



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA Inżynieria Materiałowa

ROZPRAWA DOKTORSKA

Badanie wpływu procesów metalurgicznych na poprawę jakości odlewów ze stopów EN AC-46000 i EN AC-44200 z uwzględnieniem obróbki mechanicznej i powierzchniowej

Autor: mgr inż. Patryk Korban

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Beata Leszczyńska-Madej, prof. AGH

Promotor pomocniczy: dr inż. Anna Wąsik

Praca wykonana:

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Metali Nieżelaznych/Katedra Nauki o Materiałach i Inżynierii
Metali Nieżelaznych

Kraków, 2024

Pragnę serdecznie podziękować Pani prof. Beacie Leszczyńskiej-Madej, za opiekę naukową, poświęcony czas, pomoc w badaniach oraz rady udzielane mi podczas opracowywania wyników

Pani dr inż. Annie Wąsik za wsparcie w trakcie w realizacji badań oraz wskazówki merytoryczne

*Wydziałowi Metali Nieżelaznych i Władzom Dziekańskim za możliwość realizacji badań
Pracownikom odlewni Meta-Zel za pomoc w wykonaniu odlewów i cenną wiedzę na temat
praktycznych aspektów procesów produkcyjnych
oraz mojej Rodzinie i Bliskim za wyrozumiałość i wsparcie*

STRESZCZENIE	5
SUMMARY	6
WSTĘP.....	7
1. PRZEGLĄD LITERATURY	8
1.1. Odlewnicze stopy aluminium	8
1.1.1. Własności fizyczne i mechaniczne aluminium.....	9
1.1.2. Wpływ dodatków stopowych na mikrostrukturę i własności odlewniczych stopów aluminium	10
1.1.3. Zanieczyszczenia i porowatości w odlewniczych stopach aluminium.....	12
1.1.4. Modyfikacja odlewniczych stopów aluminium.....	15
1.1.5. Charakterystyka stopu AlSi12	17
1.1.6. Charakterystyka stopu AlSi9Cu3	19
1.1.7. Zastosowanie odlewniczych stopów aluminium	20
1.2. Metody odlewania stopów aluminium.....	21
1.2.1. Podstawy teoretyczne procesu krzepnięcia	23
1.2.2. Odlewanie do form piaskowych.....	25
1.2.3. Odlewanie skorupowe	27
1.2.4. Odlewanie kokilowe.....	28
1.2.5. Odlewanie pod wysokim ciśnieniem.....	29
1.2.6. Odlewanie ciągłe i półciągłe	31
1.2.7. Odlewanie próżniowe.....	32
1.2.8. Odlewanie pod niskim ciśnieniem	34
1.3. Metody rafinacji metalu.....	35
1.3.1. Rafinacja żużlowa	36
1.3.2. Rafinacja barbotażowa	38
1.3.3. Rafinacja łączona	40
1.4. Metody czyszczenia i obróbki wykańczającej odlewów	41
1.4.1. Metody czyszczenia	42
1.4.2. Metody obróbki wykańczającej.....	45
1.4.3. Powłoki ochronne.....	45
1.5. Krytyczna analiza stanu zagadnienia	47
2. CEL I TEZA PRACY.....	51
3. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE	53
3.1. Materiały do badań.....	53
3.2. Proces rafinacji barbotażowej	54
3.3. Proces odlewania ciśnieniowego.....	55
3.4. Określenie stopnia zagazowania stopów.....	56

3.5. Badania mikrostruktury próbek.....	57
3.5.1 Analiza ilościowa obrazu	57
3.6 Badania z zastosowaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej	58
3.7 Badania własności mechanicznych	59
3.7.1 Jednoosiowa próba ściskania	59
3.7.2 Badania twardości metodą Brinella.....	59
3.8 Badania chropowatości odlewów.....	59
4. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH.....	60
4.1. Wyniki badania wlewków i odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi12	60
4.1.1. Wyniki badania mikrostruktury próbek.....	60
4.1.2. Wyniki pomiarów liczby gazowej wlewków	84
4.1.3. Wyniki badań tomograficznych.....	86
4.1.4. Wyniki badań własności mechanicznych	97
4.1.4.1. Wyniki uzyskane w jednoosiowej próbie ściskania.....	97
4.1.4.2. Wyniki pomiarów twardości metodą Brinella	103
4.1.5. Wyniki pomiarów chropowatości odlewów	105
4.2. Wyniki badania wlewków i odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi9Cu3	108
4.2.1. Wyniki badania mikrostruktury próbek.....	108
4.2.2. Wyniki pomiarów liczby gazowej wlewków	136
4.2.3. Wyniki badań tomograficznych.....	137
4.2.4. Wyniki badań własności mechanicznych	149
4.2.4.1. Wyniki uzyskane w jednoosiowej próbie ściskania.....	149
4.2.4.2. Wyniki pomiarów twardości metodą Brinella	152
4.2.5. Wyniki pomiarów chropowatości odlewów	155
5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ.....	158
6. WNIOSKI	167
7. BIBLIOGRAFIA	168
SPIS RYSUNKÓW	178
SPIS TABEL	186

STRESZCZENIE

Tematyka pracy dotyczy zagadnień związanych z odlewami siluminowym, wykorzystywanymi w różnych gałęziach przemysłu, a realizowana była we współpracy z Odlewnią Ciśnieniową Meta-Zel sp. z o.o.. Badania prowadzono na dwóch stopach aluminium AlSi9Cu3 oraz AlSi12 i obejmowały one cały cykl technologiczny, począwszy od topienia metalu w piecach indukcyjnych, poprzez odlewanie na maszynach ciśnieniowych zimno-komorowych, aż po obróbkę końcową wybranych detali. Materiał wsadowy składał się z różnych proporcji czystych gąsek i złomu (80, 70 i 60%). Proces rafinacji barbotażowej prowadzono przez: 0, 7, 9 i 15 minut. Analizowano podstawowe własności mechaniczne, mikrostrukturę, porowatość, stopień zagazowania oraz chropowatość powierzchni odlewów. Celem prowadzonych badań była optymalizacja procesów produkcyjnych wybranych odlewów, pod kątem poprawy ich jakości oraz eliminacji braków na poszczególnych etapach procesu technologicznego. Przeprowadzone badania wykazały, że kluczowymi parametrami wpływającymi na własności mechaniczne i mikrostrukturę wlewków i odlewów są czas rafinacji oraz zawartość złomu obiegowego. W przypadku wlewków i odlewów ze stopu AlSi9Cu3, większa zawartość miedzi oraz żelaza sprzyjała tworzeniu się twardych faz międzymetalicznych, co miało pozytywny wpływ na zwiększenie własności mechanicznych. Wzrost zawartości złomu obiegowego prowadził z kolei do pogorszenia plastyczności materiału, a dłuższy czas rafinacji sprzyjał poprawie mikrostruktury i zmniejszeniu porowatości. W przypadku wlewków i odlewów wykonanych ze stopu AlSi12, z powodu niższej zawartości pierwiastków stopowych, twardość i wytrzymałość na ściskanie były niższe, a materiał charakteryzował się lepszą plastycznością. Rafinacja barbotażowa przyczyniła się do zmniejszenia porowatości gazowej i poprawy jednorodności mikrostruktury w obu stopach, przy czym odlewy wykazywały znacznie mniejszą porowatość niż wlewki. Uzyskane wyniki badań dowiodły, że optymalnym czasem rafinacji dla uzyskania odlewów cechujących się odpowiednimi własnościami mechanicznymi oraz ograniczoną porowatością jest 9 minut. Odlewy wykonane ze stopów rafinowanych przez 15 minut cechowały się wyższymi własnościami mechanicznymi, jednak w warunkach przemysłowych stosowanie tak długiego czasu rafinacji jest mniej opłacalne.

