikrostruktura wyrobów ze stopu AlSi11 po procesie KOBO. To, że te elementy stają się drobniejsze i rozkładają się bardziej równomiernie w osnowie alfa-Al, przekłada się bezpośrednio na lepsze właściwości mechaniczne i większą jednorodność materiału.

Synteza wpływu procesu KOBO na mikrostrukturę i właściwości wyrobów ze stopu AlSi11

Badania mikrostruktury, pomiary mikrotwardości oraz analiza właściwości mechanicznych pokazują, że lepsze parametry wyrobów ze stopu AlSi11 po wyciskaniu metodą KOBO wynikają z kilku zjawisk zachodzących jednocześnie podczas intensywnego odkształcania plastycznego. W trakcie procesu doszło do przebudowy mikrostruktury, co objawiło się rozdrobnieniem składników, bardziej równomiernym rozmieszczeniem cząstek krzemu oraz ujednoliceniem osnowy aluminiowej. Te zmiany przełożyły się bezpośrednio na wzrost mikrotwardości i poprawę wytrzymałości badanego stopu.

Proces KOBO przyniósł istotny efekt w postaci wyraźnego rozdrobnienia mikrostruktury. W miarę jak zwiększano współczynnik wyciskania i częstotliwość oscylacji matrycy, cechy typowe dla struktury odlewniczej stopniowo zanikały, a składniki mikrostruktury zaczęły układać się coraz bardziej równomiernie. Najbardziej jednorodną strukturę udało się uzyskać przy najwyższym współczynniku wyciskania wynoszącym 100 oraz częstotliwości oscylacji

na poziomie 7 Hz. Ważną kwestią podczas przebudowy mikrostruktury była też fragmentacja cząstek krzemu i ich lepsza dyspersja w osnowie Al-Si. W porównaniu do materiału wyjściowego, cząstki krzemu stały się mniejsze i rozłożyły się znacznie bardziej równomiernie. To z kolei pokrywa się z zaobserwowanym wzrostem mikrotwardości oraz poprawą właściwości mechanicznych materiału.

Ważnym elementem przebudowy mikrostruktury była również fragmentacja cząstek krzemu oraz ich bardziej równomierna dyspersja w osnowie α-Al. W porównaniu z materiałem wyjściowym cząstki krzemu charakteryzowały się mniejszymi rozmiarami oraz bardziej jednorodnym rozmieszczeniem, co pozostaje zgodne z obserwowanym wzrostem mikrotwardości i poprawą właściwości mechanicznych.

Pomiary mikrotwardości pokazały też, że wraz z postępem procesu właściwości materiału stawały się coraz bardziej jednorodne. Najwyższe wyniki uzyskano w środkowej oraz końcowej części pręta, co wynikało z najbardziej stabilnych warunków podczas obróbki. Zauważono jednak różnice między kierunkiem poprzecznym a wzdłużnym, co sugeruje, że po wyciskaniu właściwości mechaniczne materiału nie są jednakowe w każdym kierunku.

Wyniki jasno pokazują, że metoda KOBO to skuteczny sposób na modyfikację mikrostruktury odlewniczego stopu AlSi11. Odpowiedni dobór parametrów procesu umożliwia uzyskanie bardziej jednorodnej i rozdrobnionej mikrostruktury.

Stop Al 5083 należy do serii 5xxx, gdzie głównym dodatkiem jest magnez. Jego mikrostruktura opiera się na osnowie α-Al oraz wydzieleniach faz międzymetalicznych, które zawierają głównie magnez i mangan. W przeciwieństwie do stopów odlewniczych Al-Si, stop Al 5083 nie posiada eutektyki krzemowej. Dzięki temu jego struktura jest bardziej jednorodna i znacznie lepiej poddaje się odkształcaniu plastycznemu.

Sama metoda KOBO polega na wykorzystaniu oscylacyjnego ruchu matrycy, co powoduje, że materiał jest odkształcany w cykliczny sposób, zmieniając kierunek nacisku. Z literatury wynika, że taki rodzaj deformacji może prowadzić do przebudowy mikrostruktury. Obejmuje to między innymi rozdrobnienie ziaren, zmiany w strukturze dyslokacyjnej oraz procesy zdrowienia i rekrystalizacji, które zachodzą podczas intensywnego odkształcania. To, jak głębokie będą te zmiany, zależy od właściwości samego materiału oraz parametrów procesu, takich jak częstotliwość oscylacji matrycy czy współczynnik wyciskania.

W tej pracy mikrostrukturę oceniano przy użyciu mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej. Przeanalizowano próbki przygotowane przy różnych współczynnikach wyciskania i częstotliwościach oscylacji, skupiając się na morfologii struktury, jej jednorodności oraz cechach widocznych na przekrojach poprzecznych i wzdłużnych prętów.

Uzyskane obserwacje zestawiono z wynikami badań mikrotwardości oraz właściwości wytrzymałościowych. Dzięki temu udało się ocenić, jak zmiany w mikrostrukturze wpływają na właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO.

W kolejnych podrozdziałach przeanalizowano mikrostruktury uzyskane przy różnych parametrach procesu. Porównano tam, jak częstotliwość oscylacji matrycy oraz współczynnik wyciskania kształtują obraz struktury badanego wyrobu.

Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083-wpływ częstotliwości oscylacji matrycy

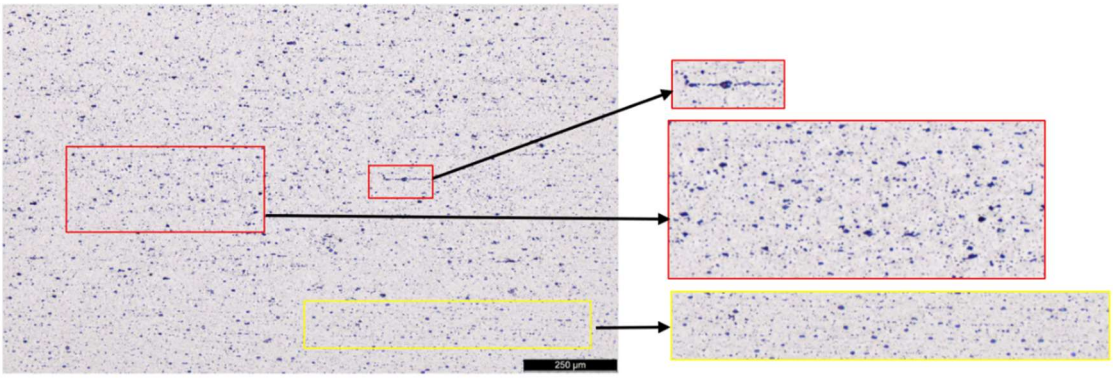
W celu oceny wpływu częstotliwości oscylacji matrycy na mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083, przeprowadzono obserwacje metalograficzne próbek wykonanych metodą KOBO. Badania prowadzono przy częstotliwościach 3, 5 i 7 Hz, zachowując przy tym stały współczynnik wyciskania wynoszący 100. Analizę wykonano przy użyciu mikroskopii świetlnej, skupiając się na charakterze mikrostruktury, rozmieszczeniu widocznych wydzieleń oraz ewentualnej kierunkowości struktury. Rysunek 6.61 pokazuje mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083, które zostały poddane wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania wynoszącym 100 i częstotliwości oscylacji matrycy na poziomie 3 Hz.

Na zdjęciu mikrostruktury widać jasną osnowę aluminiową, w której rozproszone są liczne ciemne wydzielenia o różnej wielkości. Większość z nich to drobne punkty, które są równomiernie rozmieszczone na całym przekroju. Nie widać tutaj żadnych miejsc, gdzie te wydzielenia gromadziłyby się w większym skupisku.

Fragment zaznaczony czerwoną ramką pokazuje fragment struktury z bardzo regularnym rozmieszczeniem tych drobnych cząstek. Choć mają one różne kształty i rozmiary, to zdecydowanie przeważają te najmniejsze, które wypełniają cały obserwowany obszar.

Na dodatkowym powiększeniu w górnej części zdjęcia można dostrzec pojedyncze, wydłużone wydzielenie.

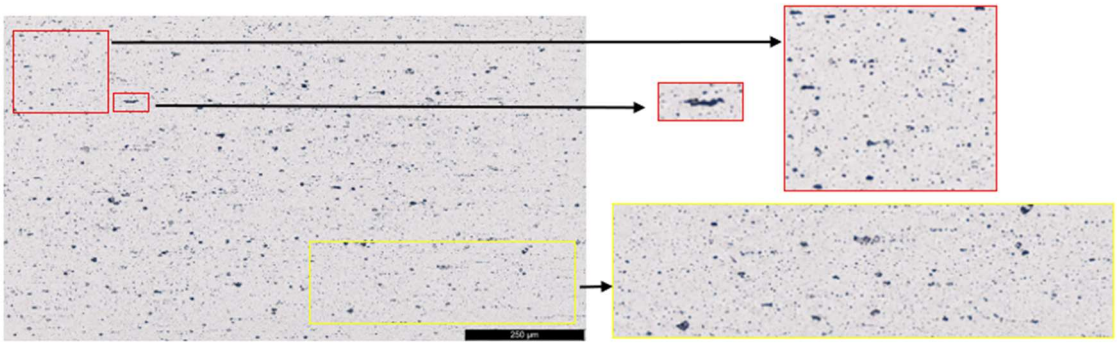
Wyraźnie odcina się ono od reszty ze względu na swój większy rozmiar i wydłużony kształt, ale takie obiekty pojawiają się w badanym polu tylko sporadycznie. Obszar zaznaczony żółtą ramką wykazuje morfologię zbliżoną do pozostałej części obserwowanego pola. Widać tam drobne wydzielenia ułożone wzdłuż poziomej linii przekroju, ale nie tworzą one żadnych wyraźnych pasm ani zwartych skupisk.



Rysunek 6.61 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz wraz z powiększeniem wybranych obszarów charakterystycznych mikrostruktury.

Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że w analizowanej mikrostrukturze drobne wydzielenia są równomiernie rozłożone w osnowie aluminiowej. Na obrazie widać głównie bardzo małe cząstki, natomiast większe i wydłużone elementy pojawiają się tylko pojedynczo.

Na rysunku 6.62 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz.



Rysunek 6.62 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO przy współczynniku wyciskania=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz wraz z powiększeniem wybranych obszarów przedstawiających jednorodny rozkład wydzieleń faz międzymetalicznych oraz lokalne wydłużenie wydzielenia w kierunku płynięcia materiału.

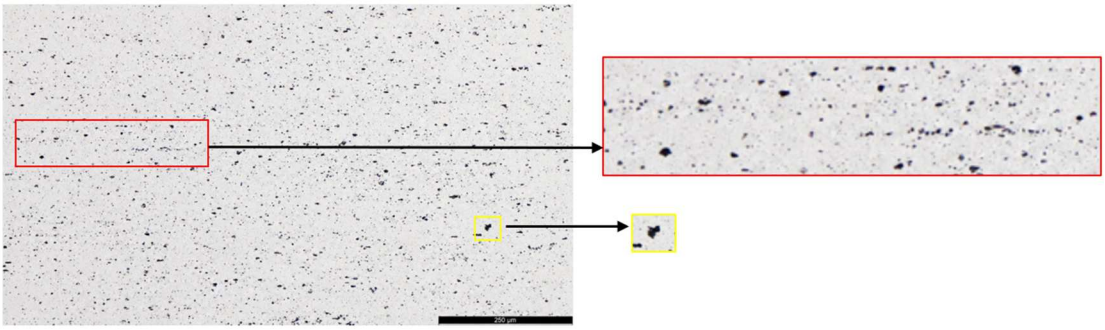
Na zdjęciu mikrostruktury widać jasną osnowę aluminiową, w której rozproszone są liczne ciemne wydzielenia o różnej wielkości i kształcie. Większość z nich to drobne punkty, które są równomiernie rozmieszczone na całym badanym przekroju. W analizowanym obszarze nie widać żadnych miejsc, gdzie te wydzielenia gromadziłyby się w większym skupisku. Powiększenie zaznaczone czerwoną ramką pokazuje fragment struktury z bardzo regularnym rozkładem drobnych cząstek. Oprócz nich można dostrzec pojedyncze, nieco większe wydzielenia.

Na dodatkowym powiększeniu widać jedno wydłużone wydzielenie, które wyraźnie różni się kształtem od otaczających cząstek. Takie wydłużone cząstki pojawiają się tylko miejscami i nie stanowią głównego elementu tej mikrostruktury. Obszar w żółtej ramce to kolejny fragment próbki, gdzie w osnowie aluminium również obserwuje się równomierne rozmieszczenie drobnych wydzieleń.

Choć widać tam pojedyncze większe cząstki oraz sporadyczne, wydłużone formy, nie tworzą one żadnych wyraźnych skupisk ani ciągłych pasm. Porównując mikrostrukturę próbki wyciskanej z częstotliwością 5 Hz z tą uzyskaną przy 3 Hz, można zauważyć, że sposób rozmieszczenia wydzieleń jest bardzo podobny. W obu przypadkach dominują drobne cząstki rozproszone po całym przekroju, a wydłużone elementy występują tylko pojedynczo. Różnice między nimi mają charakter jakościowy i zostaną omówione razem z wynikami dla pozostałych parametrów procesu w końcowej części analizy.

Na rysunku 6.63 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz.

Na zdjęciu mikrostruktury widać jasną osnowę aluminiową, w której rozproszone są liczne ciemne wydzielenia o różnym kształcie i wielkości. Większość z nich ma drobny, punktowy charakter i jest równomiernie rozmieszczona na całym badanym przekroju. W analizowanym obszarze nie widać żadnych miejsc, w których wydzielenia gromadziłyby się w większym skupisku.

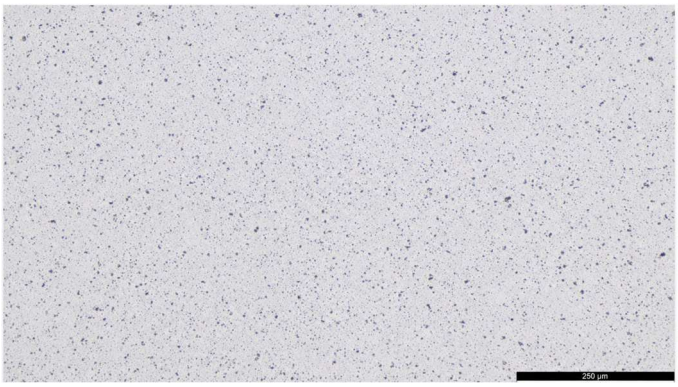


Rysunek 6.63 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO przy współczynniku wyciskania=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz wraz z powiększeniem wybranych obszarów charakterystycznych mikrostruktury.

Powiększenie w czerwonej ramce pokazuje fragment mikrostruktury, w którym w osnowie aluminiowej obserwuje się liczne drobne wydzielenia. Oprócz nich można dostrzec pojedyncze, większe cząstki o nieregularnych kształtach, ale nie tworzą one żadnych ciągłych pasm ani wyraźnych skupisk. Z kolei fragment zaznaczony żółtą ramką przedstawia jedno takie większe wydzielenie.

Wyraźnie odcina się ono od otaczających je drobniejszych cząstek. Takie obiekty pojawiają się tylko miejscami i stanowią niewielką część badanego obszaru. Porównując obrazy mikrostruktury dla częstotliwości 3 Hz, 5 Hz i 7 Hz, zauważyć można, że we wszystkich przypadkach dominują drobne wydzielenia rozproszone w aluminium. W próbce wyciskanej przy 7 Hz nie widać wyraźnych skupisk wydzieleń ani ciągłych pasm faz wtórnych. Różnice między poszczególnymi wariantami są raczej jakościowe, więc zostaną omówione zbiorczo w podsumowaniu wraz z odniesieniem do wyników badań mikrotwardości.

Na rysunku 6.64 widać mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083, które zostały wyciśnięte metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ= 100 i częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz. Obraz przedstawia przekrój poprzeczny. Na zdjęciu mikrostruktury widać jasną osnowę stopu z licznymi ciemnymi wydzieleniami o różnych rozmiarach i kształtach. Większość z nich to drobne punkty rozproszone równomiernie na całym przekroju. Sporadycznie występują większe wydzielenia o nieregularnych kształtach.



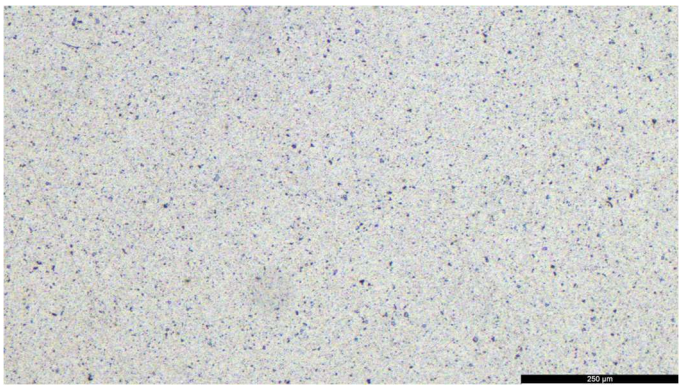
Rysunek 6.64 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO (λ=100, *f*=3 Hz) -przekrój poprzeczny. Widoczna jest jednorodna osnowa z równomiernie rozmieszczonymi drobnymi wydzieleniami faz wtórnych, bez wyraźnych oznak pasmowania struktury.

Wydzielenia są rozmieszczone dość równomiernie na całym badanym obszarze. Nie widać żadnych wyraźnych skupisk cząstek ani ciągłych pasm, które tworzyłyby specyficzne wzory. Cała powierzchnia zgładu ma bardzo podobny charakter mikrostrukturalny. Na pokazanym przekroju nie dostrzeżono żadnych nieciągłości materiału, takich jak pęknięcia, pustki czy skupiska porów. Nie ma też miejsc, których morfologia znacząco odbiegałaby od reszty próbki. Obraz ten posłuży jako punkt odniesienia do porównania z wynikami uzyskanymi przy wyższych częstotliwościach oscylacji matrycy (5 Hz i 7 Hz), co zostanie omówione w kolejnych podrozdziałach.

Na rysunku 6.65 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wydłużenia λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz, obserwowaną na przekroju poprzecznym.

Na zdjęciu mikrostruktury widać jasną osnowę stopu, w której na całej powierzchni zgładu rozproszone są liczne ciemne wydzielenia faz wtórnych. Większość z nich to drobne, punktowe cząstki, przy sporadycznym występowaniu większych cząstek o nieregularnych

kształtach. Są one rozmieszczone dość równomiernie, więc nie widać żadnych wyraźnych skupisk ani obszarów koncentracji.



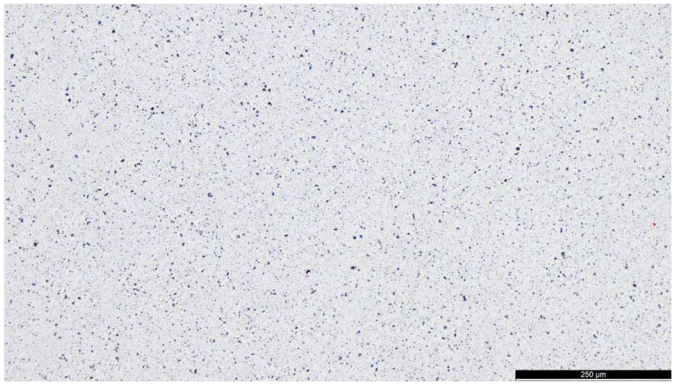
Rysunek 6.65 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz (przekrój poprzeczny). Widoczna jest jednorodna osnowa z równomiernie rozmieszczonymi drobnymi wydzieleniami faz wtórnych. Nie obserwuje się pasmowania struktury ani lokalnych skupisk wydzieleń, co świadczy o wysokim stopniu homogenizacji materiału po procesie KOBO.

W porównaniu z próbką odkształcaną przy 3 Hz, obserwuje się bardziej równomierne rozmieszczenie składników mikrostruktury. Wydzielenia są równomiernie rozproszone w całym badanym obszarze, a różnice w ich zagęszczeniu są minimalne. Nie widać też wyraźnych pasm, które mogłyby być tworzone przez cząstki faz wtórnych. Na przekroju poprzecznym nie ma żadnego dominującego kierunku rozmieszczenia wydzieleń, co jest naturalne przy tego typu obserwacjach. Mikrostruktura wygląda podobnie na całej powierzchni zgładu i nie widać tu żadnych lokalnych zmian morfologii.

W badanym obszarze nie znaleziono żadnych pęknięć, rozwarstwień, porów ani innych wad materiałowych. Widoczne ciemne obszary zinterpretowano jako cząstki faz wtórnych typowe dla stopu Al 5083, a ich wielkość i rozmieszczenie są zbliżone w całym polu widzenia. W zestawieniu z wariantem 3 Hz mikrostruktura jest wyraźnie bardziej jednorodna, a wydzielenia rozkładają się równomierniej.

Te obserwacje pokrywają się z wynikami badań mikrotwardości, ponieważ próbka wyciskana przy 5 Hz uzyskała wyższe wartości. Obserwacje te sugerują, że wyższa częstotliwość oscylacji matrycy sprzyja ujednorodnieniu mikrostruktury i uzyskać bardziej spójne właściwości materiału.

Na rysunku 6.66 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wydłużenia λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz, obserwowaną na przekroju poprzecznym.



Rysunek 6.66 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz (przekrój poprzeczny). Widoczna jest jednorodna osnowa z równomiernie rozmieszczonymi drobnymi wydzieleniami faz wtórnych. Nie obserwuje się pasmowania struktury, lokalnych skupisk wydzieleń ani nieciągłości materiałowych, co świadczy o wysokim stopniu homogenizacji uzyskanym podczas procesu KOBO.