SUMMARY

The work deals with issues related to silicone castings used in various industries and was carried out in cooperation with the Meta-Zel Pressure Foundry Ltd. The research was conducted on two aluminium alloys, AlSi9Cu3 and AlSi12, and covered the entire technological cycle, starting from melting the metal in induction furnaces, through casting on cold-chamber pressure machines, to the final processing of selected parts. The charge consisted of different proportions of pure ingots and circulating scrap (80, 70 and 60%). The barbotage refining process was carried out for: 0, 7, 9 and 15 minutes. The basic mechanical properties, microstructure, porosity, density index and surface roughness of the castings were analyzed. The aim of the conducted research was to optimize the production processes of selected castings, with a view to improving their quality and eliminating defects at individual stages of the technological process. The research carried out showed that the key parameters affecting the mechanical properties and microstructure of ingots and castings are the refining time and the content of circulating scrap. In the case of AlSi9Cu3 alloy ingots and castings, higher copper and iron content favored the formation of hard intermetallic phases, which had a positive effect on increasing mechanical properties. An increase in the content of circulating scrap, on the other hand, led to a decrease in the material's ductility, while a longer refining time improved the microstructure and reduced porosity. In the case of ingots and castings made from the AlSi12 alloy, the lower content of alloying elements resulted in lower hardness and compressive strength, while the material exhibited better ductility. Barbotage refining contributed to a reduction in gas porosity and improved the homogeneity of the microstructure in both alloys, with castings showing significantly lower porosity than ingots. The results indicated that the optimal refining time for achieving castings with adequate mechanical properties and reduced porosity is 9 minutes. Castings made from alloys refined for 15 minutes exhibited higher mechanical properties, but in industrial conditions, using such a long refining time may be less cost-effective.

WSTĘP

Niniejsza praca doktorska dotyczy badań nad rafinacją barbotażową stopów AlSi9Cu3 i AlSi12 , szeroko stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, AGD oraz budownictwie. Stopy te charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, twardością i plastycznością, co czyni je popularnym materiałem w licznych zastosowaniach. Mimo ich powszechnego użycia, procesy przetwarzania, szczególnie w kontekście wykorzystania złomu obiegowego, nadal wymagają optymalizacji, co jest przedmiotem intensywnych badań. Proces rafinacji barbotażowej polega na intensywnym mieszaniu ciekłego stopu przy użyciu gazów obojętnych, co prowadzi do eliminacji zanieczyszczeń, zmniejszenia porowatości oraz poprawy jednorodności mikrostruktury. Jest to kluczowy element produkcji wysokiej jakości odlewów, zwłaszcza w kontekście złomu obiegowego, który często zawiera niepożądane zanieczyszczenia i może negatywnie wpływać na mikrostrukturę materiału. Wysoka zawartość złomu może prowadzić do zwiększenia ilości faz międzymetalicznych, co z kolei wpływa na zmniejszenie plastyczności i zwiększenie twardości materiału. Zaletą rafinacji barbotażowej jest jej zdolność do poprawy własności mechanicznych stopów poprzez kontrolę rozkładu i wielkości faz międzymetalicznych. Stopy AlSi9Cu3 i AlSi12 charakteryzują się specyficznymi właściwościami, wynikającymi z obecności w mikrostrukturze twardych faz, takich jak Al_5FeSi czy Al_2Cu w AlSi9Cu3 , oraz eutektycznej fazy krzemowej w AlSi12 . Optymalizacja procesu rafinacji jest zatem kluczowa, aby osiągnąć odpowiednie połączenie wytrzymałości i plastyczności, jednocześnie minimalizując porowatość i wady mikrostrukturalne. Problemy związane z rafinacją barbotażową dotyczą jednak konieczności znalezienia optymalnych parametrów, takich jak czas rafinacji oraz proporcja złomu obiegowego, aby zminimalizować defekty i poprawić mikrostrukturę. Dłuższy czas rafinacji może prowadzić do większej jednorodności mikrostruktury, ale jednocześnie zwiększa koszty produkcji oraz zużycie gazu obojętnego. Z tego powodu badania nad rafinacją barbotażową są istotne zarówno w kontekście jakości, jak i względów ekonomicznych procesu. Wprowadzenie technologii rafinacji barbotażowej może przynieść znaczące korzyści, takie jak poprawa właściwości mechanicznych i strukturalnych stopów, co ma kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju przemysłu odlewniczego.

1. PRZEGLĄD LITERATURY

1.1. Odlewnicze stopy aluminium

Odlewnicze stopy aluminium charakteryzuje dobra przewodność elektryczna i cieplna, wysoka odporność na korozję oraz dobra plastyczność. Dzieli się je na stopy odlewnicze i te przeznaczone do przeróbki plastycznej, chociaż część z nich spełniała obie funkcje. Łatwość wytwarzania elementów z aluminium i stopów aluminium w niemal dowolnym kształcie jest jedną z głównych zalet i główną przyczyną powszechnego wykorzystania tego metalu w przemyśle. W porównaniu do przerabianych plastycznie, stopy odlewane cechują gorsze własności mechaniczne. Do procesu odlewania stopów stosuje się formy piaskowe oraz kokilowe, często też odlewanie pod ciśnieniem, co znajduje szerokie zastosowanie szczególnie w przemyśle maszynowym, motoryzacyjnym, gospodarstwa domowego, a nawet lotniczym [1]. Stop odlewniczy aluminium charakteryzuje się wielofazową budową mieszanin eutektycznych oraz wydzieleni zawierających fazy międzymetaliczne. Ze względu na wpływ krystalizacji na wielkość ziaren, własności mechaniczne odlewów wytwarzanych w formach kokilowych są lepsze, niż tych które wytwarzane są przy wykorzystaniu form piaskowych, dlatego formy piaskowe stosuje się głównie do produkcji odlewów o dużych gabarytach [2]. Stopy odlewnicze dzieli się na cztery grupy i przypisuje się je do konkretnych grup w zależności od pierwiastka podstawowego tworzącego stop aluminium. Wyróżnia się następujące grupy odlewniczych stopów aluminium: Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn. Do grupy stopów odlewniczych zaliczają się także stopy o dużej zawartości pierwiastków stopowych, takich jak m.in. krzem, miedź, nikiel, magnez, czy mangan, które charakteryzuje dobra lejność i niski skurcz. Stopy odlewnicze z dodatkami innych pierwiastków, np. B, Ni, mają niewielkie znaczenie praktyczne. Odlewane stopy aluminium charakteryzują się dobrą lejnością i niskim skurczem. Wynika to z niskiej temperatury topnienia aluminium (660 °C) [3].