W obserwowanym obszarze mikrostruktura wykazuje niewielkie zróżnicowanie. Obserwuje się jasną osnowę, w której równomiernie rozłożone są liczne, drobne wydzielenia faz wtórnych. Na całym badanym obszarze nie widać żadnych wyraźnych zmian w morfologii ani miejsc, gdzie cząstki gromadziłyby się w większym skupisku. Większość tych wydzieleń jest mała i ma nieregularny kształt, a większe cząstki pojawiają się tylko sporadycznie. Analiza przekroju poprzecznego nie wykazała żadnego preferowanego kierunku rozmieszczenia wydzieleń ani pasmowania struktury.

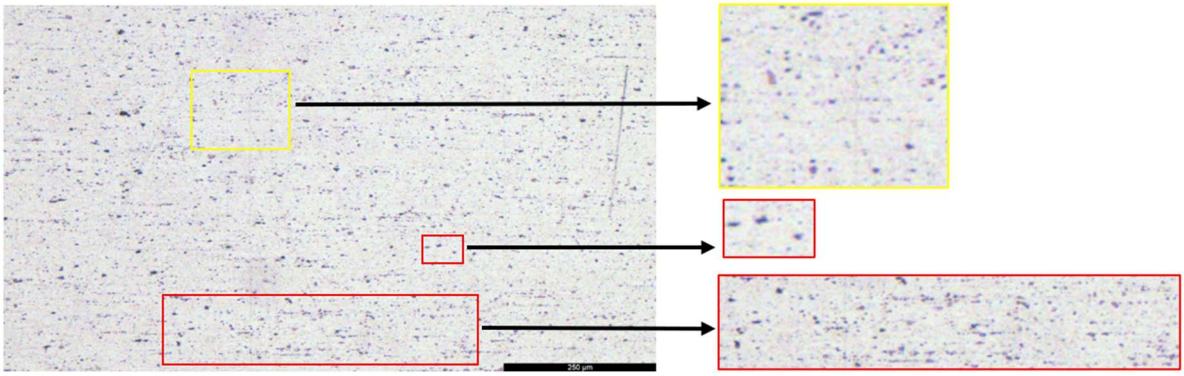
Rozkład cząstek jest podobny w całym polu obserwacji, co dowodzi, że obserwowany obszar wykazuje jednorodną mikrostrukturę. Co ważne, nie stwierdzono też żadnych pęknięć, rozwarstwień, porowatości ani innych wad materiałowych. Jeśli porównamy to z próbkami odkształcanymi przy 3 Hz i 5 Hz, mikrostruktura dla 7 Hz ma podobny charakter, ale drobne wydzielenia wydają się być jeszcze bardziej wyrównane. Nie ma tu lokalnych skupisk ani obszarów o innej morfologii, co potwierdza wysoki stopień jednorodności struktury. Te obserwacje pokrywają się z wynikami badań mikrotwardości opisanymi wcześniej.

Dla częstotliwości 7 Hz odnotowano najwyższą mikrotwardość spośród wszystkich badanych wariantów. Sugeruje to, że wyższa częstotliwość oscylacji matrycy pomaga lepiej

ukształtować mikrostrukturę i uzyskać bardziej jednolite właściwości mechaniczne stopu Al 5083. Obraz mikrostruktury potwierdza, że przy parametrach procesu λ= 100 oraz 7 Hz można uzyskać materiał o wysokim stopniu homogenizacji, z równomiernie rozmieszczonymi wydzieleniami i ciągłą, jednorodną osnową. Wyniki te dowodzą, że proces KOBO jest bardzo skuteczny w kształtowaniu mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083.

Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083-wpływ stopnia λ

Na rysunku 6.67 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=36 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. W analizowanym obszarze widoczna jest jednorodna osnowa stopu z równomiernie rozmieszczonymi drobnymi wydzieleniami faz wtórnych.



Rysunek 6.67 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO przy współczynniku wyciskania=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz wraz z powiększeniem wybranych obszarów charakterystycznych mikrostruktury.

Powiększenie oznaczone żółtą ramką przedstawia fragment mikrostruktury o jednorodnym rozmieszczeniu drobnych wydzieleń w osnowie aluminiowej. Nie obserwuje się lokalnych skupisk cząstek ani wyraźnych zmian ich zagęszczenia, co świadczy o dobrym stopniu homogenizacji materiału.

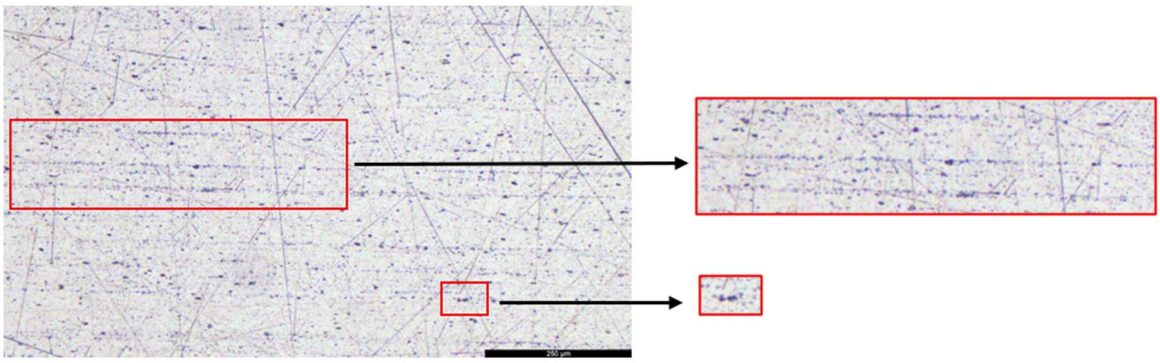
Powiększenie zaznaczone małą czerwoną ramką ukazuje pojedyncze wydłużone wydzielenie fazy wtórnej. Tego typu cząstki występują sporadycznie i nie dominują w obrazie mikrostruktury. Ich obecność jest charakterystyczna dla stopów Al-Mg zawierających niewielką ilość faz międzymetalicznych.

Największe powiększenie, oznaczone czerwoną ramką, obejmuje obszar, w którym można zauważyć delikatnie zaznaczone pasmowe ułożenie drobnych wydzieleń. Kierunkowość ta jest jednak słabo rozwinięta i nie prowadzi do powstawania wyraźnych stref koncentracji odkształcenia. Mikrostruktura zachowuje jednorodny charakter na całej powierzchni zgładu.

W analizowanym obszarze nie stwierdzono obecności pęknięć, porowatości ani innych nieciągłości materiałowych. Na zdjęciu widać, że osnowa zachowała swoją ciągłość, a fazy wtórne są równomiernie rozproszone po procesie wyciskania. Jeśli porównamy to z próbkami przy większych współczynnikach (gdzie λ=60 lub 100), to przy wartości 36 efekty homogenizacji i przebudowy struktury są nieco mniej wyraźne. Obserwacja ta jest zgodna z wynikami pomiarów mikrotwardości, które pokazują, że im większy współczynnik wyciskania, tym łatwiej uzyskać bardziej jednorodne właściwości mechaniczne i intensywniejszą przebudowę mikrostruktury.

Na rysunku 6.68 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=60 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Mikrostruktura charakteryzuje się jednorodnym obrazem jasnej osnowy stopu aluminium, w której równomiernie rozmieszczone są liczne drobne wydzielenia faz wtórnych. Większość wydzieleń ma niewielkie rozmiary i nieregularny kształt, a ich rozkład jest zbliżony na całej powierzchni obserwowanego zgładu.

Powiększenie oznaczone dużą czerwoną ramką przedstawia reprezentatywny obszar mikrostruktury, w którym widoczne jest równomierne rozmieszczenie drobnych wydzieleń w osnowie α-Al. Nie obserwuje się wyraźnych skupisk cząstek ani obszarów o zwiększonej koncentracji faz wtórnych, co wskazuje na wysoki stopień homogenizacji materiału po procesie KOBO. Widoczne wydzielenia mają głównie punktowy charakter, natomiast pojedyncze cząstki wykazują nieznaczne wydłużenie.



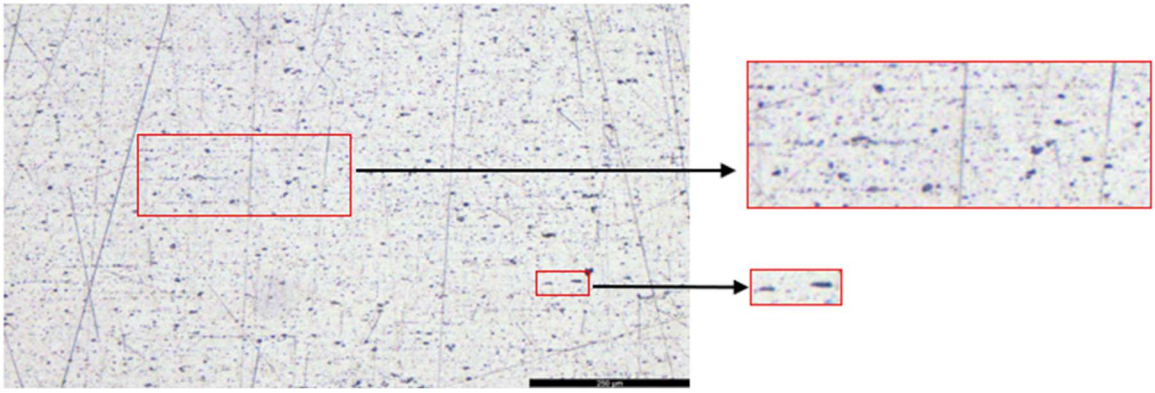
Rysunek 6.68 Mikrostruktura wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy λ=60 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz z zaznaczonymi charakterystycznymi obszarami jednorodnej osnowy α-Al oraz drobnych wydzieleń faz międzymetalicznych.

Mniejsze powiększenie obejmuje pojedyncze wydzielenie fazy wtórnej o wydłużonym kształcie. Cząstki tego typu występują lokalnie i nie dominują w obrazie mikrostruktury. Ich obecność jest typowa dla stopu Al 5083 i nie wpływa na ogólną jednorodność obserwowanej struktury.

Na obrazie widoczne są również cienkie rysy powstałe podczas przygotowania zgładu metalograficznego. Stanowią one artefakty procesu szlifowania i polerowania, dlatego nie są elementami mikrostruktury badanego materiału i nie wpływają na interpretację uzyskanych wyników.

W porównaniu z próbką wyciskaną przy λ=36 mikrostruktura dla λ=60 wykazuje bardziej jednorodny charakter oraz bardziej równomierne rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych. Nie obserwuje się wyraźnej pasmowości ani lokalnych niejednorodności, co pozostaje zgodne z wynikami badań mikrotwardości i wskazuje, że zwiększenie współczynnika wyciskania sprzyja uzyskaniu bardziej jednorodnej struktury oraz korzystniejszego rozkładu właściwości mechanicznych wyrobów ze stopu Al 5083.

Na Rysunek 6.69 przedstawiono mikrostrukturę wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Mikrostruktura charakteryzuje się jednorodnym obrazem jasnej osnowy stopu aluminium, w której równomiernie rozmieszczone są liczne drobne wydzielenia faz wtórnych. W całym analizowanym obszarze nie obserwuje się wyraźnych zmian morfologii ani lokalnych skupisk wydzieleń, co wskazuje na wysoki stopień homogenizacji materiału.



Rysunek 6.69 Mikrostruktura stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz z zaznaczonymi charakterystycznymi obszarami jednorodnej osnowy α-Al oraz równomiernie rozmieszczonych drobnych wydzieleń faz międzymetalicznych.

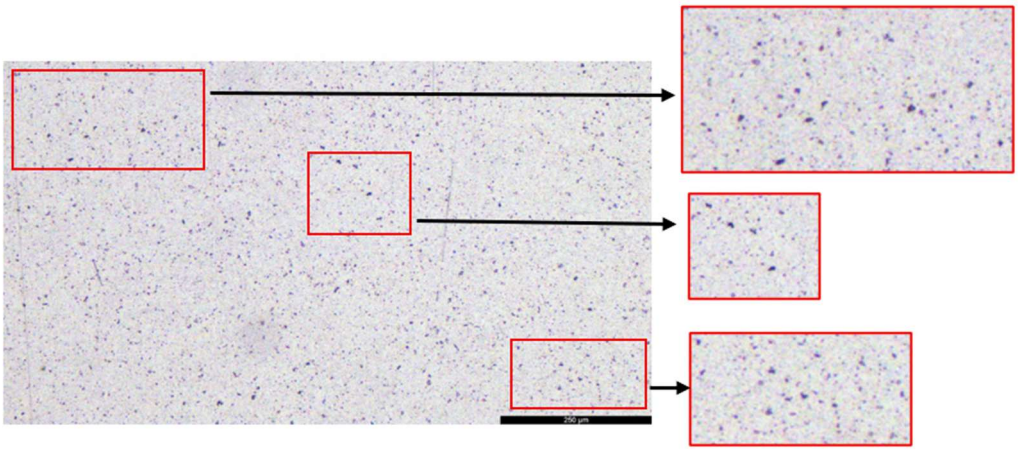
Powiększenie oznaczone dużą czerwoną ramką przedstawia reprezentatywny fragment mikrostruktury o równomiernym rozmieszczeniu drobnych cząstek faz wtórnych. Widoczne wydzielenia mają głównie niewielkie rozmiary oraz nieregularny kształt, a ich zagęszczenie pozostaje zbliżone w całym obserwowanym obszarze. Nie stwierdzono występowania wyraźnych stref segregacji ani pasmowego rozmieszczenia cząstek.

Drugie powiększenie przedstawia pojedyncze wydłużone wydzielenie fazy wtórnej. Tego typu cząstki występują sporadycznie i nie dominują w obrazie mikrostruktury. Ich obecność jest charakterystyczna dla stopu Al 5083 i nie wpływa na ogólną jednorodność struktury materiału.

Na powierzchni zgładu widoczne są również pojedyncze rysy technologiczne powstałe podczas przygotowania próbki metalograficznej. Stanowią one artefakty procesu szlifowania i polerowania i nie są elementem mikrostruktury badanego wyrobu.

W porównaniu z próbkami otrzymanymi dla λ=36 oraz λ=60, mikrostruktura uzyskana przy λ=100 wykazuje najbardziej jednorodny charakter. Rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych jest bardziej wyrównane, a lokalne różnice w ich zagęszczeniu są niewielkie. Obserwacje te pozostają zgodne z wynikami wcześniejszych badań mikrotwardości oraz potwierdzają, że zwiększenie współczynnika wyciskania w procesie KOBO sprzyja uzyskaniu materiału o bardziej jednorodnej strukturze i równomiernym rozkładzie właściwości mechanicznych.

Na rysunku 6.70 przedstawiono mikrostrukturę przekroju poprzecznego wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=36 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Mikrostruktura składa się z jasnej osnowy α-Al, w której równomiernie rozmieszczone są liczne drobne wydzielenia faz wtórnych. Na przekroju poprzecznym wydzielenia mają głównie kształt punktowy lub lekko owalny, co wynika z kierunku obserwacji prostopadłego do kierunku wyciskania.



Rysunek 6.70 Mikrostruktura przekroju poprzecznego wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=36 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz z zaznaczonymi charakterystycznymi obszarami jednorodnej osnowy α-Al oraz równomiernie rozmieszczonych drobnych wydzieleń faz międzymetalicznych.

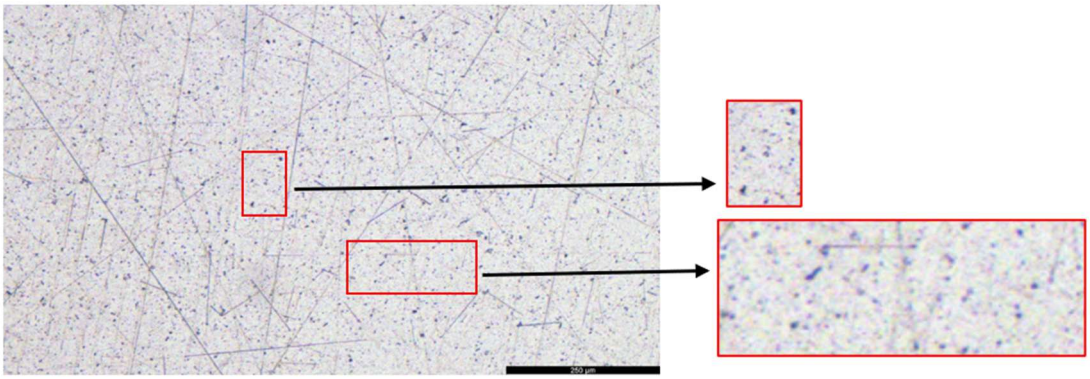
Powiększenia przedstawiają reprezentatywne fragmenty mikrostruktury, w których dobrze widoczne jest równomierne rozmieszczenie drobnych wydzieleń w osnowie stopu. Większość cząstek ma niewielkie rozmiary i nieregularny kształt, natomiast większe wydzielenia występują sporadycznie. Nie obserwuje się wyraźnych obszarów segregacji ani skupisk faz wtórnych.

Na przekroju poprzecznym nie stwierdzono uprzywilejowanego kierunku rozmieszczenia wydzieleń ani wyraźnej pasmowości mikrostruktury. Rozkład cząstek pozostaje stosunkowo jednorodny w całym analizowanym obszarze, co wskazuje na korzystny wpływ procesu KOBO na homogenizację materiału już przy współczynniku wyciskania λ=36.

W obrazie widoczne są również pojedyncze rysy powstałe podczas przygotowania zgładu metalograficznego. Stanowią one artefakty procesu szlifowania i polerowania i nie są elementem mikrostruktury badanego wyrobu.

W porównaniu z próbkami uzyskanymi dla λ=60 oraz λ=100 mikrostruktura dla λ=36 zachowuje podobny charakter, jednak lokalnie można zauważyć nieco mniej wyrównane rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych. Mimo to materiał charakteryzuje się wysokim stopniem jednorodności, co pozostaje zgodne z wynikami badań mikrotwardości oraz potwierdza skuteczność procesu KOBO w ujednolicaniu mikrostruktury stopu Al 5083.

Na rysunku 6.71 przedstawiono mikrostrukturę przekroju poprzecznego wyrobu ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=60 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Mikrostruktura charakteryzuje się jednorodnym obrazem jasnej osnowy α-Al, w której równomiernie rozmieszczone są liczne drobne wydzielenia faz wtórnych. Większość wydzieleń ma niewielkie rozmiary oraz kształt punktowy lub lekko owalny, typowy dla obserwacji przekroju poprzecznego.



Rysunek 6.71 Mikrostruktura przekroju poprzecznego wyrobu ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=60 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz z zaznaczonymi charakterystycznymi obszarami jednorodnej osnowy α-Al oraz równomiernie rozmieszczonych drobnych wydzieleń faz międzymetalicznych.

Powiększenie oznaczone małą czerwoną ramką przedstawia reprezentatywny fragment mikrostruktury z równomiernie rozmieszczonymi drobnymi wydzieleniami faz wtórnych. Widoczne cząstki są niewielkie i rozmieszczone w sposób zbliżony na całej powierzchni analizowanego obszaru, bez wyraźnych stref ich koncentracji.

Drugie powiększenie obejmuje większy fragment zgładu, na którym również obserwuje się jednorodny rozkład wydzieleń w osnowie stopu. Nie stwierdzono obecności wyraźnych skupisk faz wtórnych ani uprzywilejowanego kierunku ich rozmieszczenia. Mikrostruktura zachowuje podobny charakter w całym analizowanym polu obserwacji.

Na powierzchni zgładu widoczne są liczne rysy powstałe podczas przygotowania próbki metalograficznej. Stanowią one artefakty procesu szlifowania i polerowania i nie są elementami mikrostruktury badanego materiału.

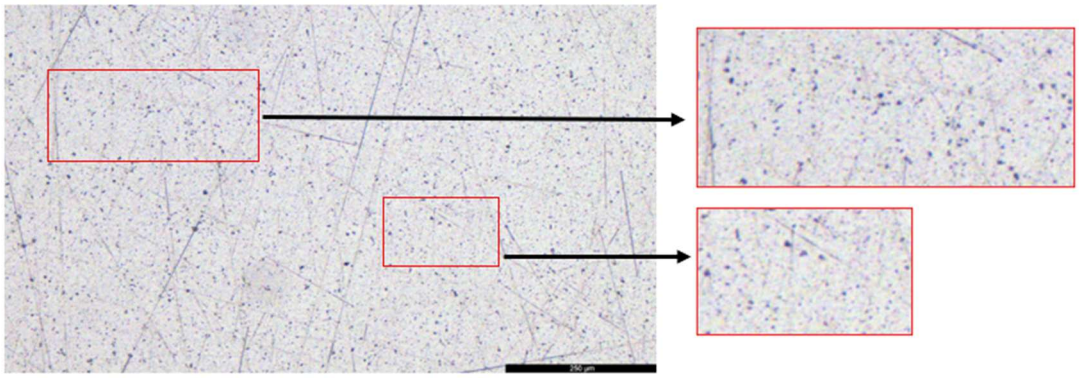
W porównaniu z próbką wyciskaną przy λ=36 mikrostruktura dla λ=60 wykazuje bardziej wyrównany obraz oraz bardziej jednorodne rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych. Jednocześnie zachowuje charakter zbliżony do próbki uzyskanej przy λ=100, co wskazuje, że zwiększenie współczynnika wyciskania sprzyja uzyskaniu bardziej jednorodnej mikrostruktury. Obserwacje te pozostają zgodne z wynikami badań mikrotwardości, które wskazują na korzystny wpływ procesu KOBO na ujednolicenie właściwości mechanicznych wyrobów ze stopu Al 5083.

Na rysunku 6.72 przedstawiono mikrostrukturę przekroju poprzecznego wyrobu ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 oraz częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz. Mikrostruktura charakteryzuje się jednorodnym obrazem jasnej osnowy α-Al, w której równomiernie rozmieszczone są liczne drobne wydzielenia faz wtórnych. W obserwowanym przekroju wydzielenia mają głównie kształt punktowy lub lekko owalny, typowy dla przekroju poprzecznego materiału po procesie wyciskania.

Powiększenie oznaczone górną czerwoną ramką przedstawia reprezentatywny fragment mikrostruktury, w którym widoczny jest jednorodny rozkład drobnych wydzieleń w osnowie stopu. Cząstki faz wtórnych rozmieszczone są równomiernie i nie wykazują tendencji do tworzenia większych skupisk ani stref o podwyższonej koncentracji.

Dolne powiększenie obejmuje kolejny charakterystyczny obszar zgładu, potwierdzający zachowanie podobnego charakteru mikrostruktury w całym analizowanym polu obserwacji. Nie obserwuje się wyraźnego uprzywilejowanego kierunku rozmieszczenia wydzieleń ani pasmowej budowy struktury, co świadczy o wysokiej jednorodności materiału po procesie KOBO.

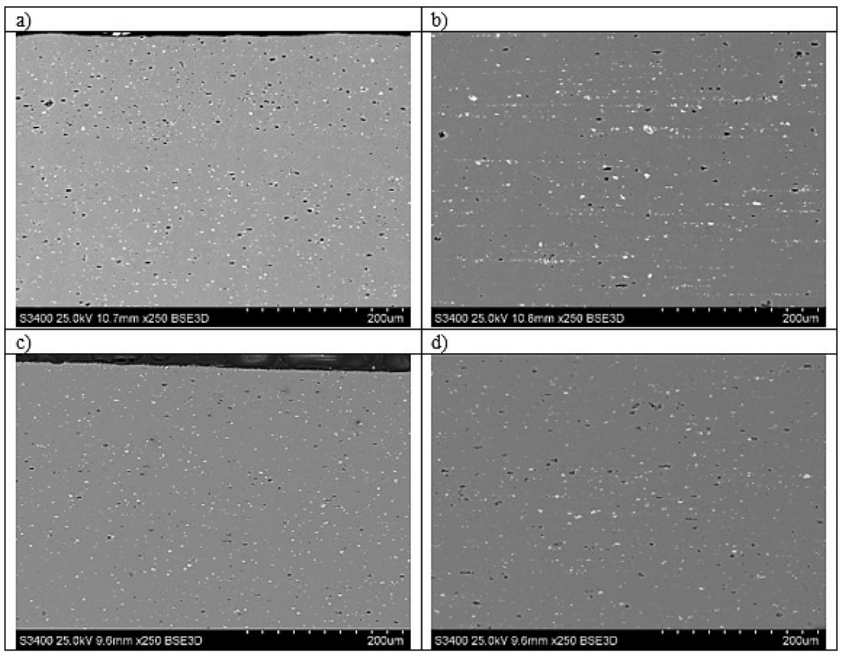
Na powierzchni zgładu widoczne są pojedyncze rysy technologiczne powstałe podczas przygotowania próbki metalograficznej. Stanowią one artefakty procesu szlifowania i polerowania i nie są elementami mikrostruktury badanego wyrobu.



Rysunek 6.72 Mikrostruktura przekroju poprzecznego stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO przy współczynniku wyciskania λ=100 i częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz z zaznaczonymi charakterystycznymi obszarami jednorodnej osnowy α-Al oraz równomiernie rozmieszczonych drobnych wydzieleń faz międzymetalicznych.

W porównaniu do próbek uzyskanych przy mniejszym współczynniku wyciskania (czyli dla wartości 36 oraz 60), mikrostruktura przy współczynniku 100 jest najbardziej jednorodna, a wydzielenia faz wtórnych rozkładają się w niej bardzo równomiernie. Wyniki te pokrywają się z badaniami mikrotwardości, które pokazują, że większy współczynnik wyciskania pomaga ujednolicić właściwości mechaniczne materiału. Co więcej, brak widocznych nieciągłości, porowatości czy miejsc o innej morfologii potwierdza, że proces wyciskania metodą KOBO przebiega stabilnie, co przekłada się na wysoką jakość uzyskanej mikrostruktury.

Obserwacje wykonane na przekrojach poprzecznych wykazały znacznie mniejszą kierunkowość rozmieszczenia wydzieleń niż w przekrojach podłużnych. Fazy wtórne mają głównie punktowy lub owalny kształt i są rozmieszczone stosunkowo równomiernie w osnowie aluminiowej. Pasmowy charakter mikrostruktury jest w tej płaszczyźnie znacznie słabiej widoczny, co wynika z przecięcia linii płynięcia materiału prostopadle do kierunku wyciskania.

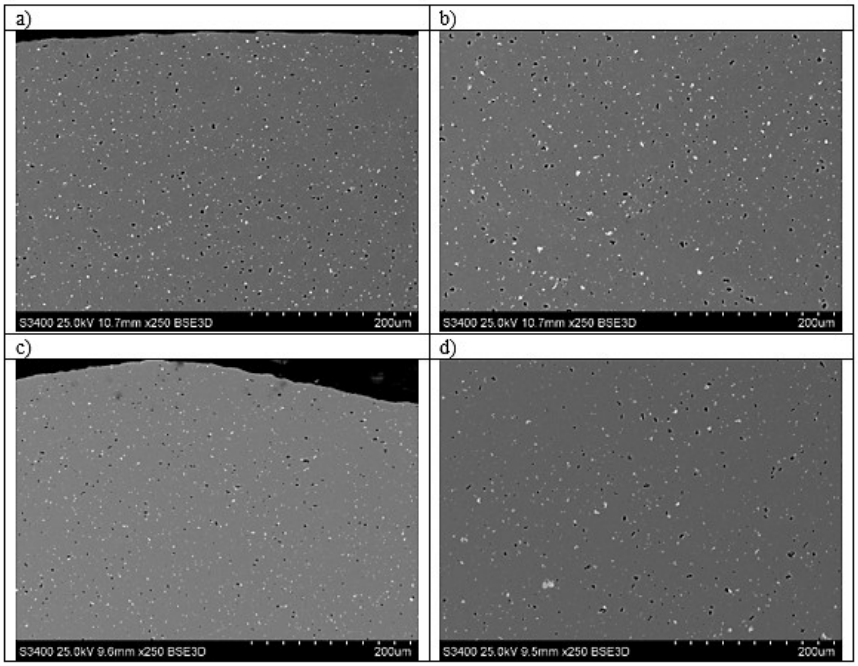


Rysunek 6.73 Mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO-przekrój podłużny. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) obszar przypowierzchniowy, (b) środkowa część próbki, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) obszar przypowierzchniowy, (d) środkowa część próbki.

Porównanie przekrojów podłużnych i poprzecznych potwierdza, że obserwowane różnice wynikają z orientacji składników mikrostruktury względem kierunku odkształcenia. W obu płaszczyznach obserwowane są te same składniki strukturalne, jednak ich pozorna morfologia oraz sposób rozmieszczenia zależą od kierunku wykonania przekroju względem kierunku płynięcia materiału.

Zaobserwowana orientacja faz wtórnych oraz ich pasmowy układ wskazują na istotny wpływ procesu KOBO na kształtowanie mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083.

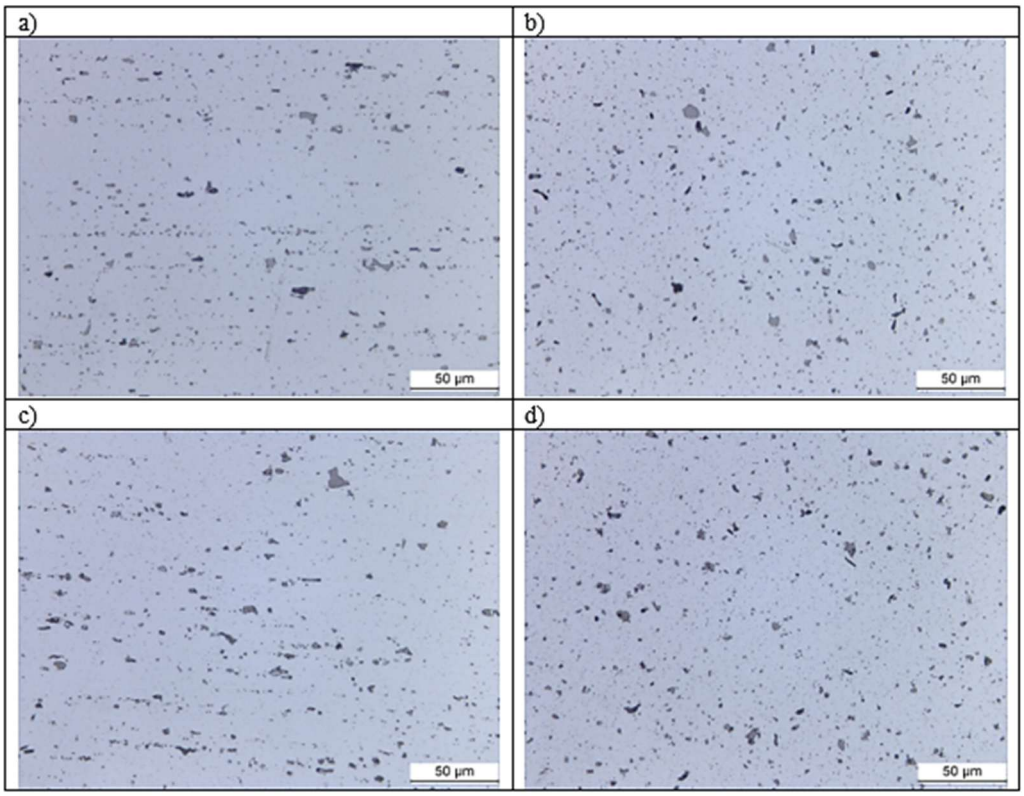
Jednocześnie brak wyraźnych nieciągłości strukturalnych oraz stosunkowo jednorodne rozmieszczenie wydzieleń w całym przekroju świadczą o stabilnym przebiegu procesu wyciskania oraz wysokiej jakości uzyskanego materiału.



Rysunek 6.74 Mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO-przekrój poprzeczny. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) obszar przypowierzchniowy, (b) środkowa część próbki, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) obszar przypowierzchniowy, (d) środkowa część próbki.

Obrazy SEM wykonane w trybie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) wykazały, że mikrostruktura stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO składa się z osnowy α-Al oraz równomiernie rozmieszczonych wydzieleń faz wtórnych o zróżnicowanym kontraście. Jasne wydzielenia odpowiadają fazom bogatszym w pierwiastki o wyższej liczbie atomowej, natomiast ciemniejsze wydzielenia związane są z fazami zawierającymi magnez i krzem. (Rysunek 6.75)

W przekrojach podłużnych obu analizowanych próbek widoczna jest orientacja wydzieleń zgodna z kierunkiem wyciskania. Dla próbki wyciskanej przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) pasmowy charakter mikrostruktury jest bardziej wyraźny, a rozmieszczenie faz wtórnych wykazuje większe zróżnicowanie pomiędzy strefą przypowierzchniową i centralną. Natomiast próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) charakteryzuje się bardziej jednorodnym rozkładem wydzieleń, przy jednoczesnym słabszym zaznaczeniu struktury pasmowej. W środkowej części próbki lokalnie obserwuje się skupiska większych wydzieleń, podczas gdy w obszarach przypowierzchniowych dominują drobniejsze i bardziej równomiernie rozmieszczone fazy wtórne.



Rysunek 6.75 Mikrostruktury przedstawiające stop Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) przekrój podłużny, (b) przekrój poprzeczny, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) przekrój podłużny, (d) przekrój poprzeczny.

W przekrojach poprzecznych kierunkowość rozmieszczenia wydzieleń jest znacznie mniej wyraźna. Fazy wtórne występują głównie w postaci punktowych lub nieregularnych wydzieleń rozłożonych stosunkowo równomiernie w osnowie aluminiowej. Różnice pomiędzy przekrojami podłużnymi i poprzecznymi wynikają z orientacji składników mikrostruktury względem kierunku płynięcia materiału podczas procesu KOBO i nie świadczą o występowaniu odmiennych składników strukturalnych.

Analiza zmian mikrostrukturalnych wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO z wykorzystaniem SEM

Analiza obrazów SEM wykonanych w trybie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) wykazała, że mikrostruktura próbek wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO składa się z osnowy α-Al oraz licznych wydzieleń faz wtórnych o zróżnicowanej morfologii i kontraście. Jasne wydzielenia obserwowane w obrazach BSE odpowiadają fazom bogatym w żelazo i mangan, natomiast ciemniejsze cząstki związane są z wydzieleniami zawierającymi magnez i krzem.

W przekrojach podłużnych obu analizowanych próbek widoczne jest wyraźne uporządkowanie wydzieleń zgodnie z kierunkiem wyciskania. Fazy wtórne tworzą pasma odpowiadające kierunkowi płynięcia materiału podczas procesu KOBO. Zjawisko to jest szczególnie dobrze widoczne w środkowej części próbek, gdzie pasma mają bardziej ciągły charakter i są wyraźniej zaznaczone niż w strefach przypowierzchniowych.

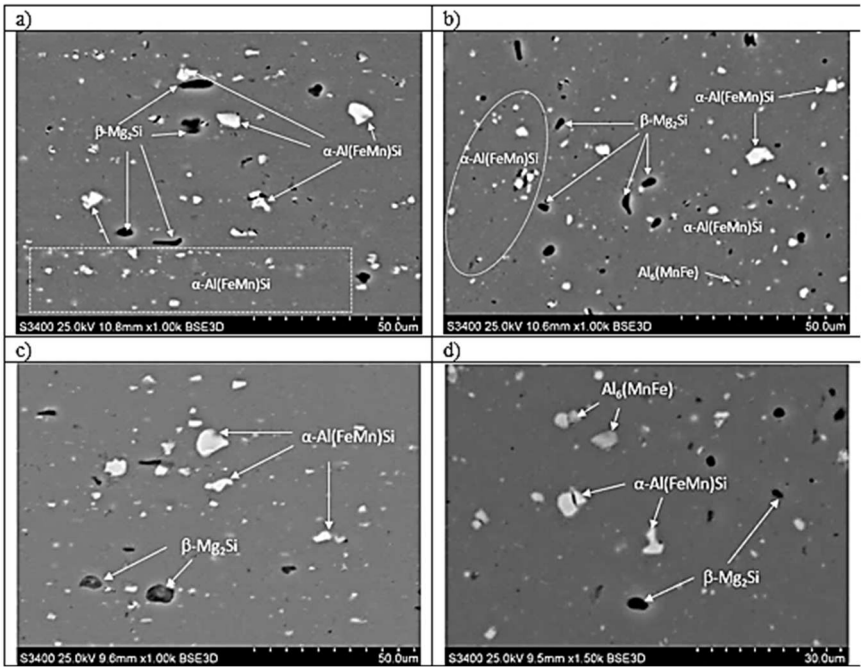
Analiza porównawcza obu wariantów procesu wykazała, że próbka wyciskana przy 7 Hz z wykorzystaniem matrycy o średnicy 10 mm (λ=36) cechuje się bardziej wyraźną strukturą pasmową oraz większym zróżnicowaniem rozmieszczenia faz wtórnych pomiędzy strefą przypowierzchniową a rdzeniem materiału. Z kolei w próbce wyciskanej przy 7 Hz z wykorzystaniem matrycy o średnicy 6 mm (λ=100) mikrostruktura wykazuje wyższy stopień jednorodności, a pasmowość jest mniej wyraźna. W części centralnej tej próbki obserwuje się jednak lokalne skupiska większych wydzieleń, natomiast w obszarach przypowierzchniowych przeważają drobniejsze i bardziej równomiernie rozmieszczone fazy wtórne. (Rysunek 6.73 i Rysunek 6.74)

Obserwacje wykonane metodą SEM oraz analizy punktowe EDS przeprowadzone na przekrojach podłużnych i poprzecznych potwierdziły obecność kilku typów wydzieleń charakterystycznych dla stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO. W mikrostrukturze zidentyfikowano jasne fazy międzymetaliczne bogate w Fe i Mn, które na podstawie składu chemicznego przypisano do faz α-Al (Fe, Mn) Si oraz Al_6 (Mn, Fe). Ponadto stwierdzono obecność ciemniejszych wydzieleń zawierających Mg i Si, odpowiadających fazie β-Mg_2Si. (Rysunek 6.76)

W przekrojach podłużnych fazy międzymetaliczne wykazują wyraźniejszą orientację zgodną z kierunkiem wyciskania, natomiast w przekrojach poprzecznych rozmieszczenie wydzieleń ma charakter bardziej równomierny i nie wykazuje wyraźnej kierunkowości. Obserwacje te pozostają zgodne z przebiegiem odkształcenia podczas procesu KOBO oraz z wynikami uzyskanymi dla obrazów mikrostruktury przedstawionych na wcześniejszych rysunkach.

Analizy EDS wykazały, że wydzielenia oznaczone jako β-Mg_2Si zawierają przede wszystkim Mg i Si, jednak w niektórych punktach analizy rejestrowano również sygnał aluminium. Obecność Al wynika z objętości oddziaływania wiązki elektronów, obejmującej

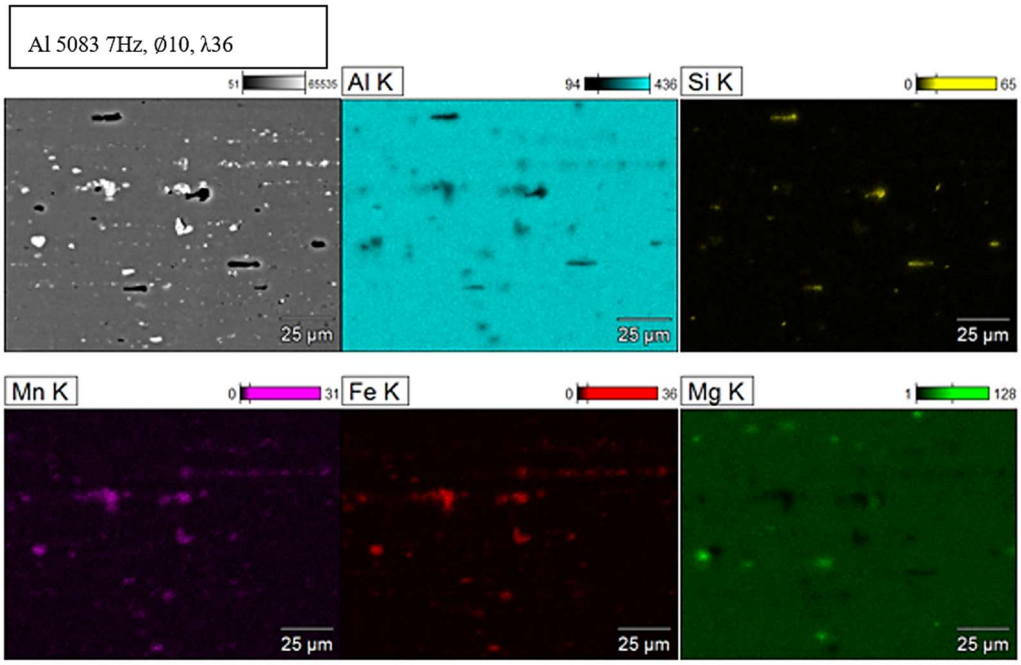
zarówno analizowaną fazę, jak i otaczającą osnowę α-Al. Dodatkowo należy uwzględnić wpływ przygotowania metalograficznego, ponieważ odczynnik Kellera może selektywnie trawić fazę β-Mg_2Si, zmieniając jej powierzchnię i wpływając na skład chemiczny rejestrowany metodą EDS. Z tego względu wyniki analizy punktowej należy interpretować z uwzględnieniem ograniczeń metody.



Rysunek 6.76 Obrazy SEM (BSE) przedstawiające charakterystyczne składniki mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO. Próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ10 mm (λ=36) (a) przekrój podłużny, (b) przekrój poprzeczny, próbka wyciskana przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) (c) przekrój podłużny, (d) przekrój poprzeczny.

Mapowanie rozkładu pierwiastków metodą EDS potwierdziło zróżnicowane rozmieszczenie głównych składników stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO (Rysunek 6.77). Aluminium wykazuje równomierny rozkład w całej objętości osnowy, co potwierdza ciągłość fazy α-Al. Lokalnie obserwowane obniżenie intensywności sygnału Al odpowiada obszarom zajmowanym przez wydzielenia faz wtórnych.

Mapa rozkładu krzemu wskazuje, że pierwiastek ten występuje głównie w postaci dyskretnych wydzieleń rozmieszczonych w osnowie aluminiowej. Rozkład magnezu wykazuje częściową współlokalizację z krzemem, co jest charakterystyczne dla obecności fazy β-Mg_2Si. Jednocześnie nie wszystkie wydzielenia bogate w Mg zawierają porównywalną ilość krzemu, co może wynikać z efektu objętości oddziaływania wiązki elektronów oraz zróżnicowanego składu lokalnych wydzieleń.

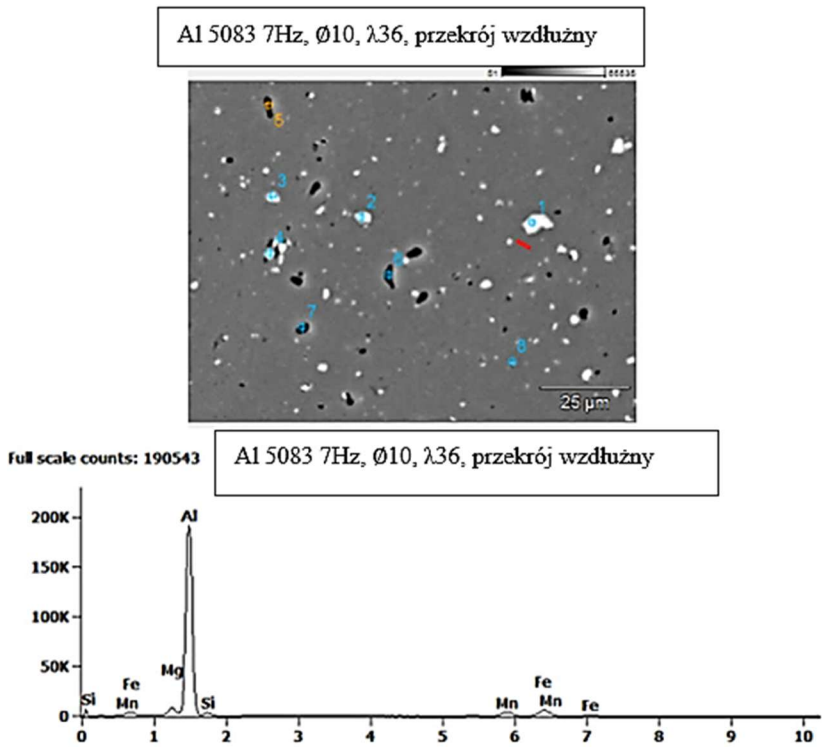


Rysunek 6.77 Mapy rozkładu pierwiastków uzyskane metodą EDS dla wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO (7 Hz, Φ10 mm, λ=36), przedstawiające rozmieszczenie Al, Si, Mn, Fe i Mg w przekroju podłużnym.