Siluminy są stosowane do produkcji odlewów detali w przemyśle ze względu na wysoki stosunek wytrzymałości do masy, dobre własności mechaniczne i odporność na korozję, wysoką odporność na zużycie i niską rozszerzalność cieplną. Ponadto te stopy aluminium mogą być wielokrotnie przetapiane, a pozostałości z procesu odlewania aluminium i krzemu, znanego również jako złom obiegowy są zazwyczaj utylizowane w procesach rafinacji [4, 5]. Materiał kwalifikuje się jako wadliwy ze względu na widoczne porowatości, zanieczyszczenia niemetaliczne, metaliczne, czy też jamy skurczowe wykryte na etapie kontroli jakości. Odlewnie przetwarzają nagromadzony procesowy złom przez przetapianie

go i rafinację w celu dostarczenia kolejnej partii odlewniczej [6, 7, 8]. W przypadku siluminów głównym zanieczyszczeniem jest żelazo, które najczęściej dostaje się do ciekłego metalu w procesie rozpuszczania powierzchni narzędzi stalowych, elementów pieca, jak i dodatków zanieczyszczonego stopu. Zbyt duża zawartość żelaza może niekorzystnie wpływać na własności odlewów poprzez obniżenie ich ciągliwości, pogorszenie odporności na pękanie, czy też prowadzić do powstawania porowatości skurczowej, która jest jednym z podstawowych problemów w procesie odlewania aluminium [9].

1.1.1. Własności fizyczne i mechaniczne aluminium

Czyste aluminium wykorzystywane jest w przemyśle chemicznym, elektrycznym i elektronicznym, najczęściej po przeróbce plastycznej [11, 12]. Osiągnięcie wymaganych własności użytkowych metalu możliwe jest dzięki dodatkom stopowym, które wpływają na ostateczne własności mechaniczne i plastyczne materiału. Na własności wytrzymałościowe aluminium ma również istotny wpływ odkształcenie plastyczne. Duże powinowactwo aluminium do tlenu prowadzi do jego pasywacji, gdzie w kontakcie z powietrzem tworzy się nieprzewodząca warstwa tlenku glinu Al_2O_3 dobrze przylegającą do powierzchni metalu, co prowadzi do zmniejszenia jego aktywności chemicznej. Spontaniczne tworzenie się warstwy tlenku glinu powoduje, że aluminium jest znacznie bardziej odporne na korozję [13, 14].

Stopy aluminium są cenione ze względu na korzystne własności fizyczne i mechaniczne, które czynią je użytecznymi w różnych zastosowaniach inżynierskich i przemysłowych. Cechuje je stosunkowo niska gęstość, zwykle w zakresie od 2,6 do 2,9 g/cm³, co czyni je lekkimi i idealnymi do zastosowań, gdzie niska masa jest istotna, np. w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym [15]. Stopy aluminium charakteryzują się dobrą przewodnością cieplną, typowo w zakresie 120-180 W/m·K, co sprawia, że są efektywne w odprowadzaniu ciepła. Jest to kluczowe w aplikacjach takich jak wymienniki ciepła i radiatory [16]. Choć przewodność elektryczna stopów aluminium jest mniejsza niż czystego aluminium, nadal wynosi około 35-50 % przewodności czystej miedzi, dzięki czemu są one odpowiednie do zastosowań w produkcji komponentów elektrycznych. Wytrzymałość na rozciąganie stopów aluminium może znacznie się różnić w zależności od składu chemicznego i ewentualnej obróbki cieplnej, wahając się od około 70 MPa dla stopów niskowytrzymałościowych do ponad 600 MPa dla stopów wysoko wytrzymałych. Stopy aluminium cechuje dobra plastyczność, dzięki czemu są łatwo formowane i mogą być kształtowane w pożądane formy, gdzie stopień wydłużenia do zerwania może wynosić od 1% do 50%, w zależności

od rodzaju stopu i parametrów jego obróbki [17]. Twardość stopów aluminium jest bardzo zróżnicowana, ale zazwyczaj wynosi od 20 do 150 HB dla stopów nieutwardzanych i nawet więcej dla stopów poddanych obróbce cieplnej [16]. Stopy te wykazują dobrą odporność na zmęczenie, co jest istotne dla zastosowań, gdzie elementy są narażone na cykliczne obciążenia. Wytrzymałość zmęczeniowa może tam wynosić od 50 do nawet 200 MPa, zależnie od stopu i warunków eksploatacji [18].

1.1.2. Wpływ dodatków stopowych na mikrostrukturę i własności odlewniczych stopów aluminium

Wprowadzanie różnych pierwiastków do stopów aluminium zmienia ich własności mechaniczne, fizyczne i technologiczne, co umożliwia szerokie zastosowanie tych materiałów w różnych branżach przemysłu. Krzem jest pierwiastkiem najczęściej dodawanym do stopów aluminium, czego przykładem jest popularność stopów Al-Si. Z aluminium tworzy eutektykę (aluminium-krzem), co prowadzi do drobnoziarnistej mikrostruktury. Stopy z dodatkiem krzemu mają dobrą lejność, mały skurcz i dobrą odporność na korozję, co czyni je idealnymi do produkcji skomplikowanych odlewów. Mangan tworzy dyspersyjne cząstki, które poprawiają jednorodność mikrostruktury, poprawiają wytrzymałość i odporność na zużycie, nie wpływając przy tym znacząco na odporność na korozję [19]. Siluminy mogą zawierać dodatki takie jak miedź, magnez, tytan, nikiel i mangan, które zwiększają ich wytrzymałość. Dodatek niklu w ilości około 1% zwiększa odporność stopu na korozję i poprawia jego własności mechaniczne, dodatek magnezu w ilości 0,2-1,5% umożliwia obróbkę cieplną, w tym przesycanie i starzenie, a także zwiększa wytrzymałość na rozciąganie i niemal dwukrotnie podnosi granicę plastyczności stopu. Miedź również umożliwia przeprowadzenie obróbki cieplnej, ale obniża odporność na korozję. Dodatek w postaci żelaza pochodzącego z tygli żeliwnych i materiałów wsadowych jest niekorzystny, gdyż żelazo tworzy w mikrostrukturze długie, cienkie iglaste wydzielania, co pogarsza własności mechaniczne stopu, zwiększa jego kruchość i obniża odporność na korozję. Działanie żelaza może być częściowo złagodzone dodatkiem około 0,5% manganu. Stopy Al-Si-Cu łączą zalety siluminów i stopów Al-Cu, a dodatek miedzi poniżej 4% zwiększa wytrzymałość w wysokiej temperaturze, poprawia skrawalność i twardość, choć obniża odporność na korozję w porównaniu do innych stopów Al-Si, ale poprawia ją w stosunku do stopów Al-Cu. Stopy Al-Si-Mg są stosowane do wytwarzania wyrobów wymagających wysokich własności wytrzymałościowych zachowując przy tym dobrą plastyczność, a także charakteryzują się wysoką odpornością