Mapy rozkładu manganu i żelaza wykazują wyraźną współlokalizację obu pierwiastków. Największa intensywność sygnału Fe i Mn występuje w tych samych wydzieleniach, co potwierdza obecność faz międzymetalicznych z układu Al-Fe-Mn. Wydzielenia te odpowiadają najjaśniejszym cząstkom widocznym na obrazie SEM wykonanym w trybie elektronów wstecznie rozproszonych.

Obserwowany rozkład pierwiastków pozostaje zgodny z wynikami analiz punktowych EDS oraz obserwacjami mikrostrukturalnymi. Jednoczesna obecność wydzieleń bogatych w Fe i Mn oraz cząstek zawierających Mg i Si potwierdza występowanie w mikrostrukturze stopu Al 5083 charakterystycznych faz międzymetalicznych oraz wydzieleń β-Mg_2Si. Ponadto lokalne uporządkowanie wydzieleń zgodnie z kierunkiem wyciskania odzwierciedla przebieg płynięcia materiału podczas procesu KOBO.

Punktowa analiza EDS wykonana na przekroju wzdłużnym potwierdziła obecność faz wtórnych charakterystycznych dla stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO. Reprezentatywne widmo EDS przedstawione na rysunku 6.78 odpowiada analizie wydzielenia zawierającego przede wszystkim Al, Fe, Mn oraz Si, co wskazuje na obecność fazy międzymetalicznej należącej do układu Al-Fe-Mn-Si.

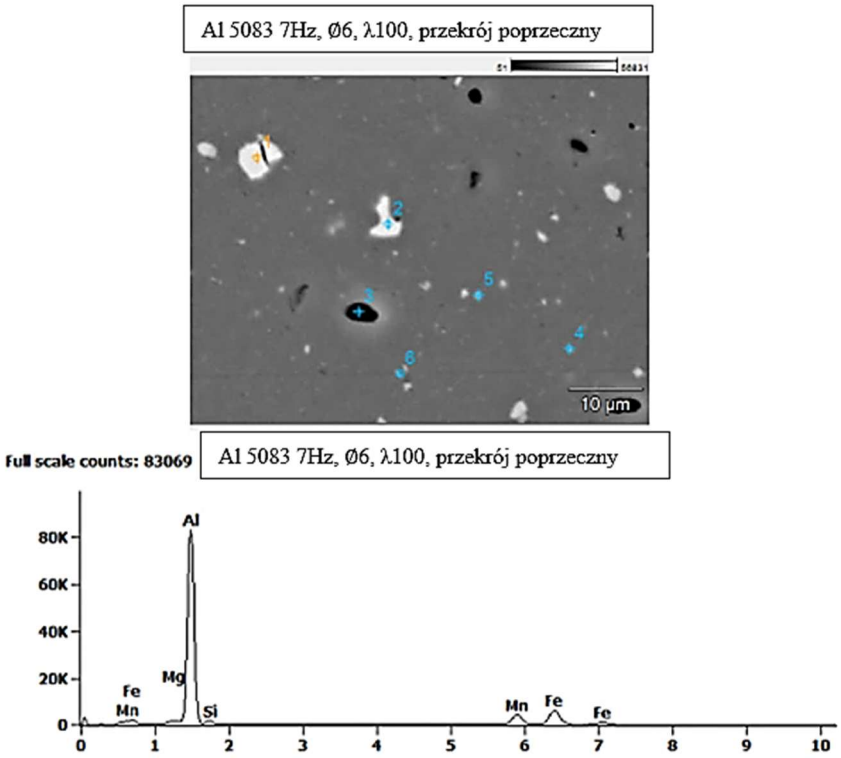


Rysunek 6.78 Obraz SEM (BSE) mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO (7 Hz, Φ10 mm, λ=36), przedstawiający lokalizację punktów analizy EDS w przekroju wzdłużnym oraz reprezentatywne widmo EDS.

Najwyższą intensywność wykazuje pik aluminium, co wynika z objętości oddziaływania wiązki elektronów obejmującej zarówno analizowane wydzielenie, jak
i otaczającą osnowę α-Al. Obecność wyraźnych pików żelaza i manganu potwierdza występowanie faz bogatych w te pierwiastki, natomiast sygnał krzemu wskazuje na jego udział w składzie analizowanego wydzielenia lub na częściowe nakładanie się objętości oddziaływania wiązki elektronów na sąsiadujące wydzielenia zawierające krzem.

Analizy punktowe wykonane w różnych obszarach mikrostruktury wykazały obecność zarówno wydzieleń bogatych w Fe i Mn, jak i cząstek zawierających Mg oraz Si, co pozostaje zgodne z wynikami mapowania pierwiastków metodą EDS oraz obserwacjami wykonanymi w obrazach SEM. W przekroju poprzecznym wydzielenia nie wykazują wyraźnej orientacji względem kierunku wyciskania, a ich rozmieszczenie ma bardziej równomierny charakter niż w przekroju podłużnym. Potwierdza to, że obserwowana w przekrojach podłużnych pasmowość wynika z orientacji faz wtórnych zgodnie z kierunkiem płynięcia materiału podczas procesu KOBO.

Punktowa analiza EDS przeprowadzona na przekroju poprzecznym próbki wyciskanej przy 7 Hz, Φ6 mm (λ=100) potwierdziła obecność faz wtórnych charakterystycznych dla stopu Al 5083 po procesie KOBO. Reprezentatywne widmo EDS odpowiada analizie wydzielenia zawierającego Al, Fe, Mn oraz Si, wskazując na obecność fazy międzymetalicznej z układu Al-Fe-Mn-Si. (Rysunek 6.79)



Rysunek 6.79 Obraz SEM (BSE) mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO (7 Hz, Φ6 mm, λ=100), przedstawiający lokalizację punktów analizy EDS w przekroju poprzecznym oraz reprezentatywne widmo EDS.

Największą intensywność widma wykazuje pik aluminium, co wynika z oddziaływania wiązki elektronów zarówno z analizowanym wydzieleniem, jak i z otaczającą osnową α-Al. Wyraźne piki żelaza i manganu potwierdzają obecność faz bogatych w te pierwiastki, natomiast sygnał krzemu świadczy o jego udziale w analizowanym obszarze. Dodatkowo widoczny jest niewielki pik magnezu, co wskazuje na lokalną obecność faz zawierających Mg lub częściowe nakładanie się objętości oddziaływania wiązki elektronów na sąsiadujące wydzielenia.

W porównaniu z próbką wyciskaną przy λ=36, analizowany obszar charakteryzuje się bardziej równomiernym rozmieszczeniem wydzieleń faz wtórnych oraz mniejszą liczbą większych cząstek międzymetalicznych. Obserwacje te pozostają zgodne z wynikami analizy mikrostrukturalnej i mapowania EDS, wskazując na większą jednorodność mikrostruktury uzyskaną przy wyższym współczynniku wyciskania.

Interpretacja mikrostrukturalna wyrobów ze stopu Al 5083

Przeprowadzona analiza mikrostrukturalna wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO wykazała, że zastosowane parametry procesu w istotny sposób wpływają na jednorodność mikrostruktury oraz rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych. Zarówno obserwacje wykonane metodą mikroskopii świetlnej, jak i obrazy SEM wykonane w trybie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) wykazały, że we wszystkich analizowanych wariantach procesu dominującą fazę stanowi osnowa α-Al, w której rozmieszczone są wydzielenia faz międzymetalicznych. Wydzielenia obserwowano głównie w postaci drobnych cząstek o nieregularnym, punktowym lub lekko wydłużonym kształcie.

Wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania λ od 36 do 100 obserwowano stopniową homogenizację mikrostruktury oraz bardziej równomierne rozmieszczenie wydzieleń w całej objętości materiału. Jednocześnie zmniejszało się lokalne zróżnicowanie ich rozmieszczenia, a struktura stawała się coraz bardziej jednorodna. Największy stopień homogenizacji uzyskano dla próbki wyciskanej przy λ=100, dla której nie obserwowano wyraźnych skupisk wydzieleń ani obszarów o odmiennej morfologii. Obserwacje SEM potwierdziły również bardziej jednorodny rozkład faz wtórnych oraz mniejszą liczbę większych wydzieleń w porównaniu z próbkami wyciskanymi przy niższym współczynniku wyciskania.

Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy był widoczny przede wszystkim w stopniu ujednorodnienia struktury. Dla częstotliwości 3 Hz obserwowano lokalnie większe zróżnicowanie rozmieszczenia wydzieleń oraz słabiej zaznaczoną homogenizację materiału. Zwiększenie częstotliwości do 5 Hz prowadziło do bardziej równomiernego rozkładu składników mikrostruktury, natomiast dla 7 Hz uzyskano najbardziej jednorodny obraz osnowy z drobnymi, równomiernie rozmieszczonymi wydzieleniami faz wtórnych.

Analiza przekrojów podłużnych i poprzecznych wykazała różnice wynikające z kierunku obserwacji. W przekrojach podłużnych część wydzieleń wykazywała orientację zgodną

z kierunkiem płynięcia materiału podczas wyciskania, natomiast w przekrojach poprzecznych wydzielenia obserwowano głównie jako cząstki o kształcie punktowym lub owalnym. Obrazy SEM wykazały, że w przekrojach podłużnych lokalnie występuje pasmowe rozmieszczenie faz wtórnych zgodne z kierunkiem wyciskania, podczas gdy w przekrojach poprzecznych kierunkowość ta jest znacznie słabiej zaznaczona.

Analizy punktowe oraz mapy rozkładu pierwiastków metodą EDS potwierdziły obecność faz międzymetalicznych bogatych w Fe i Mn oraz wydzieleń zawierających Mg i Si. Mapy EDS wykazały współlokalizację żelaza i manganu w tych samych wydzieleniach, co wskazuje na obecność faz z układu Al-Fe-Mn, natomiast częściowe pokrywanie się sygnałów magnezu i krzemu potwierdziło występowanie wydzieleń β-Mg_2Si. Uzyskane wyniki pozostają zgodne z obserwacjami wykonanymi metodą SEM i potwierdzają identyfikację głównych składników mikrostruktury badanego wyrobu.

Zaobserwowane zmiany mikrostrukturalne znajdują odzwierciedlenie w wynikach badań właściwości mechanicznych oraz przebiegu procesu wyciskania. Próbki charakteryzujące się najbardziej jednorodną mikrostrukturą wykazywały również najwyższą jednorodność mikrotwardości oraz korzystniejszy rozkład właściwości mechanicznych na całej długości pręta. Jednocześnie zmiany współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy powodowały jedynie niewielkie zmiany maksymalnej siły wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083, bez jednoznacznej tendencji do jej systematycznego zmniejszania. Wyraźniejszą różnicę stwierdzono jedynie dla $\lambda=100$, dla którego przy częstotliwości 3 Hz uzyskano najniższą wartość Fmax równą 2230 kN

Związek mikrotwardości z przemianami mikrostrukturalnymi wyrobów ze stopu Al 5083

Wyniki badań mikrotwardości wyrobów ze stopu Al 5083 po wyciskaniu metodą KOBO wykazały wyraźną zależność pomiędzy właściwościami mechanicznymi materiału a zmianami mikrostrukturalnymi obserwowanymi po procesie odkształcenia plastycznego. Analiza mikrostruktur oraz rozkładu mikrotwardości wskazuje, że parametry procesu, takie jak współczynnik wyciskania λ oraz częstotliwość oscylacji matrycy, wpływają na stopień homogenizacji mikrostruktury, co znajduje odzwierciedlenie w wartościach mikrotwardości oraz ich jednorodnym rozkładzie.

Przeprowadzona analiza mikrostrukturalna wykazała, że wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania obserwowane jest bardziej równomierne rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych oraz zmniejszenie lokalnych różnic w ich rozkładzie. Jednocześnie mikrostruktura staje się bardziej jednorodna, co wskazuje na korzystny wpływ intensywnego odkształcenia plastycznego na homogenizację materiału. Bardziej jednorodny rozkład składników mikrostruktury sprzyja również bardziej równomiernemu rozkładowi naprężeń podczas odkształcania materiału.

Zmiany wartości mikrotwardości można wiązać przede wszystkim z umocnieniem odkształceniowym zachodzącym podczas procesu KOBO. Intensywne odkształcenie plastyczne prowadzi do wzrostu gęstości dyslokacji, co skutkuje zwiększeniem oporu przeciwko ich dalszemu ruchowi, a tym samym wzrostem twardości materiału. W stopie Al 5083, umacnianym roztworowo i charakteryzującym się wysoką energią błędu ułożenia, obserwowane zmiany mikrotwardości wynikają z równowagi pomiędzy procesem umocnienia odkształceniowego a naturalną tendencją materiału do reorganizacji defektów sieci krystalicznej podczas intensywnego odkształcenia. W rezultacie, pomimo zmieniających się parametrów procesu KOBO, uzyskane wartości mikrotwardości pozostają na zbliżonym poziomie, wskazując na stabilny charakter właściwości badanego wyrobu.

Istotną rolę odgrywa również charakterystyczna dla procesu KOBO cykliczna zmiana kierunku odkształcenia. Oscylacyjny ruch matrycy powoduje bardziej równomierny rozkład odkształcenia w całej objętości materiału, ograniczając lokalizację deformacji. Efektem tego jest uzyskanie mikrostruktury o wysokim stopniu jednorodności, co znajduje potwierdzenie w niewielkim zróżnicowaniu wartości mikrotwardości pomiędzy przekrojami poprzecznym i wzdłużnym oraz pomiędzy poszczególnymi strefami pręta.

Zaobserwowane różnice mikrotwardości pomiędzy analizowanymi wariantami procesu można interpretować jako rezultat współdziałania mechanizmów umocnienia odkształceniowego oraz procesów zdrowienia zachodzących podczas intensywnego odkształcenia plastycznego. Dla wyższych częstotliwości oscylacji oraz większych wartości współczynnika wyciskania uzyskano bardziej jednorodną mikrostrukturę oraz wyższe wartości mikrotwardości lub ich stabilizację, co świadczy o korzystnym wpływie tych parametrów na przebieg procesu KOBO.

Analiza rozkładu mikrotwardości pozostaje zgodna z wynikami obserwacji mikrostrukturalnych. Próbki charakteryzujące się bardziej jednorodnym rozmieszczeniem wydzieleń faz wtórnych wykazywały jednocześnie mniejsze zróżnicowanie wartości mikrotwardości, co świadczy o wyrównaniu lokalnych właściwości materiału. Jednorodna mikrostruktura sprzyja bardziej równomiernemu rozkładowi odkształcenia oraz ogranicza powstawanie lokalnych koncentracji naprężeń.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu Al 5083 po procesie wyciskania metodą KOBO są ściśle związane z przebudową mikrostruktury zachodzącą podczas intensywnego odkształcenia plastycznego. Odpowiedni dobór współczynnika wyciskania oraz częstotliwości oscylacji matrycy umożliwia uzyskanie materiału o jednorodnej mikrostrukturze i stabilnym rozkładzie mikrotwardości, co świadczy o wysokiej efektywności procesu KOBO w kształtowaniu właściwości użytkowych badanego wyrobu.

Fragmentacja i rozdrobnienie ziaren osnowy aluminiowej wyrobów ze stopu Al 5083

Jednym z charakterystycznych efektów procesu wyciskania metodą KOBO jest intensywna przebudowa mikrostruktury materiału, wynikająca z działania złożonego stanu naprężeń obejmującego ściskanie oraz cyklicznie zmieniające się odkształcenie ścinające. W przeciwieństwie do konwencjonalnego wyciskania, proces KOBO prowadzi do wielokierunkowego odkształcenia materiału, co sprzyja bardziej równomiernemu rozkładowi deformacji w całej objętości wyrobu oraz intensyfikacji zmian mikrostrukturalnych.

Analiza mikrostruktur wyrobów ze stopu Al 5083 wykazała, że wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania λ następowała stopniowa homogenizacja mikrostruktury oraz bardziej równomierne rozmieszczenie wydzieleń faz wtórnych w osnowie α-Al. Dla największego współczynnika wyciskania (λ=100) uzyskano najbardziej jednorodny obraz mikrostruktury, charakteryzujący się równomiernym rozkładem drobnych wydzieleń oraz brakiem wyraźnych obszarów ich lokalnej koncentracji.

Zastosowana metoda obserwacji nie umożliwia bezpośredniej oceny wielkości ziaren ani identyfikacji granic ziarnowych. Jednak obserwowany wzrost jednorodności mikrostruktury wraz ze zwiększeniem stopnia odkształcenia pozostaje zgodny z mechanizmami przebudowy

struktury opisywanymi dla stopów aluminium poddawanych intensywnemu odkształceniu plastycznemu. Według danych literaturowych proces KOBO prowadzi do wzrostu gęstości dyslokacji, stopniowej reorganizacji ich układu oraz rozwoju podstruktury dyslokacyjnej, co w sprzyjających warunkach może prowadzić do znacznego rozdrobnienia mikrostruktury.

W przypadku stopów aluminium serii 5xxx, charakteryzujących się wysoką energią błędu ułożenia, intensywne odkształcenie plastyczne prowadzi do przebudowy mikrostruktury oraz zmian w rozmieszczeniu defektów sieci krystalicznej. Efektem tych zmian może być bardziej jednorodny rozkład wydzieleń oraz homogenizacja mikrostruktury obserwowana po procesach intensywnego odkształcenia plastycznego. Zakres i charakter zachodzących przemian zależą od parametrów procesu oraz właściwości badanego materiału. W związku z tym obserwowane zmiany mikrostrukturalne należy interpretować przede wszystkim na podstawie wyników badań mikroskopowych, bez jednoznacznego wskazywania mechanizmów odpowiedzialnych za ich powstawanie.

Zmiany mikrostrukturalne znajdują odzwierciedlenie w wynikach badań mikrotwardości oraz przebiegu procesu wyciskania. Bardziej jednorodna mikrostruktura odpowiada bardziej wyrównanemu rozkładowi mikrotwardości oraz niewielkim różnicom pomiędzy przekrojami poprzecznym i wzdłużnym. Jednocześnie zmiana współczynnika wyciskania w większości analizowanych wariantów nie powodowała istotnej zmiany maksymalnej siły wyciskania wyrobu Al 5083. Wyraźniejsze obniżenie Fmax stwierdzono jedynie przy częstotliwości 3 Hz dla λ=100

Przeprowadzone badania wskazują, że zwiększenie współczynnika wyciskania prowadzi do postępującej homogenizacji mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083 oraz bardziej równomiernego rozmieszczenia wydzieleń faz wtórnych. Zjawiska te pozostają zgodne z mechanizmami przebudowy mikrostruktury opisywanymi dla procesów intensywnego odkształcenia plastycznego i stanowią jedną z głównych przyczyn uzyskania jednorodnych właściwości mechanicznych materiału po wyciskaniu metodą KOBO.

Przebudowa i homogenizacja mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083

Przeprowadzone badania mikrostrukturalne wykazały, że proces wyciskania metodą KOBO prowadzi do wyraźnej przebudowy mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083. Zakres obserwowanych zmian był uzależniony zarówno od współczynnika wyciskania λ,

jak i częstotliwości oscylacji matrycy. Wraz ze wzrostem intensywności odkształcenia obserwowano stopniową homogenizację mikrostruktury oraz bardziej równomierne rozmieszczenie cząstek faz wtórnych w osnowie α-Al.

W próbkach wyciskanych przy mniejszych wartościach współczynnika wyciskania widoczne były lokalne niejednorodności oraz pasmowe rozmieszczenie cząstek faz wtórnych, szczególnie w środkowej części przekroju wzdłużnego prętów. Zwiększenie współczynnika wyciskania prowadziło do ograniczenia tych niejednorodności oraz do bardziej równomiernego rozmieszczenia cząstek w całej analizowanej objętości materiału. Najbardziej jednorodną mikrostrukturę uzyskano dla λ=100, dla którego obserwowano drobniejsze i bardziej równomiernie rozproszone cząstki faz wtórnych.

Charakterystycznym efektem procesu KOBO była również fragmentacja większych cząstek faz międzymetalicznych oraz ich przemieszczanie i redystrybucja w osnowie aluminiowej. Cykliczna zmiana kierunku ruchu matrycy powodowała zmianę toru odkształcenia oraz intensyfikowała lokalne odkształcenia ścinające, sprzyjając rozdrobnieniu składników mikrostruktury i ograniczeniu ich skupisk. W wyniku tego procesu uzyskano bardziej jednorodny rozkład faz wtórnych, szczególnie w warstwach przypowierzchniowych oraz w próbkach odkształconych przy najwyższych wartościach λ.

Obserwowane zmiany mikrostruktury znajdowały odzwierciedlenie w wynikach badań mikrotwardości. Bardziej jednorodna mikrostruktura odpowiadała wyrównanemu rozkładowi mikrotwardości na przekrojach poprzecznych i wzdłużnych. Jednocześnie nie stwierdzono proporcjonalnego wzrostu mikrotwardości wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania, co wskazuje, że właściwości materiału były kształtowane przez jednoczesne oddziaływanie kilku czynników, obejmujących stopień odkształcenia, rozmieszczenie faz wtórnych oraz lokalną niejednorodność mikrostruktury.