korozyjną i dobrymi własnościami odlewniczymi, w tym lejącością, co sprawia że można je stosować do otrzymywania odlewów o skomplikowanych kształtach [5, 6]. Abdulsahib oraz Akinribide i wsp. [20, 21] w swoich pracach dowiedli, że dodatek miedzi do stopu Al-Si sprzyja powstawaniu fazy θ (Al_2Cu) oraz przyczynia się do modyfikacji eutektyki krzemowej. Obecność wydzieleni fazy Al_2Cu przyczynia się do umocnienia stopu, co jest wynikiem utwardzania wydzieleniowego i powoduje zwiększenie twardości i wytrzymałości na rozciąganie stopu. Z drugiej strony, zwiększona zawartość miedzi może również prowadzić do obniżenia plastyczności materiału, co oznacza, że stopy te stają się bardziej kruche. Wysoka zawartość miedzi zwiększa również ryzyko wystąpienia korozji międzykrystalicznej. Anyalebechi w swojej pracy [22] omówił wpływ różnych czynników na formowanie porowatości w stopach aluminium. Chociaż praca ta koncentruje się głównie na innych aspektach, aniżeli wpływ miedzi, to wskazuje, że dodatki stopowe, takie jak miedź, mogą zwiększać tendencję do porowatości w wyniku zmian w mikrostrukturze i kinetyce krzepnięcia. Miedź, jak wspomniano powyżej prowadzi do powstawania twardych faz międzymetalicznych (takich jak Al_2Cu), co zwiększa twardość i wytrzymałość stopów na rozciąganie, choć może jednocześnie obniżać plastyczność i zwiększać ryzyko korozji. Wpływ na porowatość zależy od wielu czynników, w tym zawartości wodoru i szybkości krzepnięcia, które mogą być modyfikowane przez obecność miedzi. Dodatek magnezu tworzy związki Mg_2Si , które w stopach Al-Mg zwiększają wytrzymałość przez utwardzenie wydzieleniowe, jak i poprawiają odporność na korozję oraz spawalność, ale mogą zwiększać skłonność do powstawania pęknięć przy obróbce plastycznej na gorąco [23]. Obecność cynku wraz z magnezem w stopach prowadzi do powstania fazy MgZn_2 , co znacznie zwiększa wytrzymałość tych stopów. Stopy Al-Zn-Mg mają wysoką wytrzymałość mechaniczną, ale stają się podatne na korozję naprężeniową. Dodatek miedzi w tych stopach prowadzi do tworzenia twardych faz międzymetalicznych, co zwiększa wytrzymałość i twardość stopu. Stopy Al-Cu-Si-Mg charakteryzują się wysoką odpornością na ścieranie i stabilnością wymiarową. Dodatek niklu poprawia ich lejącość, co sprawia, że są używane do odlewania tłoków. Jednak te stopy mają tendencję do tworzenia porowatości w odlewach grubościennych i są podatne na pękanie z powodu zwiększonego skurczu. Pierwiastek ten zwiększa wytrzymałość mechaniczną i odporność na pełzanie, ale może przyczynić się do obniżenia odporności stopu na korozję [16]. Tytan sprzyja powstawaniu drobnoziarnistej mikrostruktury i wpływa na wzrost odporności stopów na pękanie oraz korozję [6]. Tytan oraz bor są stosowane jako dodatki sprzyjające rozdrobnieniu ziarna, co poprawia własności mechaniczne stopów [2, 3, 23].

1.1.3. Zanieczyszczenia i porowatości w odlewniczych stopach aluminium

Zanieczyszczenia w kąpeli metalowej mogą prowadzić do powstawania szkodliwych wtrąceń w mikrostrukturze stopu. Mogą nimi być wtrącenia, które zostały niecelowo wprowadzone do stopu. Termin wtrąceń obejmuje tlenki, żużle i cząstki pochodzące z wykładziny pieca. Według Swaminathane'a i wsp. [24] tlen obecny w aluminium może reagować z metalem, tworząc tlenki, które mogą być miejscem inicjacji pęknięć i innych wad strukturalnych. Te zanieczyszczenia mogą pogarszać własności mechaniczne odlewów poprzez tworzenie nieciągłości w strukturze materiału. Wtrącenia te cechuje różny rozmiar i kształt, wpływają one także niekorzystnie na dalszy proces obróbki ubytkowej, jak i przeróbkę plastyczną. W zależności od ich wielkości i ilości, wpływają one negatywnie na własności odlewu, takie jak własności zmęczeniowe, wykończenie powierzchni, czy szczelność. W pracy [25] opisano wpływ tlenków na rozwój porowatości i własności mechaniczne odlewów wykonanych ze stopu aluminium A356. Stwierdzono, że tlenki mogą wpływać na proces krystalizacji prowadząc do zwiększenia porowatości. Typowe metody usuwania wtrąceń można sklasyfikować jako: sedymentacyjne, filtracyjne, flotacyjne [26, 27].

- Sedymentacja odnosi się do cząstek znajdujących się na górze pieca, które następnie osadzają się na jego dnie, a które można usunąć dopiero po jego opróżnieniu. Przykładowo cząstki, takie jak tlenki i borki, cechuje wyższa gęstość niż kąpiel metaliczna, co sprzyja sedymentacji. Podobnie lekkie cząstki wypływają na powierzchnię kąpeli metalowej, skąd usuwa się je wraz z warstwą żużla. Szybkość osiadania zależy od liczby, kształtu i gęstości cząstek. Oznacza to, że zazwyczaj w ciągu 20 minut znaczna ich część powinna osiąść już na dnie pieca. [27, 28].
- Jeśli kąpiel metaliczna poddawana jest procesowi rafinacji gazem obojętnym w celu usunięcia sodu i wodoru, cząstki wtrąceń usuwane są z kąpeli poprzez flotację pęcherzyków gazu. Cząstki przylegają do pęcherzyków i są usuwane po wypłynięciu na powierzchnię kąpeli, tworząc żużel [26, 29].
- Proces filtracji polega na zatrzymywaniu cząstek w objętości filtra znajdującego się w obszarze układu wlewowego podczas wypełniania form odlewniczych. Wydajność filtrów wzrasta wraz z niższymi natężeniami przepływu ciekłego metalu. Dzięki zastosowaniu dwóch filtrów w konfiguracji podwójnej o tej samej wydajności, zwiększenie grubości filtra zwiększa skuteczność filtracji dla danej wielkości cząstek. Jeżeli konieczne jest odfiltrowanie mniejszych cząstek,

stosowane są dodatkowe filtry gradientowe przed większym filtrem gradientowym, aby zapobiec zatykaniu filtra i zakłóceniom przepływu metalu [26].

Anyalebechi w swojej pracy [30] analizował, jak obecność wodoru, szybkość krystalizacji i dodatek wapnia wpływają na tworzenie się porowatości w stopie aluminium A356. Wodór rozpuszczony w ciekłym aluminium może tworzyć pory podczas krystalizacji, co prowadzi do powstawania porowatości. Szybka krystalizacja może ograniczyć czas na dyfuzję wodoru, zmniejszając ilość tworzących się porów, natomiast dodatki wapnia mogą modyfikować mikrostrukturę wpływając na wielkość i rozmieszczenie porowatości. W zależności od temperatury przegrzania kąpiel metalowa bardzo szybko osiąga nasycenie wodorem, którego zawartość może osiągnąć w przybliżeniu nawet 0,4–0,6 ml na 100 g stopu, gdzie samo stopienie wsadu aluminiowego powoduje rozpuszczenie 0,2 ml wodoru w 100 g kąpeli [31]. Kwestie związane z wodorem stają się istotne w przypadku stopów, gdzie surowiec pochodzi głównie z aluminium przeznaczonego do powtórnego przetworzenia, ponieważ podczas przetapiania, z atmosfery pieca do zanieczyszczonego już wodorem materiału absorbowana jest jeszcze większa jego ilość. Badania prowadzone w tym zakresie dowodzą, że porowatość występuje w ograniczonym stopniu, jeśli zawartość rozpuszczonego wodoru jest mniejsza niż 0,15 ml/100 g. W celu ograniczenia porowatości stosuje się zabiegi uszlachetniania kąpeli metalowej. Właściwie przeprowadzone oczyszczenie stopu może zmniejszyć zawartość wodoru nawet do 0,06–0,12 ml/100 g [31, 32]. W celu zebrania rozpuszczonego wodoru, do metalu wprowadza się argon lub azot, ten następnie dyfunduje z kąpeli metalowej w pęcherzyki i unosi się na powierzchnię kąpeli [33]. Oczyszczony gaz wymaga wysokiego poziomu czystości, zwłaszcza pod względem zawartości tlenu, a jako że argon jest gazem drogim i trudno dostępnym, czasami w jego zastępstwie stosowany jest azot, który w środowisku kąpeli metalicznej może tworzyć azotek aluminium mający tendencję do tworzenia niepożądanego efektu w postaci większej ilości żużla, a więc i zgarów, odmiennie niż argon. Poza efektem zmniejszenia stężenia wodoru, na wskutek uszlachetniania metalu zmniejsza się także liczbę wtrąceń poprzez wznoszenie ich do żużla w objętości pęcherzyków [26]. Istnieją różne sposoby wprowadzania gazu płuczącego do kąpeli metalicznej, które dają różny efekt i poddawane są stałym udoskonaleniom [34]:

- Lanca wykonana z rury stalowej o średnicy 50 mm, bądź grafitowej z małymi otworami, mniejszymi niż 10 mm
- Dyfuzory
- Rafinacja barbotażowa dyszą obrotową.

Można także zastosować inne metody, aby zapobiec lub ograniczyć absorpcję wodoru z atmosfery przez roztopione aluminium. Alternatywnie zamiast oczyszczania można zastosować ultradźwięki, tabletki odgazowujące albo mieszanie ścinające [33, 35]. Innym problemem związanym z nieciągłościami strukturalnymi w odlewach jest występowanie porowatości skurczowej, która nie jest związana z ilością rozpuszczonego w stopie wodoru. Porowatość skurczowa zależy od kształtu i odległości międzydendrytycznych, również prowadzi ona do osłabienia materiału. W węzłach cieplnych występują porowatości skurczowe, ale projektując i udoskonalając technologię kształtu formy, czy też stosując techniki umożliwiające kierunkową krystalizację, można zniwelować poziom tych porowatości. Jeśli jednak ich zastosowanie nie jest możliwe do osiągnięcia, rozdrobnienie ziarna $\alpha(\text{Al})$ poprzez modyfikację również może zredukować negatywne skutki porowatości skurczowej [33]. Do niedoskonałości w strukturze odlewów wchodzi również wady powierzchniowe, do których zalicza się także pęcherze zewnętrzne i porowatości wewnętrzne powstałe w wyniku dużej zawartości gazu albo niskiej przepuszczalności. Jeśli przepuszczalność formy jest zbyt niska lub jeśli przepływ metalu przez kanał zasilający jest turbulentny, to pęcherzyki powietrza mogą zostać uwięzione w objętości formy, co prowadzi do osłabienia materiału. Aby uniknąć tych komplikacji, zaleca się zapewnienie odpowiednich kanałów odpowietrzających formę i taki dobór przekroju kanału doprowadzającego metal, aby uzyskać stabilny uwarstwiony przepływ. Gökelma [36] badał zachowanie cząstek węgla aluminium Al_4C_3 podczas flotacji i sedymentacji w ciekłych stopach aluminium. Zanieczyszczenia w postaci cząstek Al_4C_3 mogą prowadzić do zwiększenia porowatości i osłabienia własności mechanicznych odlewu. Do powstania nieszczelności odlewów prowadzą nieciągłości w budowie odlewu, zmniejszają one wytrzymałość materiału, zarówno zmęczeniową, jak i na rozciąganie. Na pękanie termiczne są w szczególności podatne stopy Al-Cu [31]. Wodór należy zatem usuwać już z kąpeli metalowej, ponieważ powoduje on powstawanie pęcherzyków w odlewach, chociaż poziom dopuszczalnej zawartości wodoru zależy od przeznaczenia odlewów, preferencji klienta, jak i szybkości chłodzenia podczas procesu krystalizacji, na co wpływ ma rozmiar odlewu, który bezpośrednio przekłada się na rozmiar możliwych porowatości [37]. Oreko i wsp. [38] analizowali własności mechaniczne stopów aluminium pochodzących z ponownego przetopu. Zastosowanie takich stopów może wprowadzać różnorodne zanieczyszczenia, takie jak żelazo, miedź, które mogą niekorzystnie wpływać na jakość stopu. Zhang i wsp. w swojej pracy [39] przedstawili przegląd metod usuwania żelaza z aluminium. Żelazo, będące jednym z najczęstszych

zanieczyszczeń w stopach aluminium, może tworzyć kruchą fazę Al-Fe, co pogarsza własności mechaniczne. Różne techniki, takie jak filtracja czy rafinacja chemiczna, są stosowane w celu redukcji jego zawartości.

1.1.4. Modyfikacja odlewniczych stopów aluminium

Istotnym zanieczyszczeniem, które zawierają stopy aluminium są metale alkaliczne takie jak sód, do którego usunięcia z ciekłego aluminium stosowana jest mieszanina gazów chloru w azocie o zawartości do 3,0%. Chlor reaguje z zawartymi w kąpeli aluminium i magnezem, tworzy ich chlorki, które następnie wchodzi w reakcję z sodem [32]. Aluminium można również modyfikować za pomocą borku aluminium w celu usunięcia wanadu, chromu i tytanu, które wydzielają się na powierzchnię kąpeli i stamtąd są usuwane. Podobną metodę można zastosować celem redukcji zawartości cyrkonu i cynku [26, 40].

Podczas recyklingu stopów aluminium, może zaistnieć potrzeba zmniejszenia zawartości magnezu. Szczególnie istotne jest to w przypadku stopów Al-Si, gdzie dopuszczalne stężenie magnezu jest niższe niż w przypadku przetopienia złomu. Zawartość magnezu można zmniejszyć stosując chlor, który tworzy z magnezem chlorek magnezu ($MgCl_2$) [32]. Innym sposobem zmniejszenia zawartości magnezu w kąpielach metalicznych jest stosowanie argonu. Do redukcji Mg można także zastosować reakcje soli Na_2SiF_6 lub AlF_3 z krzemionką, ale te nie są tak wydajne jak stosowanie chloru [26]. Powyższe metody usuwania metali alkalicznych są drogie, czasami wymagające wyspecjalizowanego sprzętu i mogą być szkodliwe dla środowiska, jak i zdrowia osób mających z nimi kontakt. Dlatego wg. Kucharčík i wsp. [41] najbardziej niezawodnym sposobem zapewnienia, żeby skład chemiczny stopu nie przekroczył dopuszczalnego zanieczyszczenia metalami, jest optymalny dobór partii, osiągany poprzez kontrolowanie składu chemicznego podczas samego procesu przetapiania, czyli odpowiedni balans pomiędzy złomem obiegowym z odlewni, a czystym wsadem. Wynika to z faktu, że im wyższe jest początkowe stężenie wtrąceń, tym wyższe jest stężenie końcowe, a nie jest możliwe całkowite usunięcie wszystkich zanieczyszczeń w warunkach przemysłowych [37]. Powszechnie stosowaną metodą poprawy własności wytrzymałościowych odlewanych stopów aluminium jest ich modyfikacja. Modyfikacja to proces, w którym zmienia się struktura stopu odlewniczego poprzez działanie niewielkich, bo zawierających się w 0,1% masy stopu dodatków specjalnie wprowadzanych do ciekłego metalu. Proces modyfikacji stopów rozumiany powinien być jako zabieg metalurgiczny, w którym do kąpeli metalowej wprowadzane są substancje mające na celu w odpowiednim czasie zmienić strukturę stopu i wpłynąć na