Na podstawie zastosowanych metod badawczych można stwierdzić, że proces KOBO prowadził do fragmentacji i redystrybucji cząstek faz wtórnych, ograniczenia niejednorodności strukturalnych oraz stopniowej homogenizacji mikrostruktury wyrobów ze stopu Al 5083. Przeprowadzone obserwacje z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej umożliwiły ocenę zmian morfologii i rozmieszczenia składników mikrostruktury, jednak nie pozwalają na jednoznaczne określenie mechanizmów

odpowiedzialnych za ich powstawanie. Identyfikacja zmian zachodzących na poziomie struktury krystalicznej wymagałaby zastosowania dodatkowych technik badawczych, takich jak dyfrakcja elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) lub transmisyjna mikroskopia elektronowa (TEM).

Zróżnicowanie mikrostruktury wzdłuż długości pręta ze stopu Al 5083

Analiza mikrostruktur pobranych z początku, środkowej oraz końcowej części prętów wyciskanych metodą KOBO wykazała, że stop Al 5083 charakteryzuje się niewielkim zróżnicowaniem obrazu mikrostruktury na całej długości wyrobu. We wszystkich analizowanych obszarach dominowała osnowa α-Al z równomiernie rozmieszczonymi wydzieleniami faz wtórnych. Nie obserwowano istotnych zmian ich morfologii ani występowania obszarów o wyraźnie odmiennej budowie.

Największą jednorodnością mikrostruktury charakteryzowała się środkowa część pręta. W tym obszarze wydzielenia faz wtórnych były rozmieszczone najbardziej równomiernie, a mikrostruktura wykazywała najmniejsze lokalne zróżnicowanie. Obserwacje te pozostają zgodne z wynikami pomiarów mikrotwardości, dla których również odnotowano niewielki rozrzut wartości w środkowej części wyrobu.

W początkowej części pręta mikrostruktura pozostawała jednorodna, jednak lokalnie obserwowano nieco większe zróżnicowanie rozmieszczenia wydzieleń niż w części środkowej. Podobną tendencję stwierdzono w końcowej części pręta, gdzie również nie zaobserwowano zmian świadczących o pogorszeniu jakości mikrostruktury ani występowania nieciągłości materiału. Różnice pomiędzy poszczególnymi strefami miały niewielki charakter i dotyczyły przede wszystkim lokalnego rozmieszczenia wydzieleń.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowane parametry procesu zapewniają stabilny przebieg odkształcenia na znacznej długości wyciskanego pręta. Potwierdzają to zarówno obserwacje mikrostrukturalne, jak i wyniki badań mikrotwardości, które wykazały niewielkie różnice pomiędzy początkiem, środkiem i końcem wyrobu. Oznacza to, że proces pozwala na uzyskanie materiału o wysokiej jednorodności właściwości wzdłuż całej długości pręta.

Niewielkie zróżnicowanie mikrostruktury ma istotne znaczenie z punktu widzenia właściwości użytkowych wyrobu. Jednorodny rozkład wydzieleń faz wtórnych oraz brak

wyraźnych zmian morfologii mikrostruktury sprzyjają uzyskaniu stabilnych właściwości mechanicznych i ograniczają ryzyko występowania lokalnych osłabień materiału. Jest to szczególnie istotne w przypadku elementów konstrukcyjnych, od których wymagana jest powtarzalność właściwości na całej długości wyrobu.

Rola magnezu i umocnienia roztworowego w stopie Al 5083

Właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu Al 5083 są determinowane przede wszystkim przez umocnienie roztworowe wywołane obecnością magnezu oraz umocnienie odkształceniowe powstające podczas intensywnej deformacji plastycznej. W przeciwieństwie do stopów utwardzanych wydzieleniowo wzrost wytrzymałości nie jest związany z wydzielaniem nowych faz wzmacniających podczas obróbki cieplnej, lecz wynika z oddziaływania atomów magnezu rozpuszczonych w osnowie α-Al z dyslokacjami.

Atomy magnezu powodują lokalne odkształcenie sieci krystalicznej aluminium, wytwarzając pola naprężeń utrudniające ruch dyslokacji. Mechanizm ten zwiększa opór materiału podczas odkształcenia plastycznego i stanowi podstawowe źródło wytrzymałości badanego wyrobu. W trakcie procesu wyciskania wzrost gęstości dyslokacji powoduje intensyfikację oddziaływań pomiędzy dyslokacjami a atomami magnezu, dzięki czemu jednocześnie działają mechanizmy umocnienia roztworowego i odkształceniowego.

Badania pokazały, że dzięki dobranym parametrom procesu udało się uzyskać jednorodną mikrostrukturę oraz stabilny rozkład mikrotwardości i właściwości mechanicznych. W praktyce oznacza to, że wyciskanie nie zmienia podstawowego mechanizmu umocnienia, który jest typowy dla stopu Al 5083. Wpływa ono natomiast na wzajemne oddziaływania umocnienia roztworowego, umocnienia odkształceniowego oraz procesów przebudowy mikrostruktury.

Ponieważ w tym przypadku nie można zastosować umacniania wydzieleniowego, na końcowe właściwości wyrobów ze stopu wpływają głównie zawartość magnezu w roztworze stałym oraz stopień odkształcenia plastycznego uzyskany w procesie KOBO. Wyniki jasno wskazują, że odpowiedni dobór parametrów pozwala skutecznie wykorzystać mechanizm umocnienia roztworowego i korzystnie ukształtować mikrostrukturę. W efekcie materiał zyskuje wysoką wytrzymałość, zachowuje odpowiednią plastyczność i cechuje się bardzo dobrą jednorodnością właściwości mechanicznych.

Synteza mechanizmów umocnienia w procesie KOBO dla wyrobów ze stopu Al 5083

Badania pokazały, że właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu Al 5083, powstających w procesie wyciskania metodą KOBO, zależą od kilku współpracujących ze sobą mechanizmów umocnienia. To, jak bardzo każdy z nich wpływa na materiał, zmienia się wraz z intensywnością odkształcenia. Ostateczne parametry nie wynikają więc z jednego zjawiska, ale wynikają z równowagi pomiędzy umocnieniem roztworowym, odkształceniowym a procesami przebudowy mikrostruktury, które zachodzą podczas samej deformacji.

Głównym powodem wytrzymałości badanego wyrobu jest umocnienie roztworowe, które wynika z obecności magnezu w osnowie aluminiowej. Ten mechanizm stanowi fundament właściwości materiału i pozostaje niezmienny podczas wyciskania. Z kolei intensywne odkształcenie plastyczne zwiększa gęstość dyslokacji, co daje dodatkowe umocnienie odkształceniowe. Jednak im większy jest stopień odkształcenia, tym ważniejszą rolę zaczynają odgrywać procesy reorganizacji struktury dyslokacyjnej. Pomagają one ograniczyć nadmierną akumulację naprężeń wewnętrznych i stabilizują właściwości materiału.

Analiza mikrostruktury pokazała, że zwiększenie współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy pomaga uzyskać bardziej jednorodną strukturę oraz równomiernie rozłożone wydzielenia faz wtórnych. Co więcej, badania mikrotwardości potwierdziły, że właściwości materiału są dość zbliżone zarówno w przekroju poprzecznym i wzdłużnym, jak i na całej długości pręta. Wyniki te wskazują na ograniczone zróżnicowanie właściwości w badanych obszarach wyrobu.

Poprawny przebieg procesu potwierdzają też pomiary maksymalnej siły wyciskania. Okazało się, że stop Al 5083 jest mało wrażliwy na zmiany współczynnika wyciskania czy częstotliwości oscylacji matrycy. W większości badanych przypadków wartość Fmax pozostawała na podobnym poziomie, a największą różnicę zauważono przy współczynniku 100, porównując częstotliwości 3 Hz z 5 i 7 Hz.

Wszystkie przeprowadzone badania dowodzą, że dzięki odpowiedniemu doborowi parametrów można skutecznie kształtować mikrostrukturę i właściwości mechaniczne wyrobów ze stopu Al 5083. Wyniki sugerują, że na końcowe cechy materiału ma największy wpływ połączenie umocnienia roztworowego z odkształceniowym oraz procesy zapewniające

jednorodną strukturę. W rezultacie uzyskuje się materiał o wysokiej wytrzymałości i dobrej plastyczności, którego właściwości są niemal identyczne na całej długości wyrobu.

6.4. Wpływ parametrów procesu wyciskania KOBO na maksymalną siłę wyciskania AlSi11 oraz Al 5083

Wpływ parametrów procesu KOBO na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11

Maksymalna siła wyciskania jest jednym z podstawowych parametrów opisujących przebieg procesu plastycznego kształtowania materiału. Jej wartość określa największe obciążenie układu technologicznego zarejestrowane podczas przemieszczania stempla i przepływu materiału przez otwór matrycy. Analiza maksymalnej siły wyciskania pozwala zatem ocenić wpływ parametrów procesu na opory odkształcenia stopu oraz określić warunki, w których możliwe jest jego efektywne kształtowanie.

W przypadku odlewniczego stopu AlSi11 zagadnienie to ma szczególne znaczenie. Materiał w stanie wyjściowym charakteryzuje się niejednorodną mikrostrukturą, zawierającą osnowę aluminiową, eutektykę krzemową oraz fazy międzymetaliczne. Obecność twardych i kruchych składników mikrostruktury ogranicza podatność stopu na odkształcenie plastyczne, zwłaszcza podczas kształtowania na zimno. Zastosowanie metody KOBO, wykorzystującej cykliczną zmianę kierunku obrotu matrycy, umożliwia modyfikację warunków płynięcia materiału w strefie odkształcenia oraz prowadzenie procesu przy dużych wartościach współczynnika wyciskania.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano wsad o średnicy początkowej 60 mm oraz matryce o średnicach otworów wynoszących 10, 7,75 i 6 mm. Odpowiadało to stopniom wyciskania równym odpowiednio około λ=36, λ=60 oraz λ=100.

Tabela 6.5 Maksymalne wartości siły wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 uzyskane podczas procesu KOBO dla różnych współczynników wyciskania (λ) oraz częstotliwości oscylacji matrycy.

Współczynnik wyciskania λ	3 Hz	5 Hz	7 Hz
36	2296 kN	2298 kN	1928 kN
60	-	2029 kN	1608 kN
100	2067 kN	1649 kN	1471 kN

Wpływ parametrów procesu KOBO na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083

Maksymalna siła wyciskania stanowi jeden z podstawowych parametrów charakteryzujących przebieg procesu KOBO oraz pozwala ocenić wpływ zastosowanych parametrów technologicznych na warunki odkształcenia plastycznego materiału. W przypadku wyrobów ze stopu Al 5083 analiza tego parametru umożliwia ocenę oddziaływania częstotliwości oscylacji matrycy oraz współczynnika wyciskania na obciążenie układu wyciskającego.

Tabela 6.6 Maksymalne wartości siły wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 uzyskane podczas procesu KOBO dla różnych współczynników wyciskania (λ) oraz częstotliwości oscylacji matrycy.

Współczynnik wyciskania λ	3 Hz	5 Hz	7 Hz
36	2298	2295	2299
60	2296	2298	2297
100	2230	2298	2298

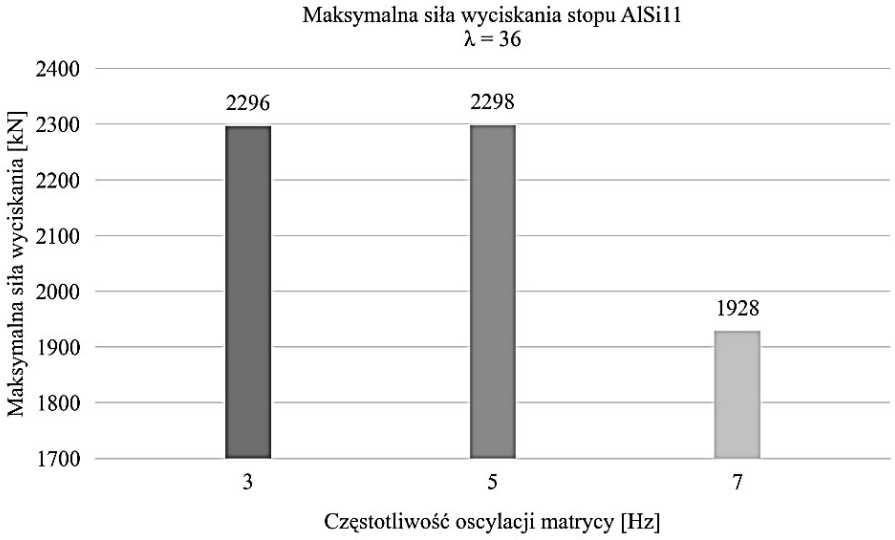
Ze względu na dobrą podatność plastyczną stopu 5083 w stanie wyjściowym oczekiwano odmiennego charakteru zmian maksymalnej siły wyciskania niż w przypadku odlewniczego stopu AlSi11. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów maksymalnej siły wyciskania uzyskane dla poszczególnych wariantów procesu KOBO oraz przeprowadzono analizę wpływu badanych parametrów technologicznych na przebieg procesu.

6.4.1. Analiza wyników

Proces dla stopu AlSi11 przeprowadzono przy kącie oscylacji matrycy wynoszącym ±8 stopni, testując częstotliwości 3, 5 oraz 7 Hz. Jeśli chodzi o współczynnik wyciskania λ=60, próby wykonano tylko przy 5 i 7 Hz.

Wyraźną różnicę widać dopiero po zwiększeniu częstotliwości do 7 Hz. Wtedy maksymalna siła wyciskania spadła do 1928 kN, co oznacza spadek o około 16 procent w porównaniu do wariantu 3 Hz oraz o około 16,1 procent względem 5 Hz. Wyniki pokazują, że przy współczynniku wyciskania λ=36 podniesienie częstotliwości z 3 do 5 Hz nie zmienia znacząco przebiegu procesu. Jednak zastosowanie 7 Hz wyraźnie zmniejsza opory odkształcenia materiału. Ten efekt dowodzi, że oscylacyjny ruch matrycy skuteczniej wpływa na płynięcie

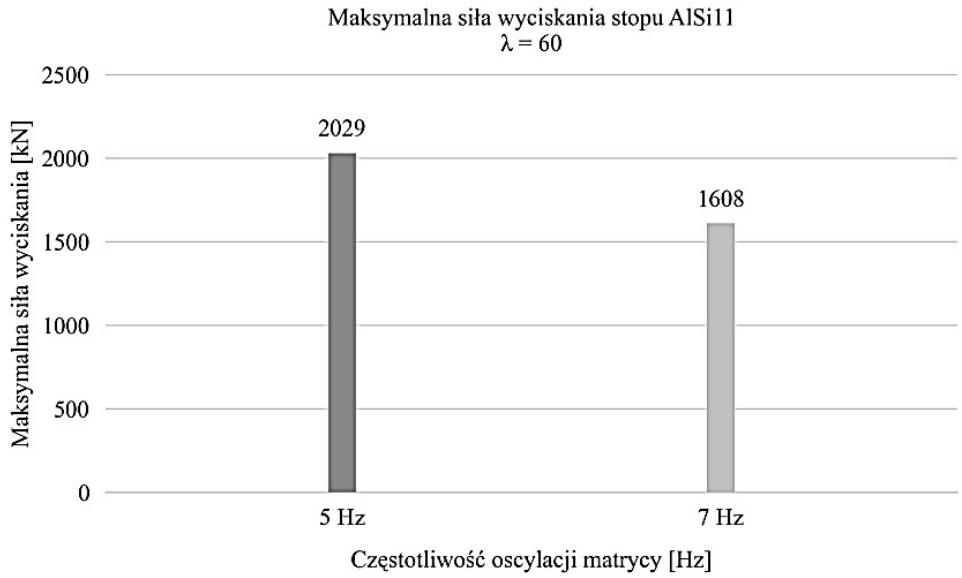
materiału, co pozwala zmniejszyć wymaganą siłę wyciskania i poprawia ogólną efektywność procesu KOBO.



Rysunek 6.80 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36

Na rysunku 6.81 przedstawiono wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60. W analizowanym zakresie parametrów procesu badania przeprowadzono dla częstotliwości 5 Hz oraz 7 Hz.

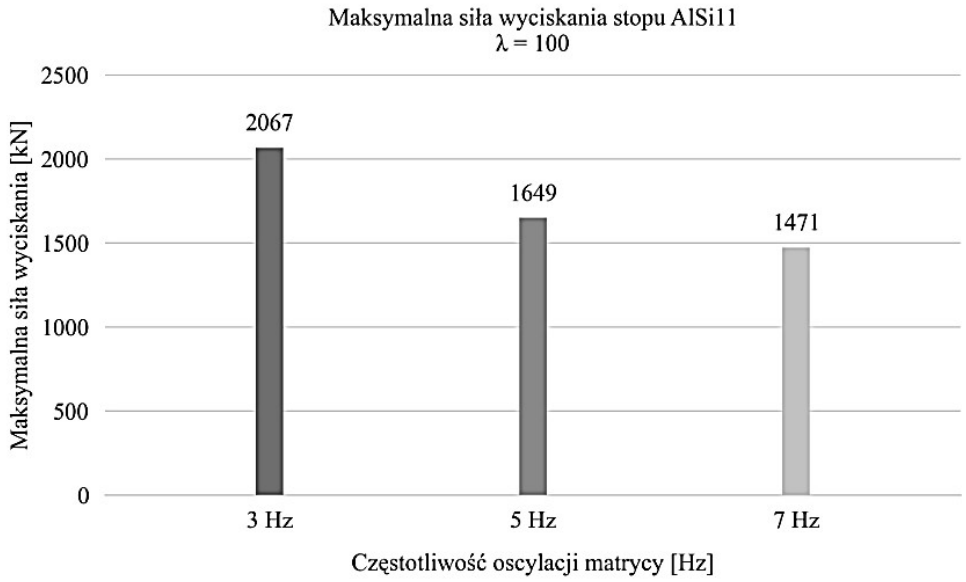
Maksymalna siła wyciskania osiągnęła wartość 2029 kN przy częstotliwości 5 Hz, natomiast zwiększenie częstotliwości oscylacji do 7 Hz spowodowało jej obniżenie do 1608 kN. Odpowiada to redukcji maksymalnej siły wyciskania o około 20,7%. Uzyskane wyniki wskazują, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy prowadzi do wyraźnego zmniejszenia oporów odkształcenia materiału podczas wyciskania. Jest to związane z intensyfikacją cyklicznych odkształceń ścinających charakterystycznych dla procesu KOBO, które ułatwiają płynięcie materiału przez kanał matrycy i zmniejszają obciążenie układu wyciskającego. Należy podkreślić, że dla współczynnika wyciskania λ=60 nie wykonywano prób przy częstotliwości 3 Hz, dlatego analiza obejmuje wyłącznie dwa dostępne warianty procesu.



Rysunek 6.81 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60.

Na rysunku 6.82 przedstawiono wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 dla współczynnika wyciskania λ=100. Wraz ze wzrostem częstotliwości oscylacji od 3 do 7 Hz obserwuje się systematyczny spadek maksymalnej siły wyciskania. Najwyższą wartość siły zarejestrowano dla częstotliwości 3 Hz, wynoszącą 2067 kN. Zwiększenie częstotliwości do 5 Hz spowodowało obniżenie siły do 1649 kN, natomiast przy 7 Hz osiągnięto najniższą wartość-1471 kN.

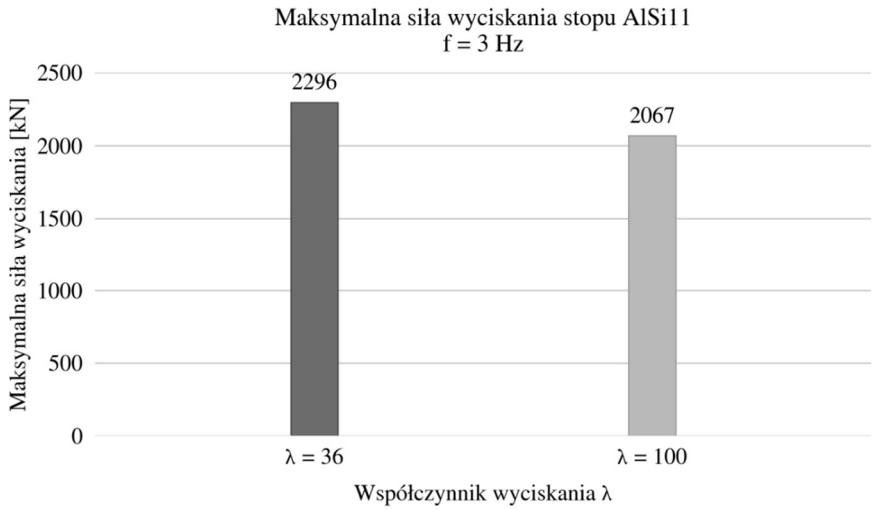
Oznacza to redukcję maksymalnej siły wyciskania o około 20% dla 5 Hz oraz o około 29% dla 7 Hz w odniesieniu do wariantu 3 Hz. Uzyskane wyniki wskazują, że wzrost częstotliwości oscylacji matrycy korzystnie wpływa na przebieg procesu KOBO, prowadząc do zmniejszenia oporów odkształcenia materiału i obniżenia obciążenia układu wyciskającego. Efekt ten można wiązać z intensyfikacją cyklicznych odkształceń ścinających, które ułatwiają płynięcie materiału przez kanał matrycy i zmniejszają wymaganą siłę wyciskania.



Rysunek 6.82 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100.

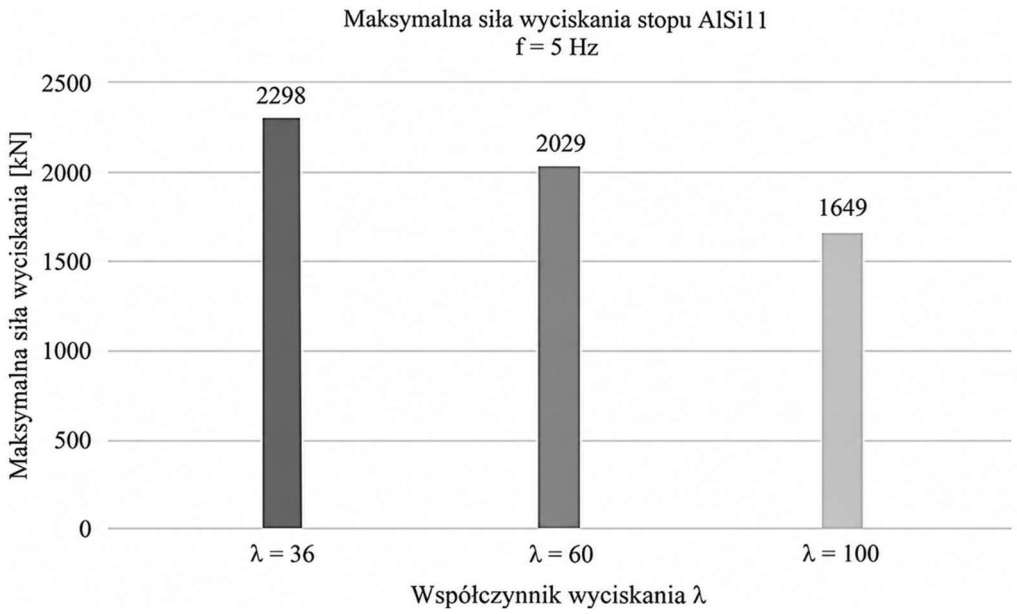
Na rysunku 6.83 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 3 Hz. Maksymalna siła wyciskania osiągnęła wartość 2296 kN dla współczynnika wyciskania λ=36, natomiast dla λ=100 zmniejszyła się do 2067 kN.

Oznacza to spadek maksymalnej siły o około 10,0%, co wskazuje, że zwiększenie współczynnika wyciskania, przy zachowaniu częstotliwości 3 Hz, sprzyja zmniejszeniu oporów plastycznego płynięcia materiału. Należy zaznaczyć, że dla λ=60 nie przeprowadzono badań przy częstotliwości 3 Hz, dlatego wariant ten nie został uwzględniony w analizie ani na wykresie.



Rysunek 6.83 Wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz.

Na rysunku 6.84 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 5 Hz. Wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania od λ=36 do λ=100 zaobserwowano systematyczne zmniejszanie maksymalnej siły wyciskania. Dla λ=36 wartość maksymalnej siły wyniosła 2298 kN, natomiast zwiększenie współczynnika wyciskania do λ=60 spowodowało jej obniżenie do 2029 kN, co odpowiada redukcji o około 11,7%. Dalszy wzrost współczynnika wyciskania do λ=100 skutkował kolejnym spadkiem maksymalnej siły do 1649 kN, czyli o około 18,7% względem λ=60 oraz o około 28,2% w porównaniu z λ=36.

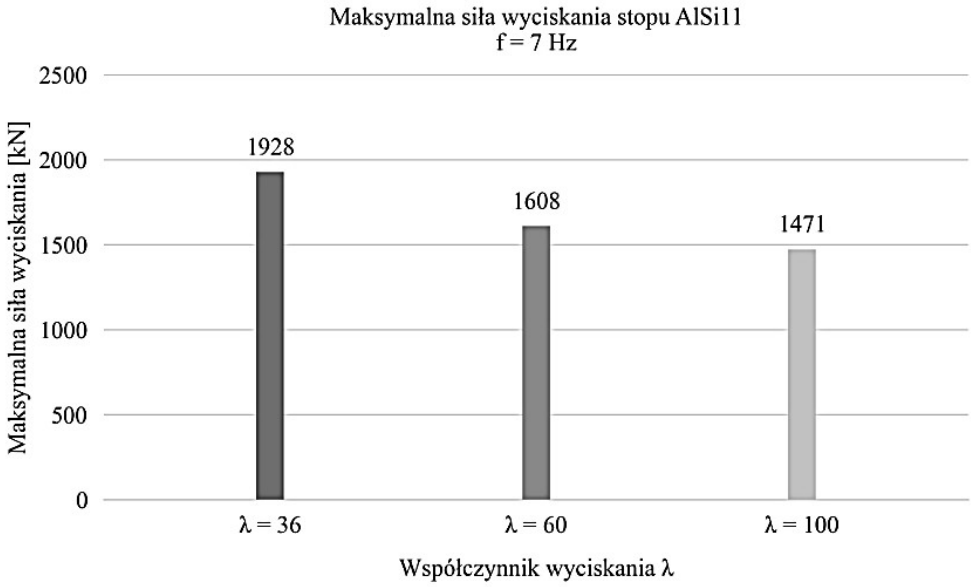


Rysunek 6.84 Wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz.

Uzyskane wyniki wskazują, że zwiększenie współczynnika wyciskania przy częstotliwości oscylacji 5 Hz prowadzi do wyraźnego ograniczenia oporów plastycznego płynięcia materiału. Można to wiązać z korzystniejszym przebiegiem procesu KOBO, w którym cykliczne odkształcenia ścinające intensyfikują przebudowę mikrostruktury oraz ułatwiają przepływ materiału przez kanał matrycy. W rezultacie zmniejsza się obciążenie układu wyciskającego, a proces przebiega bardziej efektywnie.

Na rysunku 6.85 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO przy częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 7 Hz. Wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania od λ=36 do λ=100 zaobserwowano systematyczny spadek maksymalnej siły wyciskania. Dla współczynnika

wyciskania λ=36 maksymalna siła wyniosła 1928 kN, natomiast dla λ=60 zmniejszyła się do 1608 kN, co odpowiada redukcji o około 16,6%. Dalsze zwiększenie współczynnika wyciskania do λ=100 spowodowało obniżenie maksymalnej siły do 1471 kN, czyli o około 8,5% względem λ=60 oraz o około 23,7% w porównaniu z λ=36.



Rysunek 6.85 Wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu AlSi11 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz.

Uzyskane wyniki wskazują, że zwiększenie współczynnika wyciskania przy częstotliwości oscylacji 7 Hz prowadzi do wyraźnego zmniejszenia oporów plastycznego płynięcia materiału. W porównaniu z wariantami 3 Hz i 5 Hz uzyskano najniższe wartości maksymalnej siły wyciskania, co świadczy o najwyższej efektywności procesu KOBO przy tej częstotliwości. Intensywniejszy oscylacyjny ruch matrycy sprzyja ułatwieniu przepływu materiału, ograniczeniu oporów odkształcenia oraz zmniejszeniu obciążenia układu wyciskającego, co przekłada się na korzystniejsze warunki realizacji procesu.

Przeprowadzona analiza maksymalnej siły wyciskania wykazała, że zarówno częstotliwość oscylacji matrycy, jak i współczynnik wyciskania w istotny sposób wpływają na przebieg procesu KOBO wyrobów ze stopu AlSi11. We wszystkich analizowanych wariantach procesu obserwowano tendencję do zmniejszania maksymalnej siły wyciskania wraz ze wzrostem częstotliwości oscylacji matrycy oraz wzrostem współczynnika wyciskania. Oznacza to, że zastosowanie intensywniejszego ruchu oscylacyjnego oraz większego stopnia odkształcenia sprzyja ograniczeniu oporów plastycznego płynięcia materiału.

Analiza wpływu częstotliwości oscylacji wykazała, że dla wszystkich analizowanych współczynników wyciskania najniższe wartości maksymalnej siły uzyskano przy częstotliwości 7 Hz. Efekt ten był szczególnie wyraźny dla najwyższego współczynnika wyciskania λ=100, dla którego maksymalna siła zmniejszyła się z 2067 kN przy 3 Hz do 1471 kN przy 7 Hz, co odpowiada redukcji o blisko 29%. Również dla współczynników wyciskania λ=36 oraz λ=60 wzrost częstotliwości prowadził do systematycznego obniżania siły wyciskania, potwierdzając korzystny wpływ oscylacyjnego ruchu matrycy na przebieg procesu.

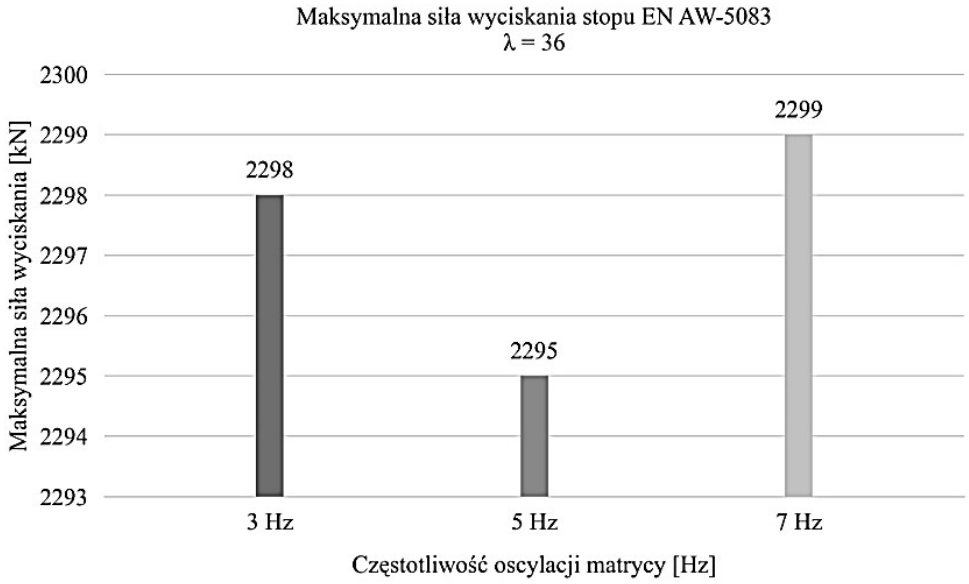
Porównanie wyników uzyskanych dla stałych częstotliwości oscylacji wykazało ponadto, że zwiększenie współczynnika wyciskania powoduje stopniowe zmniejszanie maksymalnej siły wyciskania. Tendencja ta była najbardziej wyraźna dla częstotliwości 5 Hz oraz 7 Hz, gdzie wraz ze wzrostem λ obserwowano systematyczne ograniczenie obciążenia układu wyciskającego. Jedynie dla częstotliwości 3 Hz analiza obejmowała dwa warianty procesu (λ=36 i λ=100), jednak również w tym przypadku odnotowano spadek maksymalnej siły wyciskania.

Uzyskane wyniki wskazują, że zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy intensyfikuje cykliczne odkształcenia ścinające charakterystyczne dla procesu KOBO, prowadząc do korzystniejszego rozkładu naprężeń w strefie odkształcenia oraz ułatwiając przepływ materiału przez kanał matrycy. W rezultacie zmniejszają się opory odkształcenia oraz obciążenie układu wyciskającego. Jednocześnie wzrost współczynnika wyciskania sprzyja stabilizacji procesu i dalszemu ograniczeniu wymaganej siły wyciskania.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że najkorzystniejsze warunki procesu pod względem minimalizacji maksymalnej siły wyciskania uzyskano dla częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz oraz współczynnika wyciskania λ=100, dla których zarejestrowano najniższą wartość maksymalnej siły wyciskania wynoszącą 1471 kN. Otrzymane wyniki potwierdzają wysoką skuteczność procesu KOBO w kształtowaniu trudnoodkształcalnego odlewniczego stopu AlSi11 oraz wskazują, że odpowiedni dobór parametrów procesu umożliwia znaczące ograniczenie maksymalnej siły wyciskania przy jednoczesnym zachowaniu stabilnego przebiegu procesu.

Na rysunku 6.86 przedstawiono wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla współczynnika

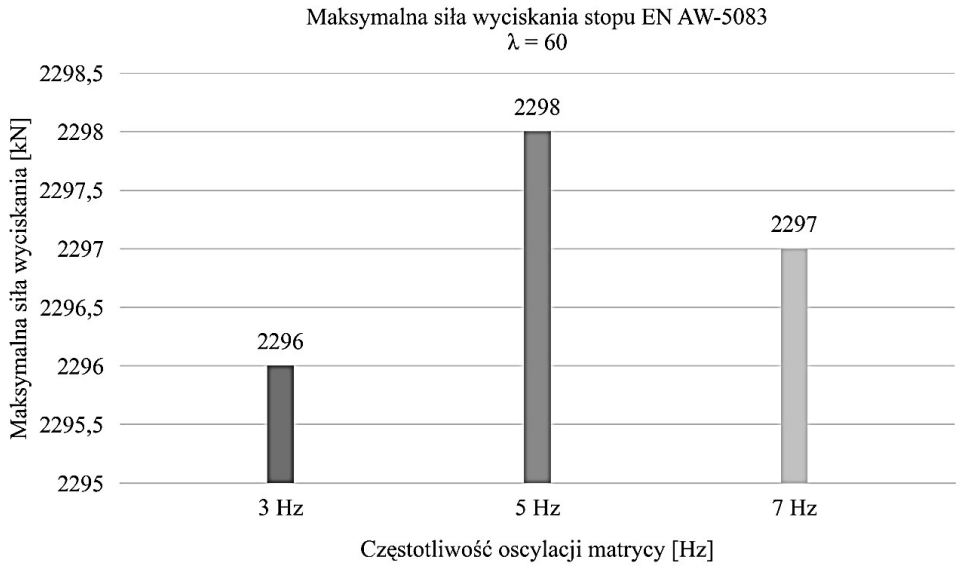
wyciskania λ=36. Najwyższą wartość maksymalnej siły wyciskania zarejestrowano dla częstotliwości 7 Hz i wyniosła ona 2299 kN. Dla częstotliwości 3 Hz wartość ta osiągnęła 2298 kN, natomiast dla 5 Hz-2295 kN. Różnice pomiędzy analizowanymi wariantami procesu nie przekraczają 4 kN, co odpowiada zmianom mniejszym niż 0,2%.



Rysunek 6.86 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=36.

Otrzymane wyniki wskazują, że w przypadku stopu Al 5083 zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy w zakresie od 3 do 7 Hz nie wpływa w istotny sposób na maksymalną siłę wyciskania przy współczynniku wyciskania λ=36. Świadczy to o stabilnym przebiegu procesu oraz niewielkiej wrażliwości badanego stopu na zmianę częstotliwości oscylacji w analizowanych warunkach procesu.

Na rysunku 6.87 przedstawiono wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60. Dla częstotliwości 3 Hz maksymalna siła wyciskania wyniosła 2296 kN. Przy zwiększeniu częstotliwości do 5 Hz odnotowano nieznaczny wzrost wartości do 2298 kN, natomiast dla 7 Hz siła osiągnęła 2297 kN.



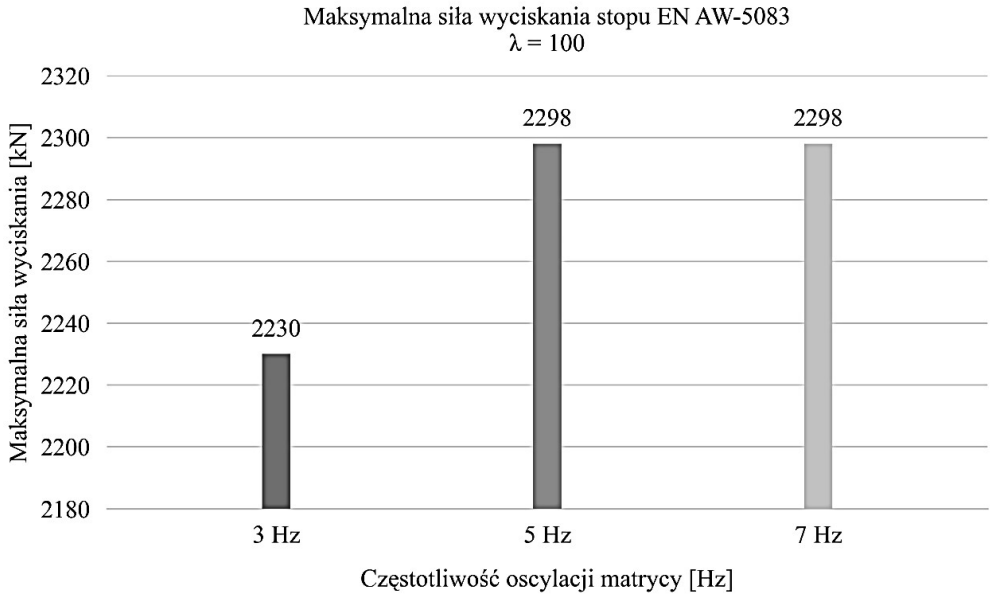
Rysunek 6.87 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=60

Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością wynosiła jedynie 2 kN, co odpowiada zmianie mniejszej niż 0,1%. Tak niewielkie zróżnicowanie wyników wskazuje, że w analizowanym zakresie częstotliwości oscylacji matrycy parametr ten nie wpływa istotnie na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 przy λ=60. Otrzymane wartości potwierdzają stabilny przebieg procesu oraz niewielką wrażliwość badanego stopu na zmianę częstotliwości oscylacji w zastosowanych warunkach technologicznych.

Na rysunku 6.88przedstawiono wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100. Najniższą wartość maksymalnej siły wyciskania zarejestrowano dla częstotliwości 3 Hz i wyniosła ona 2230 kN. Zwiększenie częstotliwości oscylacji do 5 Hz spowodowało wzrost maksymalnej siły wyciskania do 2298 kN, a identyczną wartość uzyskano również dla częstotliwości 7 Hz. Oznacza to wzrost o 68 kN, co odpowiada około 3,1% względem wariantu 3 Hz.

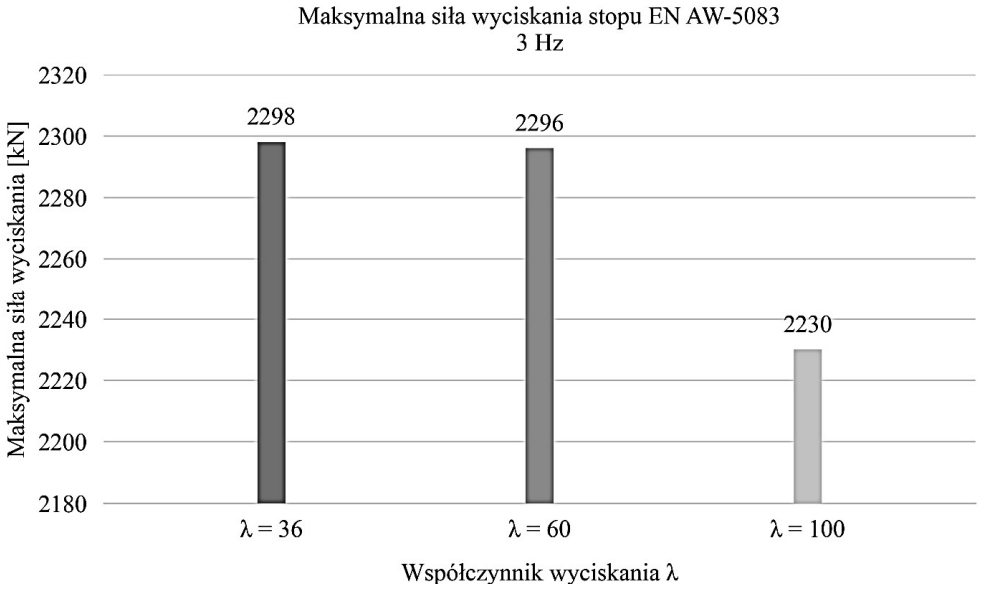
Uzyskane wyniki wskazują, że przy najwyższym analizowanym współczynniku wyciskania (λ=100) wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania jest bardziej wyraźny niż dla λ=36 i λ=60. Jednocześnie brak różnic pomiędzy wartościami uzyskanymi dla 5 i 7 Hz świadczy o osiągnięciu stabilnego poziomu obciążenia układu wyciskającego po przekroczeniu częstotliwości 5 Hz. Otrzymane rezultaty potwierdzają, że dla wyrobów ze stopu Al 5083 nawet przy dużym współczynniku wyciskania proces KOBO przebiega

stabilnie, a zmiany maksymalnej siły wyciskania pozostają niewielkie w porównaniu z materiałami o niższej podatności do odkształcenia plastycznego.



Rysunek 6.88 Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla współczynnika wyciskania λ=100.

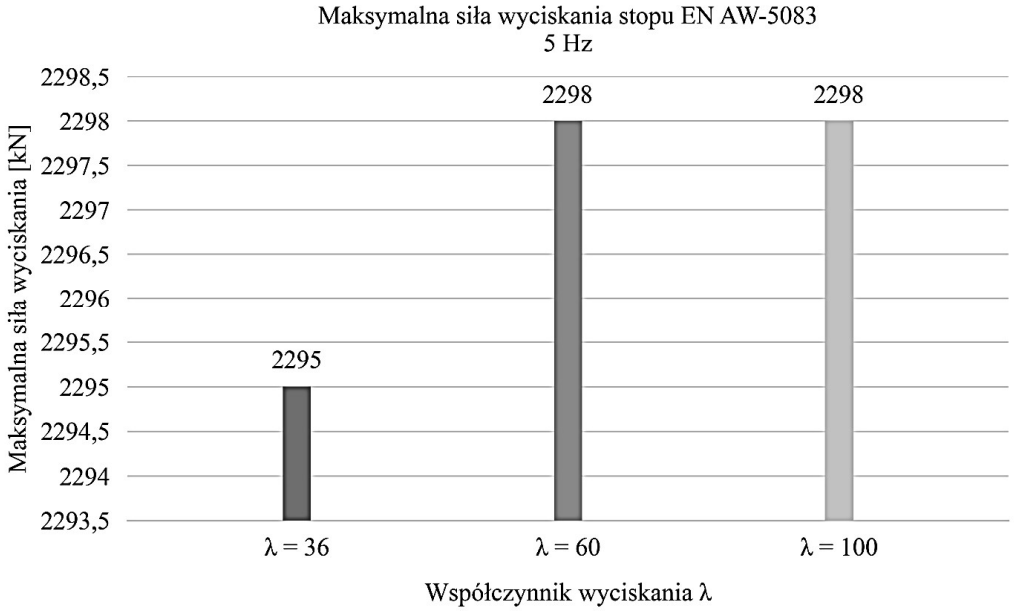
Na rysunku 6.89 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla stałej częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 3 Hz.