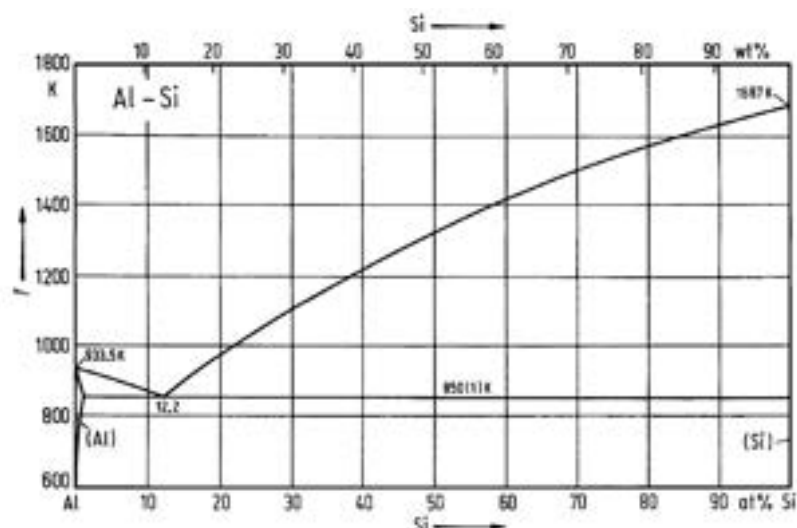
zarodkowanie i wzrost ziaren. W przypadku odlewania stopów mających odznaczać się wysoką jakością, w zasadzie wszystkie są modyfikowane. Proces modyfikacji zmienia napiecie powierzchniowe granic ziaren, sprzyjając wzrostowi szybkości zarodkowania zwiększając trwałość zarodków krystalizacji. Zmniejszenie szybkości wzrostu ziarn prowadzi do powiększenia ośrodków krystalizacji, prowadząc do rozdrobnienia mikrostruktury. Wyróżnić można modyfikatory mikrostruktury pierwotnej i eutektyki. Modyfikacja mikrostruktury pierwotnej dotyczy przede wszystkim kontroli rozmiaru ziaren w większym stopniu niż ich morfologii, natomiast modyfikacja eutektyki zorientowana jest na wzrost i zmiany morfologii fazy eutektycznej. Modyfikator jest zazwyczaj dodawany w bardzo małych ilościach do kąpieli metalowej, tak, aby nie przyczynił się do zmiany składu chemicznego odlewanej stopu [42]. Modyfikatory wprowadzane są jako ciała stałe, o odpowiedniej granulacji w celu wytworzenia dodatkowych zarodków krystalizacji. W przypadku stopów jednofazowych, użycie modyfikatorów w znaczący sposób zwiększa liczbę ziaren pierwotnych. W wyniku przemiany eutektycznej podczas krystalizacji stopów wielofazowych, następująca w nich zmiana jest bardziej złożona, niż w wypadku stopów jednofazowych i przejawia się zwiększeniem liczby ziaren pierwotnych, co z kolei przyczynia się do redukcji mikroporowatości i ujednorodnieniu mikrostruktury, oraz zmian samego rodzaju eutektyki, chociaż wszystkie te zjawiska nie zawsze występują jednocześnie. Bardziej jednorodna mikrostruktura stopu wpływa pozytywnie na wyższą odporność na pękanie, wyższą dokładność detali odlewu, jak i jego lepsze własności mechaniczne [43, 44].

Jahromi i wsp. [45] analizowali wpływ dodatku modyfikatorów takich, jak Sr i Sb na własności mechaniczne stopu A356. Wykazali oni, że dodanie tych pierwiastków poprawia własności wytrzymałościowe i zmęczeniowe stopu dzięki modyfikacji wydzielen krzemowych w stopie. Stopy eutektyczne aluminium, można modyfikować wprowadzając do ciekłej kąpieli metaliczny sól w ilości od 0,1 do 0,2% masy stopu lub wprowadzając do ciekłego stopu fluorek sodu w ilości od 0,6 do 2,0% masy stopu, skutkiem czego jest przesunięcie punktu eutektycznego w prawo w kierunku wyższej zawartości krzemu z 12,6 do około 13,5% i przesunięciu temperatury eutektycznej z 577 °C do około 564 °C [46]. Pierwiastki stopowe takie jak: Mg, Cu i Mn dodawane są do stopów Al-Si w celu poprawy własności mechanicznych odlewów siluminowych, natomiast wieloskładnikowe siluminy są zwykle poddawane obróbce cieplnej w celu dalszej poprawy ich własności mechanicznych. W wyniku działania modyfikatora, stop o składzie eutektycznym zyskuje strukturę typową dla stopu podeutektycznego. W przypadku odlewów o dużych gabarytach nie ma

możliwości wyeliminowania wad spowodowanych rozpuszczalnością gazów w ciekłym metalu lub tworzeniem się warstw tlenków podczas krzepnięcia stopu [47, 48]. W przypadku eutektycznych i podeutektycznych stopów Al-Si, najczęściej stosowanymi w przemyśle modyfikatorami krzemu eutektycznego są sód i stront, często stosowane w przemyśle modyfikatory krzemu hamujące tempo rozrostu ziaren eutektycznych i prowadzące do zmiany typu eutektyki krzemu ze struktury płytkowej na włóknistą [49]. Nadeutektyczne stopy Al-Si modyfikowane są przy wykorzystaniu fosforu, który tworzy cząstki fosforu aluminium mające własności rozdrabniające dla ziaren krzemu, po ich wprowadzeniu do kąpieli [50]. Modyfikację struktury pierwotnej w stopach aluminium, w celu zwiększenia gęstości ziaren, czyli zwiększenia zdolności metalu do zarodkowania, przeprowadza się też poprzez użycie pierwiastków takich jak wapń, tytan, antymon, fosfor, potas i lit.

1.1.5. Charakterystyka stopu AlSi12

Stopy aluminium-krzem, zwane siluminami, są popularnymi materiałami odlewniczymi ze względu na niski ciężar właściwy, dobrą lejącość, niską temperaturę topnienia oraz wysoką wytrzymałość w stosunku do masy (wyższą niż stal). Wykorzystuje się je w motoryzacji, przemyśle maszynowym, gospodarstwie domowym oraz w lotnictwie [2, 51]. Produkcja odlewów z tych stopów stanowi 85-90% całkowitej produkcji odlewów w przemyśle samochodowym. Siluminy mają miękką osnowę α (Al) i twarde wydzielenia krzemu, którego zawartość w stopach Al-Si wynosi od 5 do 23%. Dodatkowo, mogą zawierać magnez (0,2-1,5%), miedź (0,5-5%), nikiel (0,5-3%) i mangan (0,2-0,5%). Pierwiastki te wpływają na własności mechaniczne poprzez zmianę mikrostruktury i przebiegu procesu krystalizacji stopów [52-54]. Kluczowym czynnikiem dla stosowania siluminów jest morfologia krzemu, który w eutektyce $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ może tworzyć obszary koncentracji naprężeń i inicjacji mikropeknięć [55, 56]. Układ równowagi fazowej Al-Si przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1 Układ równowagi fazowej Al-Si [53]

Stop AlSi12 jest stopem eutektycznym, który dzięki wysokiej zawartości krzemu, łatwo wypełnia formy odlewnicze, co jest istotne w produkcji skomplikowanych kształtów. Stop ten posiada niską temperaturę topnienia, wynoszącą około 577 °C, odznacza się ponadto wysokim stosunkiem wytrzymałości do masy co sprawia, że jest on atrakcyjny dla przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego, gdzie redukcja masy jest kluczowa [57]. Stop AlSi12 charakteryzuje się dobrą wytrzymałością na rozciąganie i twardością. Typowe wartości wytrzymałości na rozciąganie dla tego stopu wynoszą około 150-200 MPa, a twardość wynosi około 75 HB. Kolejną zaletą dodatku krzemu w stopie jest zwiększenie jego odporności na działanie czynników zewnętrznych oraz niski skurcz redukujący ryzyko pęknięć i innych defektów podczas krzepnięcia [16, 58]. Stop AlSi12 posiada dobrą przewodność cieplną, co czyni go odpowiednim do zastosowań, gdzie wymagana jest efektywna wymiana ciepła.