Rysunek 6.89 Wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 3 Hz.

Najwyższą wartość maksymalnej siły wyciskania odnotowano dla współczynnika wyciskania λ=36 i wyniosła ona 2298 kN. Dla λ=60 wartość ta była praktycznie identyczna i osiągnęła 2296 kN, co oznacza spadek jedynie o 2 kN (około 0,1%). Wyraźniejszą zmianę zaobserwowano dopiero dla najwyższego współczynnika wyciskania, λ=100, gdzie maksymalna siła wyciskania zmniejszyła się do 2230 kN. W porównaniu z wariantem λ=36 odpowiada to redukcji o 68 kN, czyli około 3,0%.

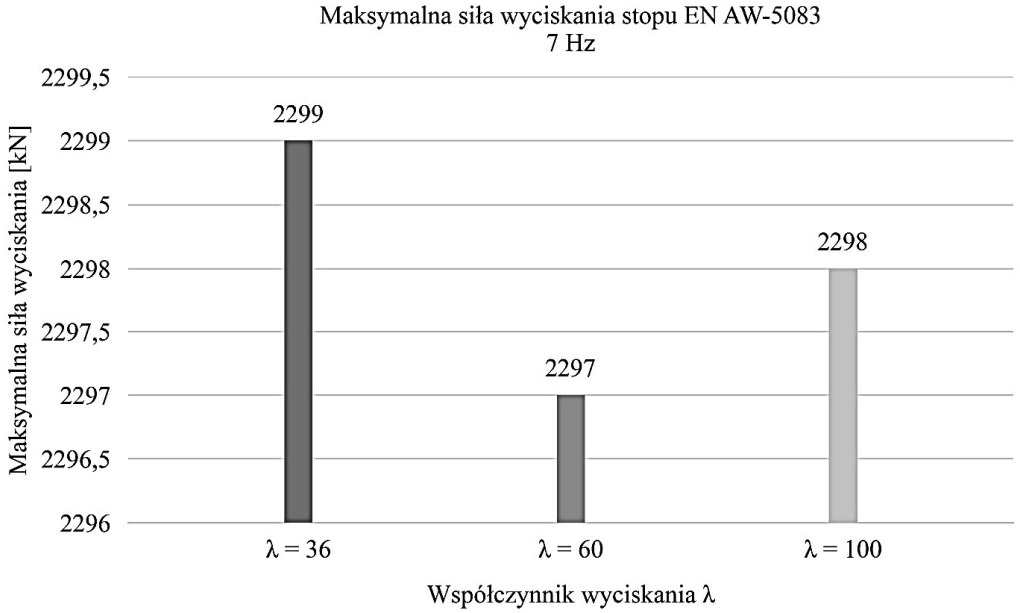
Na rysunku 6.90 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 5 Hz. Najniższą wartość maksymalnej siły wyciskania zarejestrowano dla współczynnika wyciskania λ=36, gdzie osiągnęła ona 2295 kN. Wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania do λ=60 odnotowano nieznaczny wzrost maksymalnej siły wyciskania do 2298 kN. Identyczną wartość uzyskano również dla najwyższego analizowanego współczynnika wyciskania, λ=100. Różnica pomiędzy najniższą i najwyższą wartością wyniosła zaledwie 3 kN, co odpowiada około 0,13%.



Rysunek 6.90 Wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 5 Hz.

Na rysunku 6.91 przedstawiono wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy wynoszącej 7 Hz. Najwyższą wartość maksymalnej siły wyciskania zarejestrowano dla współczynnika wyciskania λ=36, gdzie osiągnęła ona 2299 kN. Dla λ=60 wartość

ta nieznacznie zmniejszyła się do 2297 kN, natomiast dla λ=100 wyniosła 2298 kN. Maksymalna różnica pomiędzy analizowanymi wariantami procesu wynosiła jedynie 2 kN, co odpowiada zmianie mniejszej niż 0,1%.



Rysunek 6.91 Wpływ współczynnika wyciskania na maksymalną siłę wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 podczas procesu KOBO dla częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz.

Przeprowadzona analiza wyników maksymalnej siły wyciskania wyrobów ze stopu Al 5083 wykazała, że zarówno zmiana częstotliwości oscylacji matrycy, jak i współczynnika wyciskania wywierała jedynie niewielki wpływ na wartość maksymalnego obciążenia procesu KOBO. We wszystkich analizowanych wariantach wartości maksymalnej siły wyciskania mieściły się w bardzo wąskim zakresie od 2230 do 2299 kN, co świadczy o wysokiej stabilności procesu oraz dobrej podatności plastycznej badanego stopu.

Analiza wpływu częstotliwości oscylacji matrycy dla poszczególnych współczynników wyciskania wykazała, że dla λ=36 oraz λ=60 zmiana częstotliwości z 3 do 7 Hz praktycznie nie wpływała na wartość maksymalnej siły wyciskania. Różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami nie przekraczały odpowiednio 4 kN i 2 kN, co odpowiada zmianom mniejszym niż 0,2%. Nieco większą różnicę zaobserwowano jedynie dla λ=100, gdzie zwiększenie częstotliwości z 3 do 5 Hz spowodowało wzrost maksymalnej siły wyciskania z 2230 kN do 2298 kN, natomiast dalsze zwiększenie częstotliwości do 7 Hz nie wywołało już istotnych zmian.

Również analiza wpływu współczynnika wyciskania dla stałych częstotliwości 3, 5 i 7 Hz potwierdziła niewielką wrażliwość stopu Al 5083 na zmianę parametrów procesu. Dla częstotliwości 5 Hz i 7 Hz wartości maksymalnej siły wyciskania pozostawały praktycznie niezmienne niezależnie od współczynnika wyciskania, a maksymalne różnice nie przekraczały 3 kN. Jedynie przy częstotliwości 3 Hz zaobserwowano obniżenie maksymalnej siły wyciskania dla λ=100 do 2230 kN, co odpowiadało redukcji o około 3% względem wariantów λ=36 i λ=60.

Uzyskane wyniki wskazują, że proces wyciskania metodą KOBO stopu Al 5083 charakteryzuje się bardzo wysoką stabilnością, a zmiany częstotliwości oscylacji matrycy i współczynnika wyciskania nie powodują istotnych zmian maksymalnego obciążenia układu wyciskającego. Jest to konsekwencją wysokiej plastyczności stopu Al 5083 oraz jego jednofazowej osnowy α-Al umocnionej roztworowo magnezem, która umożliwia efektywny przepływ materiału nawet przy dużych odkształceniach. W przeciwieństwie do odlewniczego stopu AlSi11, zawierającego kruche wydzielenia krzemu i faz międzymetalicznych, stop Al 5083 nie wykazuje wyraźnej zależności maksymalnej siły wyciskania od analizowanych parametrów procesu, co potwierdza jego znacznie korzystniejsze właściwości technologiczne podczas wyciskania metodą KOBO.

Porównanie wyników maksymalnej siły wyciskania obu badanych stopów wykazało odmienne oddziaływanie parametrów technologicznych procesu KOBO na poziom obciążenia układu wyciskającego. W przypadku odlewniczego stopu AlSi11 zwiększenie częstotliwości oscylacji matrycy oraz współczynnika wyciskania prowadziło do wyraźnego zmniejszenia maksymalnej siły wyciskania. Dla współczynnika λ=100 wzrost częstotliwości z 3 do 7 Hz spowodował obniżenie wartości Fmax z 2067 do 1471 kN, czyli o około 28,8%. Odmienną zależność zaobserwowano dla stopu Al 5083, w przypadku, którego zmiany częstotliwości oscylacji i współczynnika wyciskania nie powodowały jednoznacznego zmniejszenia maksymalnej siły. Wartości Fmax mieściły się w zakresie od 2230 do 2299 kN, przy czym dla λ=100 zwiększenie częstotliwości z 3 do 5 Hz prowadziło do wzrostu siły z 2230 do 2298 kN. Uzyskane wyniki wskazują, że wpływ parametrów procesu KOBO na maksymalną siłę wyciskania jest uzależniony od rodzaju stopu oraz jego właściwości i mikrostruktury wyjściowej.

7. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania pozwoliły określić wpływ parametrów wyciskania metodą KOBO na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i jakość powierzchni prętów ze stopów aluminium AlSi11 i Al 5083. Porównanie stopu odlewniczego ze stopem przeznaczonym do przeróbki plastycznej umożliwiło ocenę możliwości zastosowania tej metody do materiałów o odmiennej podatności na odkształcenie plastyczne. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski

1. Uzyskanie ciągłych prętów z odlewniczego stopu AlSi11 potwierdziło możliwość wykorzystania tego materiału do wytwarzania półwyrobów kształtowanych plastycznie. Obecność kruchych cząstek krzemu i faz międzymetalicznych nie wykluczyła jego wyciskania metodą KOBO, mimo ograniczonej podatności na konwencjonalną przeróbkę plastyczną. Wynik ten uzasadnia prowadzenie dalszych badań nad zastosowaniem tej metody do innych stopów trudnoodkształcalnych, których przydatność wymaga jednak odrębnej oceny doświadczalnej.
2. W przypadku stopu AlSi11 przy częstotliwości oscylacji matrycy 7 Hz stwierdzono zmniejszanie maksymalnej siły wyciskania wraz ze wzrostem współczynnika wyciskania. Zależność ta jest odmienna od tendencji opisywanej w literaturze dla wyciskania konwencjonalnego i wskazuje na znaczenie zmiennej drogi odkształcenia w procesie KOBO. Porównanie to ma charakter literaturowy, ponieważ nie prowadzono równoległych prób wyciskania tych samych materiałów bez oscylacyjnego ruchu matrycy.
3. Oceniając efekty wyciskania KOBO, należy uwzględnić zarówno dodatkowe odkształcenie ścinające, jak i warunki cieplne procesu. Rozpoczęcie wyciskania bez nagrzewania wsadu nie oznacza utrzymania temperatury otoczenia podczas całego odkształcania. Z tego względu odniesienia do wyciskania konwencjonalnego na zimno i na gorąco wymagają rozpatrywania odmiennych warunków przebudowy mikrostruktury. Uzyskane wyniki nie stanowią podstawy do przyjęcia, że metoda KOBO w każdych warunkach zapewnia większą wytrzymałość lub jednorodność wyrobów.
4. Zastosowanie współczynników wyciskania λ=36, 60 i 100 umożliwiło przetworzenie obu stopów bez wstępnego nagrzewania wsadu bezpośrednio przed procesem. Przyjęty zakres parametrów pozwolił porównać ich podatność na kształtowanie metodą KOBO.

Różnice między materiałami ujawniły się w wartościach maksymalnej siły wyciskania, zmianach mikrostruktury oraz właściwościach otrzymanych prętów.

5. Najmniejszą maksymalną siłę wyciskania stopu AlSi11, wynoszącą 1471 kN, zarejestrowano przy λ=100 i f=7 Hz. Dla λ=100 zwiększenie częstotliwości oscylacji z 3 do 7 Hz obniżyło Fmax z 2067 do 1471 kN, czyli o 28,8%. Natomiast przy f=7 Hz zwiększenie λ z 36 do 100 spowodowało zmniejszenie Fmax z 1928 do 1471 kN, czyli o 23,7%. Wyniki te potwierdzają możliwość ograniczania maksymalnego obciążenia prasy przez odpowiedni dobór obu parametrów.
6. W przypadku stopu Al 5083 maksymalna siła wyciskania wykazywała znacznie mniejszą wrażliwość na zmianę parametrów procesu i mieściła się w zakresie 2230-2299 kN. Przy częstotliwości 7 Hz dla λ=36, 60 i 100 wartości Fmax wynosiły odpowiednio 2299, 2297 i 2298 kN. Nie stwierdzono jednoznacznej tendencji do zmniejszania maksymalnej siły wraz ze wzrostem częstotliwości oscylacji lub współczynnika wyciskania. Oznacza to, że zależności określone dla AlSi11 nie mogą być bezpośrednio odnoszone do stopu Al 5083.
7. Wyciskanie metodą KOBO powodowało fragmentację cząstek krzemu eutektycznego w stopie AlSi11 oraz zmianę ich kształtu i rozmieszczenia w osnowie aluminiowej. W wybranych wariantach ograniczono występowanie lokalnych skupisk składników mikrostruktury. Bardziej równomierne rozmieszczenie cząstek krzemu i faz międzymetalicznych obserwowano przy większych współczynnikach wyciskania, szczególnie przy λ=100.
8. Wpływ częstotliwości oscylacji matrycy na właściwości mechaniczne stopu AlSi11 zależał od współczynnika wyciskania. Przy 5 Hz korzystny przebieg krzywych rozciągania uzyskano dla λ=60, natomiast przy 7 Hz - dla λ=100, przy którym maksymalne naprężenie rzeczywiste osiągało około 208 MPa. Zwiększanie częstotliwości nie prowadziło do poprawy właściwości wytrzymałościowych we wszystkich wariantach, dlatego oba parametry należy rozpatrywać łącznie.
9. W stopie Al 5083 zaobserwowano zmiany rozmieszczenia cząstek faz wtórnych oraz stopnia ich pasmowego ułożenia. Przy częstotliwości 7 Hz pasmowość na przekrojach wzdłużnych była wyraźniejsza dla λ=36, natomiast przy λ=100 cząstki były rozmieszczone bardziej równomiernie. Zwiększenie współczynnika wyciskania sprzyjało zatem ograniczeniu kierunkowego ułożenia składników mikrostruktury w analizowanych przekrojach.

10. Korzystne połączenie wytrzymałości na rozciąganie i niewielkiego zróżnicowania jej wartości wzdłuż pręta ze stopu Al 5083 uzyskano przy λ=60 i f=5 Hz. Wartości Rm wynosiły 345,43 MPa w części początkowej, 337,01 MPa w części środkowej i 338,40 MPa w części końcowej. Przy λ=100 wytrzymałość była na ogół niższa, mimo bardziej równomiernego rozmieszczenia składników mikrostruktury. Na krzywych rozciągania występowały lokalne wahania naprężenia w zakresie odkształcenia plastycznego, których charakter był zgodny z występowaniem efektu Portevina-Le Chateliera.
11. Mikrotwardość wyrobów zależała od rodzaju stopu, parametrów wyciskania, miejsca pobrania próbki oraz orientacji badanego przekroju. Dla stopu Al 5083 przy λ=100 zwiększeniu częstotliwości oscylacji matrycy z 3 do 7 Hz towarzyszył wzrost średniej mikrotwardości na przekroju poprzecznym w środkowej części pręta z 85,09 do 87,15 HV0,1, czyli o 2,06 HV0,1. Zmianie tej nie odpowiadał analogiczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki wskazują, że wpływ parametrów procesu na mikrotwardość należy oceniać z uwzględnieniem lokalizacji próbki i orientacji przekroju, a wzrost mikrotwardości nie oznacza jednoczesnej poprawy wszystkich właściwości wytrzymałościowych.
12. Dobór współczynnika wyciskania i częstotliwości oscylacji matrycy umożliwiał ograniczenie chropowatości powierzchni prętów. Dla stopu Al 5083 przy f=3 Hz i λ=36 odnotowano Ra=4,338 μm, natomiast przy λ=100 w części końcowej pręta uzyskano Ra=1,07 μm. Dla AlSi11 przy λ=100 i f=5 Hz wartości Ra wynosiły 0,80, 0,97 i 0,95 μm odpowiednio w części początkowej, środkowej i końcowej. Parametry sprzyjające uzyskaniu małej chropowatości nie zawsze odpowiadały warunkom zapewniającym najwyższą wytrzymałość lub najmniejszą maksymalną siłę wyciskania.
13. Badania początku, środka i końca części użytecznej prętów wykazały, że ocena właściwości wyrobu wymaga uwzględnienia miejsca pobrania próbki. Niewielkie różnice wytrzymałości i mikrotwardości w wybranych wariantach nie wykluczały występowania lokalnych niejednorodności mikrostruktury. Wyniki uzyskane dla analizowanych przekrojów i odcinków nie stanowią zatem podstawy do stwierdzenia pełnej jednorodności całej objętości pręta.
14. Uzyskane wyniki wyznaczają kierunki dalszej optymalizacji procesu KOBO, uwzględniającej wymagane właściwości mechaniczne, jakość powierzchni oraz obciążenie prasy. Pominięcie wstępnego nagrzewania wsadu eliminuje zapotrzebowanie na energię związaną z tą operacją, jednak samo zmniejszenie Fmax

nie przesądza o ograniczeniu całkowitej energochłonności procesu. Ocena zużycia energii i opłacalności technologii wymaga uwzględnienia pracy stempla, napędu oscylacyjnego matrycy oraz pozostałych układów urządzenia.

Literatura

[1] Bochniak W., Korbel A., “Plastic flow of aluminium extruded under complex conditions”, Materials Science and Technology, 2000, 16(6), 664-669. DOI: 10.1179/026708300101508243

[2] Korbel A., Bochniak W., Ostachowski P., Błaż L., “Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme”, Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42, 2881-2897.

[3] Bochniak W., Korbel A., “KOBO Type Forming: forging of metals under complex conditions of the process”, Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(1), 120-134. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01033-6.

[4] Długosz P., Bochniak W., Ostachowski P., “The Influence of Conventional or KOBO Extrusion Process on the Properties of AZ91 (MgAl9Zn1) Alloy”, Materials, 2021, 14(21), 6543. DOI: 10.3390/ma14216543.

[5] Brzostowicz A., Polkowski W., “Microstructure Evolution of Aluminum Deformed by Combination of KoBo Extrusion and Differential Speed Rolling (DSR)”, Solid State Phenomena, 2015, 225, 77-84.

[6] Piela K., Błaż L., Jaskowski M., “Effects of Extrusion Parameters by KoBo Method on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminum”, Archives of Metallurgy and Materials, 2013, 58(3). DOI: 10.2478/amm-2013-0055.

[7] Bochniak W., Korbel A., Ostachowski P., Paliborek A., “Mechanical properties of aluminum extruded via the KOBO method with direct and lateral outflow”, International Journal of Materials Research, 2013, 104(10), 974-979. DOI: 10.3139/146.110953.

[8] Snopiński P., Appiah A., Matus K., Kuczek Ł., Żaba K., Balcerzak M., Hajnyš J., „Utilizing PBF-LB/M AlSI10Mg alloy post-processed via KOBO-extrusion and subsequent cold drawing to obtain high-strength wire”, Scientific Reports, 15, 31025, 2025.

[9] Segal, V. M., “Materials processing by simple shear,” Materials Science and Engineering A, 1995, 197, s. 157-164.

[10] Valiev, R. Z., Langdon, T. G., “Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement,” Progress in Materials Science, 2006, 51, s. 881-981.

[11] Zhilyaev, A. P., Langdon, T. G., Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, Progress in Materials Science, 2008, 53, s. 893-979.

[12] Meyers, M. A., Mishra, A., Benson, D. J., “Mechanical properties of nanocrystalline materials,” Progress in Materials Science, 2006, 51, s. 427-556.

[13] Liu X. i in., „State-of-the-Art Review of the Simulation of Dynamic Recrystallization”, Metals, 2024, 14(11), 1230. DOI: 10.3390/met14111230

[14] Snopiński P., Ostachowski P., Matus K., Żaba K., „The Influence of Grain Structure on Mechanical Properties of LPBF AlSi10Mg Alloy Obtained via Conventional and KOBO Extrusion Process”, Symmetry, 2025, 17(5), 709. DOI: 10.3390/sym17050709.

[15] Balawender T., Zwolak M., Bąk Ł., Experimental Analysis of Mechanical Characteristics of KOBO Extrusion Method, „Archives of Metallurgy and Materials”, 2020, 65(2), s. 615-619. DOI: 10.24425/amm.2020.132800.

[16] Nikbakht S., Eftekhari M., Faraji G., Study of Microstructure and Mechanical Properties of Pure Commercial Titanium via Combination of Equal Channel Angular Pressing and Extrusion, 2017.

[17] Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., „Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing”, Journal of Materials Science, 2001, 36, 2835-2843.

[18] Richert M., Liu Q., Hansen N., “Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic-extrusion-compression”, Materials Science and Engineering A, 1999, 260(1-2), 275-283. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)00988-5

[19] Zhang L., Zhang W., Cao B., Chen W., Duan J., Cui G., “Effects of Texture and Grain Size on the Yield Strength of ZK61 Alloy Rods Processed by Cyclic Extrusion and Compression”, Materials, 2017, 10(11), 1234. DOI: 10.3390/ma10111234

[20] Richert M., “Features of Cyclic Extrusion Compression: Method, Structure & Materials Properties”, Solid State Phenomena, 2006, 114, 19-28.

[21] Richert M., “Perspectives of Microstructure Refinement of Aluminum and Its Alloys by the Reciprocating Extrusion (Cyclic Extrusion Compression-CEC)”, Materials, 2022, 15(11), 4006. DOI: 10.3390/ma1511400

[22] Rosochowski A. (red.), Severe Plastic Deformation Technology, Whittles Publishing, Dunbeath, UK, 2017. ISBN 978-1-84995-091-6.

[23] Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T., “Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process”, Acta Materialia, 1999, 47(2), 579-583.