Wyniki przedstawione w pracy [59] dowodzą ponadto, że stop AlSi12 wykazuje dobrą odporność na korozję, dzięki czemu może być stosowany w trudnych warunkach środowiskowych. Do podstawowych wad stopu AlSi12 należą trudności w procesach obróbki mechanicznej na co wpływ ma zawartość krzemu, co może wymagać specjalnych narzędzi i technik w porównaniu do innych stopów aluminium [60]. Kolejną wadą jest tendencja do gruboziarnistości, która może wpływać negatywnie na wytrzymałość i trwałość odlewów, wymagając starannego kontrolowania procesu modyfikacji i krzepnięcia [14, 61]. Jednakże badania Deev i wsp. [62] pokazują, że przesycanie ciekłego metalu wpływa korzystnie na mikrostrukturę i własności mechaniczne stopu AlSi12, co może prowadzić do zmniejszenia porowatości i poprawy wytrzymałości mechanicznej dzięki bardziej

jednorodnej mikrostrukturze. Według Hajkowskiego i wsp. [63] zintensyfikowana rafinacja mikrostruktury i zmniejszenie porowatości prowadzą do poprawy wytrzymałości i twardości stopu. Korzystny wpływ na poprawę własności mechanicznych może mieć np. rafinacja barbotażowa. Kotadia [64] wykazał, że intensywne mieszanie poprawia jednorodność mikrostruktury i własności mechaniczne odlewu. Z kolei Dong w swojej pracy [65] przedstawił wyniki dowodzące, że odlewanie pod wysokim ciśnieniem pozwala uzyskać stop AlSi12 o wysokiej wytrzymałości i plastyczności. Technologia ta minimalizuje ponadto wady odlewnicze, takie jak porowatość, co sprzyja poprawie własności mechanicznych niwelując część wad tego stopu [66, 67].

1.1.6. Charakterystyka stopu AlSi9Cu3

Stop AlSi9Cu3 jest jednym z najczęściej stosowanych stopów aluminium, cenionym za swoje własności odlewnicze oraz mechaniczne. Zawiera około 9% krzemu (Si) i 3% miedzi, resztę stanowi aluminium. Dodatkowo w stopie mogą być obecne niewielkie ilości innych pierwiastków, takich jak magnez, żelazo, mangan, cynk i nikiel [68]. Stop ten charakteryzuje się dobrą płynnością, co ułatwia proces odlewania, a także dobrą odpornością na pękanie gorące, dzięki czemu jest często używany do produkcji skomplikowanych odlewów [16]. Stop ten często poddawany jest obróbce cieplnej w celu poprawy własności mechanicznych, takich jak wytrzymałość i twardość. Hurtalová w swojej pracy [51] wskazuje na konieczność stosowania w odniesieniu do stopów z dodatkiem Cu odpowiedniej obróbki cieplnej, która sprzyja uzyskaniu jednorodnej mikrostruktury i optymalnych własności mechanicznych. Typowe procedury obejmują starzenie w temperaturze około 150-200 °C przez kilka godzin, bądź wyżarzanie, aby zoptymalizować własności mechaniczne. Wyżarzanie może poprawić plastyczność i zmniejszyć naprężenia wewnętrzne, podczas gdy starzenie zwiększa wytrzymałość i twardość stopu [69]. Ji, Xiong i Zhou w swojej pracy [70] przedstawili wyniki badań mikrostruktury i własności mechanicznych stopu AlSiCuFeMnYb. Wykazali, że dodatki stopowe, takie jak miedź, wpływają na wydzielanie się faz międzymetalicznych, co jest również obserwowane w stopie AlSi9Cu3. Do zalet stopu należy zaliczyć dobrą płynność, łatwość odlewania, dobrą wytrzymałość mechaniczną, oraz odporność na korozję. Wyniki przedstawione w pracy [71] wskazują z kolei na wysoką wytrzymałość stopu w wysokiej temperaturze, co czyni go odpowiednim do zastosowań w trudnych warunkach pracy. Największą wadą tego stopu jest możliwość powstawania porowatości w odlewach, co stanowi częsty problem stopów aluminium [72]. Dodatek miedzi według badań Gonçalvesa i Silvy oraz Kozany [73, 74] wpływa korzystnie na poprawę własności

mechanicznych, jednocześnie pogarszając własności plastyczne stopu. Stop AlSi9Cu3 , jak wszystkie siluminy charakteryzuje się stosunkowo niską gęstością, dobrą lejnością oraz małym skurczem po odlaniu. Niski skurcz podczas krzepnięcia zmniejsza ryzyko wad odlewniczych, takich jak porowatość czy pęknięcia. Mikrostruktura tego stopu po procesie odlewania jest typową dla siluminów podeutektycznych. Charakterystycznymi elementami mikrostruktury są eutektyki Al-Si w kształcie ostro zakończonych igieł oraz pierwotne kryształy krzemu krystalizujące z cieczy [75].

1.1.7. Zastosowanie odlewniczych stopów aluminium

Dzięki małej gęstości i wysokiej odporności na korozję stopy aluminium są powszechnie wykorzystywane w różnych dziedzinach, jak np. w lotnictwie, motoryzacji, jak i produkcji opakowań [76]. Główną zaletą stosowania aluminium, oprócz niższych kosztów produkcji, jest możliwość zmniejszenia masy produktu przy jednoczesnym zachowaniu jego własności wytrzymałościowych. W pojazdach redukcja masy związana jest bezpośrednio z oszczędnością paliwa podczas eksploatacji, jednocześnie zwiększając bezpieczeństwo i komfort pasażerów. Ponieważ do budowy tramwajów wykorzystuje się aluminium, zużycie energii przez te pojazdy uległo niemal dwukrotnemu obniżeniu [77].

Stopy aluminium stosowane są między innymi na nośne elementy konstrukcyjne, armaturę, windy, urządzenia klimatyzacyjne, elementy dekoracyjne. Aluminium stosuje się szeroko w przemyśle spożywczym, gdzie każdego roku produkuje się ponad 170 miliardów puszek aluminiowych, a także farmaceutycznym, kosmetycznym i opakowań chemicznych. Jest to metal całkowicie nieprzepuszczalny, bezwonny i nie wpływa na smak produktów znajdujących się w opakowaniu, co czyni go bezpiecznym do stosowania w przemyśle spożywczym. Kolejnym obszarem zastosowań aluminium jest wytwarzanie energii. Aluminium jest dobrym przewodnikiem ciepła i elektryczności, metal ten jest prawie dwukrotnie bardziej przewodzący w stosunku do swojej masy niż miedź. Istotną cechą aluminium, dzięki której jest ono tak szeroko stosowane, a zużycie stale rośnie, jest łatwość kształtowania jego mikrostruktury i obrabialność [78].