[24] Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T., Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, Acta Materialia, 1999, 47(2), 579-583. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6

[25] Zettl B., Merklein M., “Robot-assisted surface treatment strategies of AA6014 sheet metal for accumulative roll bonding”, ESAFORM 2021, 2021. DOI: 10.25518/esaform21.3831

[26] Khan H.A., Asim K., Akram F., Hameed A., Khan A., Mansoor B., „Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Perspectives”, *Metals*, 2021, 11(9), art. 1344. DOI: 10.3390/met11091344

[27] Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T., “Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process”, Acta Materialia, 1999, 47(2), 579-583. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6.

[28] Avitzur B., Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill, New York, 1968.

[29] Topolski K., Pachla W., Garbacz H., Progress in hydrostatic extrusion of titanium, Journal of Materials Science, 2013, 48, 4543-4548. DOI: 10.1007/s10853-012-7086-7

[30] Korbel A., Bochniak W., “Stratified plastic flow in metals”, International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 128-129, 269-276. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.04.006.

[31] Bochniak W., Ostachowski P., Korbel A., Pieła K., “Superplastic Flow of Metals Extruded by KoBo Method”, Materials Science Forum, 2010, 667-669, 1039-1044.

[32] Maciejewski J., Mróz Z., “An upper-bound analysis of axisymmetric extrusion assisted by cyclic torsion”, Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206, 333-344. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.061.

[33] Korbel A., Bochniak W., „Sposób wyciskania wyrobów, zwłaszcza metalowych”, patent PL 174474 B1, zgłoszenie P.303671 z 30.05.1994, udzielony 30.01.1998, opublikowany 31.08.1998

[34] Bochniak W., Ostachowski P., Korbel A., Łagoda M., Potential of the KOBO extrusion process for nonferrous metals in the form of solids and chips, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127 (2023), 733-750. DOI: 10.1007/s00170-023-11596-7

[35] Korbel A., Pospiech J., Bochniak W., Tarasek A., Ostachowski P., Bonarski J., “New structural and mechanical features of hexagonal materials after room temperature extrusion using the KoBo method”, International Journal of Materials Research, 2011, 102(4), 464-473. DOI: 10.3139/146.110490

[36] Bieda M., Boczkal S., Koprowski P., Sztwiertnia K., Pieła K., “Texture and microstructure of pure (6N) and commercially pure aluminum after deformation by extrusion with forward-backward rotating die (KOBO)”, Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(1), 461-468. DOI: 10.1515/amm-2016-0083.

[37] Korbel A., Bochniak W., “Liquid-like behavior of solid metals”, Manufacturing Letters, 2017, 11, 5-7.

[38] Koprowski P., Bieda M., Boczkal S., Jarzębska A., Ostachowski P., Kawałko J., Czeppe T., Maziarz W., Łagoda M., Sztwiertnia K., “AA6013 aluminium alloy deformed by forward-backward rotating die (KoBo): Microstructure and mechanical properties control by changing the die oscillation frequency”, Journal of Materials Processing Technology, 2018, 253, 34-42.

[39] Topolski K., Bochniak W., Łagoda M., Ostachowski P., Garbacz H., “Structure and properties of titanium produced by a new method of chip recycling”, Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248, 80-91. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.005

[40] Korbel A., Bochniak W., “Refinement and control of the metal structure elements by plastic deformation”, Scripta Materialia, 2004, 51(8), 755-759.

[41] Heyduk F., Ziółkiewicz S., Bochniak W., Korbel A., “Manufacturing rods for production of spot welding electrodes using the KOBO extrusion method”, Obróbka Plastyczna Metali / Metal Forming, 2015, 26(4), 325-334.

[42] Bochniak W., Teoretyczne i praktyczne aspekty plastycznego kształtowania metali. Metoda KoBo, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2009, ISBN 978-83-7464-267-5.

[43] Bochniak W., Korbel A., Ostachowski P., Ziółkiewicz S., Borowski J., „Wyciskanie metali i stopów metodą KOBO”, Obróbka Plastyczna Metali, 2013, 24(2), 83-97

[44] Bochniak W., Korbel A., “Extrusion of CuZn39Pb2 Alloy by the KOBO Method”, Engineering Transactions, 1999, 47(3-4), 351-367.

[45] Śliwa R.E., Balawender T., Hadasik E., Kuc D., Gontarz A., Korbel A., Bochniak W., “Metal Forming of Lightweight Magnesium Alloys for Aviation Applications”, Archives of Metallurgy and Materials, 2017, 62(3), 1559-1566. DOI: 10.1515/amm-2017-0239.

[46] Pospiech J., Korbel A., Bonarski J.T., Bochniak W., Tarkowski L., “Microstructure and Texture of Mg-Based AZ Alloys after Heavy Deformation under Cyclic Strain Path Change Conditions”, Materials Science Forum, 2008, 584-586, 565-570

[47] Korbel A., Bochniak W., “The KoBo method of metal structure refinement”, Al Alluminio e Leghe, 2005, 17(9/180), 136-139

[48] Bochniak W., Marszowski K., Korbel A., “Theoretical and practical aspects of the production of thin-walled tubes by the KOBO method”, Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(1), 44-53.

[49] Zwolak M., Śliwa R.E., „Fizyczne modelowanie plastycznego płynięcia w procesie wyciskania metodą KOBO z użyciem matryc o różnej geometrii”, Obróbka Plastyczna Metali, 2017, 28(4).

[50] Zwolak, M., Śliwa, R., “Analysis of the influence of dies geometry on the process extrusion force and properties of the extrudate obtained in the process of cold extrusion of 7075 aluminum alloy by the KOBO method”, Materials Science-Poland, 2024, 42(1), 92-106.

[51] Adamczyk-Cieślak B., Mizera J., Kurzydłowski K.J., “Microstructures in the 6060 aluminium alloy after various severe plastic deformation treatments”, Materials Characterization, 2011, 62(3), 327-332. DOI: 10.1016/j.matchar.2011.01.009

[52] Wójcik M., Skrzat A., “Numerical modelling of the KOBO extrusion process using the Bodner-Partom material model”, Meccanica, 2022, 57, 2213-2230. DOI: 10.1007/s11012-022-01569-7.

[53] Wójcik M., Skrzat A., “The Coupled Eulerian-Lagrangian Analysis of the KOBO Extrusion Process”, Archives of Metallurgy and Materials, 2022.

[54] Agnew S.R., Duygulu Ö., „Plastic anisotropy and the role of non-basal slip in magnesium alloy AZ31B”, International Journal of Plasticity, 2005, 21(6), 1161-1193. DOI: 10.1016/j.ijplas.2004.05.018.

[55] Estrin Y., Vinogradov A., „Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science”, *Acta Materialia*, 2013, 61(3), 782-817. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.038.

[56] Zwolak M., Śliwa R.E., Pawłowska B., Wędrychowicz A., “Possibility of Deformation of Billet with Various Internal Structure in KOBO Extrusion”, Key Engineering Materials, 2022, vol. 926, s. 511-522. DOI: 10.4028/p-32j6m1

[57] Babu S.R., Michelic S.K., Overview of application of automated SEM/EDS measurements for inclusion characterization in steelmaking, MetalMat, 2024. https://doi.org/10.1002/metm.18

[58] Ii S., Quantitative Characterization by Transmission Electron Microscopy and Its Application to Interfacial Phenomena in Crystalline Materials, Materials, 2024, 17(3), 578. https://doi.org/10.3390/ma17030578

[59] Goldstein J. I., Newbury D. E., Michael J. R., Ritchie N. W. M., Scott J. H. J., Joy D. C., Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 4th ed., Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-1-4939-6676-9.

[60] Newbury D. E., Ritchie N. W. M., “Performing elemental microanalysis with high accuracy and high precision by scanning electron microscopy/silicon drift detector energy-dispersive X-ray spectrometry (SEM/SDD-EDS)”, Journal of Materials Science, 2015, 50, 493-518. DOI: 10.1007/s10853-014-8685-2.

[61] Čalkovský M., Müller E., Gerthsen D., “Quantitative analysis of backscattered-electron contrast in scanning electron microscopy”, Journal of Microscopy, 2023, 289(1), 32-47. DOI: 10.1111/jmi.13148

[62] Babu S.R., Michelic S.K., Overview of application of automated SEM/EDS measurements for inclusion characterization in steelmaking, MetalMat, 2024. https://doi.org/10.1002/metm.18

[63] Friel J.J., Lyman C.E., Recent Advances in Quantitative Energy Dispersive X-ray Spectroscopy for Materials Characterization, Microscopy and Microanalysis, 2023.

[64] Doddapaneni S., Kumar S., Sharma S., Shankar G., Shettar M., Kumar N., Aroor G., Ahmad S. M., “Advancements in EBSD Techniques: A Comprehensive Review on Characterization of Composites and Metals, Sample Preparation, and Operational Parameters”, Journal of Composites Science, 2025, 9(3), 132. DOI: 10.3390/jcs9030132

[65] Zhang R., Zheng J.-H., Jiang J., “Dynamic recrystallisation: A quantitative study on grain boundary characteristics and dependence on temperature and strain rate in an aluminium alloy”, Acta Materialia, 2024, 278, 120266.

[66] Wang X., Li Y., Zhang H., Recent Progress in Microstructural Characterization of Aluminum Alloys, Journal of Materials Research and Technology, 2024.

[67] Dash S.S., Chen D., „A Review on Processing-Microstructure-Property Relationships of Al-Si Alloys: Recent Advances in Deformation Behavior”, Metals, 2023, 13(3), art. 609. DOI: 10.3390/met13030609.

[68] Davis J.R. (red.), Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993. ISBN 978-0-87170-496-2.

[69] Hatch, J. E., Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM International, 1984.

[70] PN-EN ISO 6892-1:2020-05, Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.

[71] Hosford W.F., Mechanical Behavior of Materials, 2nd ed., Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-19569-0.

[72] Dieter G.E., Mechanical Metallurgy, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1986. ISBN 0-07-016893-8.

[73] Semiatin S.L. (red.), ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming, ASM International, Materials Park, Ohio, 2005. ISBN: 978-0-87170-708-6.

[74] Kumar K.S., Brown S.A., Pickens J.R., “Microstructural evolution during aging of an AlCuLiAgMgZr alloy”, Acta Materialia, 1996, 44(5), 1899-1915. DOI: 10.1016/1359-6454(95)00319-3

[75] Cottrell A.H., An Introduction to Metallurgy, Edward Arnold, London, 1967.

[76] Callister W.D. Jr., Rethwisch D.G., Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th ed., John Wiley & Sons, 2010.

[77] Barrett C.S., Massalski T.B., Structure of Metals: Crystallographic Methods, Principles and Data, 3rd revised ed., Pergamon Press, Oxford, 1980.

[78] Hull D., Bacon D.J., Introduction to Dislocations, 5th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011.

[79] European Aluminium, Vision 2050: European Aluminium's Contribution to the EU's Mid-Century Low-Carbon Roadmap. A Vision for Strategic, Low Carbon and Competitive Aluminium, 2019.

[80] Polmear I.J., Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals, 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2005.

[81]Hatch J.E. (red.), Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM International, Metals Park, Ohio, 1984.

[82] ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990

[83] Lumley R. (red.), Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Recent Advances, Woodhead Publishing / Elsevier, 2018. ISBN 978-0-08-102063-0.

[84] Polmear, I., Light Alloys, Butterworth-Heinemann, 2005.

[85] Kaufman J.G., Introduction to Aluminum Alloys and Tempers, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000.

[86] Totten G.E., MacKenzie D.S. (red.), Handbook of Aluminum. Volume 1: Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker / CRC Press, New York, 2003.

[87] Mondolfo L.F., Aluminum Alloys: Structure and Properties, Butterworths, London, 1976.

[88] Segal V., „Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD)", Materials, 2018, 11(7), 1175. DOI: 10.3390/ma11071175.

[89]Bogucki R., Sulikowska K., Bieda M., Ostachowski P., Sztwiertnia K., „Analysis of Microstructure and Mechanical Properties Changes in AA1050 Aluminum Subjected to ECAP and KoBo Processes", *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, 60(4), 3063-3068. DOI: 10.1515/amm-2015-0489.

[90] Snopiński P., Matus K., "Characterisation of Microstructure and Special Grain Boundaries in LPBF AlSi10Mg Alloy Subjected to the KoBo Extrusion Process", Symmetry, 2023, 15(9), 1634. DOI: 10.3390/sym15091634.

[91] Wójcik M., Skrzat A., “Coupled Thermomechanical Eulerian-Lagrangian Analysis of the KOBO Extrusion Process”, Archives of Metallurgy and Materials, 2022, 67(3), 1185-1193. DOI: 10.24425/amm.2022.139719.

[92] Xu C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G., “Producing Superplastic Ultrafine-Grained Aluminum Alloys through Severe Plastic Deformation”, Materials Science Forum, 2004, 447-448, 403-410. DOI: 10.4028

[93] Prasad Y. V. R. K., “Processing Maps: A Status Report”, Journal of Materials Engineering and Performance, 2003, 12(6), 638-645. DOI: 10.1361/105994903322692420.

[94] Leshchynsky V., Rubach R., De Pamphilis M., Coella A., Matteazzi P., Garbiec D., Volf V., “Spark Plasma Sintering and KOBO Extrusion as Effective Route for Manufacturing Al-nSiC Composite Profiles

[95] Gronostajski Z., Pater Z., Madej Ł., Gontarz A., Lisiecki Ł., Łukaszek-Sołek A., Łuksza J., Mróz S., Muskalski Z., Muzykiewicz W., Pietrzyk M., Śliwa R. E., Tomczak J., Wiewiórowska S., Winiarski G., Zasadziński J., Ziółkiewicz S., Recent development trends in metal forming, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, vol. 19, nr 3, s. 898-941. DOI: 10.1016/j.acme.2019.04.005. ISSN: 1644-9665.

[96] Leśniak D., Zasadziński J., Libura W., Gronostajski Z., Śliwa R., Leszczyńska-Madej B., Kaszuba M., Woźnicki A., Płonka B., Widomski P., Madura J., Latest advances in extrusion processes of light metals, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, vol. 24, nr 3, art. 184, s. 1-53. DOI: 10.1007/s43452-024-00988-5. ISSN: 1644-9665.

[97] Zwolak M., Śliwa R. E., Analysis of the influence of dies geometry on the process extrusion force and properties of the extrudate obtained in the process of cold extrusion of 7075 aluminum alloy by the KOBO method, Materials Science-Poland, 2024, vol. 42, nr 1, s. 92-106. DOI: 10.2478/msp-2024-0008. eISSN: 2083-134X.

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza Rzeszów, 2026
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Tytuł: *Mechaniczne i mikrostrukturalne aspekty odkształcania plastycznego materiałów metalicznych w procesie wyciskania metodą KOBO*

Autor: mgr inż. Aleksandra Wędrychowicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Romana Ewa Śliwa
Promotor pomocniczy: dr inż. Marek Zwolak

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących kształtowania mikrostruktury i właściwości stopów aluminium 5083 oraz AlSi11 w procesie wyciskania metodą KOBO. Do badań wybrano materiały różniące się składem chemicznym, mikrostrukturą wyjściową oraz podatnością do przeróbki plastycznej. Stop 5083 jest stopem przeznaczonym do przeróbki plastycznej, natomiast odlewniczy stop AlSi11, ze względu na obecność kruchej eutektyki krzemowej, charakteryzuje się ograniczoną odkształcalnością w warunkach konwencjonalnych procesów kształtowania.

Celem pracy było określenie wpływu częstotliwości oscylacji matrycy oraz współczynnika wyciskania na przebieg procesu KOBO, mikrostrukturę, właściwości mechaniczne, mikrotwardość i jakość powierzchni otrzymanych prętów. Proces prowadzono w temperaturze otoczenia, stosując wsad o średnicy 60 mm, częstotliwości oscylacji matrycy wynoszące 3, 5 i 7 Hz oraz współczynnik wyciskania $\lambda = 36$, $\lambda = 60$i $\lambda = 100$. Kąt oscylacji matrycy wynosił ±8°, natomiast prędkość przesuwu stempla była równa 0,1 mm/s.

Zakres badań obejmował rejestrację maksymalnej siły wyciskania, statyczną próbę rozciągania, pomiary mikrotwardości i chropowatości powierzchni oraz obserwacje mikrostruktury na przekrojach podłużnych i poprzecznych prętów. Badania mikrostrukturalne

przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej. Analizę morfologii i rozmieszczenia składników fazowych uzupełniono mikroanalizą składu chemicznego EDS.

Wyniki wykazały, że proces KOBO umożliwia skuteczne kształtowanie obu badanych stopów. Szczególnie istotnym rezultatem było otrzymanie ciągłych prętów z odlewniczego stopu AlSi11, co potwierdziło możliwość zastosowania tej metody do materiałów o ograniczonej podatności do przeróbki plastycznej. Stwierdzono, że częstotliwość oscylacji matrycy i współczynnik wyciskania wpływają na wartość maksymalnej siły procesu. Dla stopu AlSi11 przy $\lambda = 100$ zwiększenie częstotliwości z 3 do 7 Hz spowodowało zmniejszenie maksymalnej siły wyciskania z 2067 do 1471 kN. Wzrost współczynnika wyciskania również sprzyjał ograniczeniu wartości siły, przy czym zakres tego efektu zależał od rodzaju stopu.

Proces KOBO doprowadził do przebudowy mikrostruktury obu materiałów. W stopie AlSi11 stwierdzono fragmentację składników eutektyki krzemowej, zmianę ich morfologii oraz bardziej równomierne rozmieszczenie w osnowie aluminiowej. W stopie 5083 obserwowano rozdrobnienie i redystrybucję cząstek faz wtórnych oraz ograniczenie niejednorodności mikrostruktury. Zwiększenie współczynnika wyciskania sprzyjało uzyskaniu bardziej jednorodnego rozmieszczenia składników strukturalnych.

Wykazano również wpływ parametrów procesu na właściwości mechaniczne, rozkład mikrotwardości i jakość powierzchni prętów. W stopie 5083 na krzywych rozciągania występowały serracje charakterystyczne dla efektu Portevina-Le Chateliera. Wzrost współczynnika wyciskania prowadził zasadniczo do zmniejszenia chropowatości powierzchni wyrobów. Nie stwierdzono znacznych różnic mikrotwardości świadczących o istotnej niejednorodności materiału.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że odpowiedni dobór parametrów procesu KOBO umożliwia kontrolowane oddziaływanie na przebieg wyciskania, mikrostrukturę oraz właściwości stopów aluminium. Wykazano jednocześnie, że zakres zmian zależy zarówno od częstotliwości oscylacji matrycy i współczynnika wyciskania, jak i od rodzaju oraz mikrostruktury wyjściowej materiału.

Rzeszow University of Technology
The Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics

Rzeszow, 2026

Abstract of doctorate thesis

Title: ***Mechanical and Microstructural Aspects of Plastic Deformation of Metallic Materials in the KOBO Extrusion Process***

Author: mgr inż. Aleksandra Wędrychowicz
Supervisor: prof. dr hab. inż. Romana Ewa Śliwa
Auxiliary supervisor: dr inż. Marek Zwolak

Abstract: This dissertation presents the results of research on shaping the microstructure and properties of 5083 and AlSi11 aluminium alloys by the KOBO extrusion process. The investigated materials differed in their chemical composition, initial microstructure and susceptibility to plastic deformation. The 5083 alloy is intended for plastic working, whereas the cast AlSi11 alloy exhibits limited deformability under conventional forming conditions due to the presence of a brittle silicon eutectic.

The main objective of the study was to determine the influence of the die oscillation frequency and extrusion ratio on the course of the KOBO process, as well as on the microstructure, mechanical properties, microhardness and surface quality of the obtained rods. The extrusion process was performed at room temperature using billets with a diameter of 60 mm. Die oscillation frequencies of 3, 5 and 7 Hz and extrusion ratios of $\lambda = 36$, $\lambda = 60$and $\lambda = 100$were applied. The die oscillation angle was ±8°, while the punch displacement rate was 0.1 mm/s.

The experimental programme included recording the maximum extrusion force, tensile testing, microhardness measurements, surface roughness measurements and microstructural observations of longitudinal and transverse sections of the extruded rods. The microstructure was examined using light microscopy and scanning electron microscopy. The evaluation of the morphology and distribution of individual microstructural constituents was supplemented by energy-dispersive X-ray spectroscopy.

The results demonstrated that the KOBO process enables effective plastic forming of both investigated aluminium alloys. A particularly important result was the successful production of continuous rods from the cast AlSi11 alloy, confirming the applicability of the KOBO method to materials with limited susceptibility to plastic working. The die oscillation frequency and extrusion ratio were found to affect the maximum extrusion force. For the AlSi11 alloy extruded at $\lambda = 100$, increasing the oscillation frequency from 3 to 7 Hz reduced the maximum extrusion force from 2067 to 1471 kN. An increase in the extrusion ratio also contributed to a reduction in the extrusion force, although the extent of this effect depended on the alloy type.

The KOBO process resulted in a significant modification of the microstructure of both investigated materials. In the AlSi11 alloy, fragmentation of the silicon eutectic constituents, changes in their morphology and a more uniform distribution within the aluminium matrix were observed. In the 5083 alloy, the process resulted primarily in the fragmentation and redistribution of secondary-phase particles and a reduction in microstructural heterogeneity. Increasing the extrusion ratio generally promoted a more uniform distribution of the microstructural constituents.

The process parameters also affected the mechanical properties, microhardness distribution and surface quality of the rods. Serrations associated with the Portevin-Le Chatelier effect were observed on the tensile curves of the 5083 alloy. Increasing the extrusion ratio generally reduced the surface roughness of the products. The microhardness measurements did not reveal substantial variations that would indicate significant material heterogeneity.

The obtained results confirmed that an appropriate selection of the KOBO process parameters enables controlled modification of the extrusion conditions, microstructure and properties of aluminium alloys. It was also demonstrated that the extent and character of these changes depend on the die oscillation frequency, extrusion ratio, alloy type and initial microstructure of the processed material.