Siluminy ze względu na swoją żarowytrzymałość są stosowane na wysoko obciążone tłoki silników spalinowych. Ze stopów podeutektycznych wytwarza się silnie obciążone elementy dla przemysłu okrętowego i elektrycznego, pracujące w podwyższonej temperaturze i w wodzie morskiej. Wieloskładnikowe stopy Al-Si są stosowane m.in. na głowice silników spalinowych oraz inne odlewy w przemyśle maszynowym [47]. Kevorkijan w opracowaniu dotyczącym recyklingu stopów aluminium w Europie [79] podaje, że odlewnicze stopy

aluminium, ze względu na swój skład chemiczny nadają się idealnie do recyklingu, ponieważ mogą być wielokrotnie przetapiane bez pogorszenia jakości. Istotne jest zadbanie o odpowiednie metody rafinacji i oczyszczania. Jak pisze Leroy [80], dzięki własnościom oraz zaawansowanym technikom przetwarzania i recyklingu stopów aluminium, możliwe jest tworzenie trwałych, lekkich i ekologicznych produktów. Procesy takie, jak rafinacja barbotażowa pozwalają na uzyskanie stopów o wyższej czystości, co jest szczególnie istotne w aplikacjach wymagających wysokiej jakości materiałów, takich jak przemysł lotniczy czy elektronika [81]. Dzięki swoim własnościom, stop AlSi12 znajduje zastosowanie w produkcji elementów silników, obudów przekładni i innych części wymagających dobrej wytrzymałości i lekkości [82], elementów strukturalnych samolotów, gdzie istotna jest redukcja masy przy zachowaniu wytrzymałości oraz do odlewania części urządzeń domowych i na elementy konstrukcyjne [83, 72]. Stop AlSi9Cu3 wykazuje dobrą odporność na korozję w różnych środowiskach, w tym atmosferycznych oraz wodnych, co czyni go atrakcyjnym materiałem do zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym i budowlanym [84]. Dzięki swoim własnościom, stop AlSi9Cu3 jest szeroko stosowany w przemyśle motoryzacyjnym do produkcji komponentów silników, skrzyń biegów oraz elementów zawieszenia. Znajduje również zastosowanie w przemyśle lotniczym oraz w produkcji sprzętu AGD [85].

1.2. Metody odlewania stopów aluminium

Proces odlewania stopów aluminium jest łatwiejszy w porównaniu do odlewania stopów opartych o większość innych pierwiastków, ze względu na możliwość uzyskania wysokiej dokładności odwzorowania wnęki formy, stosunkowo niskiej temperaturze topienia, niskiej gęstości zapewniającej jednak dobre własności wytrzymałościowe stopu przy jednocześnie możliwości łatwego transportu. Mała gęstość stopu aluminium skutkuje również niższym ciśnieniem wewnątrz formy, co ogranicza możliwość uszkodzenia wnęki formy [86]. Dobór materiału formierskiego i sposobu jego łączenia zależy od używanego stopu, dostępności sprzętu odlewniczego, geometrii produkowanych elementów, najważniejszych wymagań co do jakości odlewu. Aluminium przechodzi również szybki proces stygnięcia w formie, który jest bardzo istotny w przypadku produkcji wielkoseryjnej, oraz relatywnie niskiej porowatości w stanie lanym w porównaniu do stopów żelaza, a co za tym idzie doskonałą lejnością i niskim skurczem odlewniczym. Dzięki tym zaletom, odlewanie stopów aluminium można przeprowadzić niemal wszystkimi znanymi procesami odlewania. W procesie odlewania stopów aluminium, aby uzyskać wysokiej jakości wyrób,

konieczne jest opanowanie procesu topienia, wytwarzania form odlewniczych, jak i dobór odpowiedniej metody odlewania. Temperatura odlewania musi być co najmniej o 50 °C wyższa od temperatury topnienia stopu odlewniczego, chociaż wartość ta może być nieco wyższa, aby zapewnić dobre odwzorowanie wnęki formy oraz zapobiec sytuacji, gdzie stop wlewany byłby do formy w stanie półstałym [86]. Temperatura procesu topienia stopu aluminium wynosi od 650 do 760 °C. Aby uniknąć nagłego spadku temperatury podczas transportu metalu do stanowiska odlewniczego, stosowane są chochle lub tygle o dużej objętości. Podczas odlewania w formach piaskowych niższa temperatura redukuje procesy gazotwórcze mogące zachodzić w formie i eliminuje inne problemy związane z masą formierską, co może przyczynić się do wydłużenia żywotności masy formierskiej w cyklu odlewniczym [2, 87]. Utrata objętości podczas krystalizacji i chłodzenia odlewów aluminiowych wynosi około 6,5–8,5%. Własności te pozwalają na wykorzystanie procesu odlewania do wytwarzania elementów o różnym stopniu złożoności, często nie wymagającej stosowania późniejszej obróbki mechanicznej [2].

Techniki odlewnicze można podzielić na następujące kategorie:

- Grawitacyjne metody odlewania, czyli odlewanie piaskowe, skorupowe, odlewanie do form gipsowych.
- Odlewanie precyzyjne zawierające metodę wytapianych modeli, jak i odlewanie ciśnieniowe, do którego zalicza się metoda prasowania w stanie ciekłym, pod niskim ciśnieniem oraz proces pełnej formy.
- Odlewanie innowacyjne (odlewanie elektrożuźlowe, odlewanie tiksotropowe, formowanie na gorąco).
- Specjalne procesy odlewania, jak odlewanie odśrodkowe oraz odlewanie w warunkach obniżonego ciśnienia atmosferycznego, prasowanie w stanie ciekłym oraz odlewanie ciągłe i półciągłe [82].

W celu odlewania stopów aluminium w przemyśle, najczęściej stosowanymi metodami są odlewanie grawitacyjne w formach piaskowych, odlewanie ciśnieniowe, ciągłe, odlewanie pod niskim ciśnieniem, jak i odlewanie metodą wosku traconego lub odlewanie tiksotropowe. Wybór procesu zależy od wielkości i kształtu odlewu, docelowej jakości powierzchni, jak i dokładności wymiarowej [2, 23, 25].

Dobór odpowiednich technik formowania minimalizuje koszty produkcji poprzez osiągnięcie wymaganej jakości wykończenia powierzchni i tolerancji wymiarowych odlewu, co redukuje ilość odpadów i zwiększa uzysk metalu [31, 86]. Kolejnym czynnikiem

wpływającym na wybór właściwego procesu odlewania jest wielkość produkcji, która w istotny sposób wpływa na koszt oprzyrządowania i koszt regeneracji piasku w produkcji wielkoseryjnej [23]. Odlewanie w formach ma tę zaletę, że pozwala szybko uzyskać ostateczny kształt elementu o określonych wymiarach. W celu uzyskania ostatecznego kształtu, wlewek poddany może zostać po zastygnięciu obróbce plastycznej. Proces ten wpływa korzystnie na poprawę niektórych własności, jak wytrzymałość i twardość [2].

1.2.1. Podstawy teoretyczne procesu krzepnięcia

Proces odlewania opiera się na wlaniu uprzednio stopionego metalu do formy odlewniczej, gdzie metal ulega krzepnięciu, tj. podczas obniżania temperatury ciekłego metalu zaczyna zachodzić proces powstawania fazy stałej. Krzepnięcie metali jest przemianą dyfuzyjną zachodzącą z wydzielaniem ciepła przemiany. Krzepnięcie może zachodzić poprzez proces krystalizacji, amorfizacji z fazy ciekłej, bądź też zestalenia z fazy ciekłej i gazowej, jednak przy produkcji masowej najpowszechniejszą metodą krzepnięcia metali jest proces krystalizacji z fazy ciekłej. Temperatura krzepnięcia metali zawiera się pomiędzy likwidusem, czyli początkiem zarodkowania, a solidusem, czyli temperaturą zaniku fazy ciekłej, których wartości różnią się w zależności od rodzaju stopu. Krzepnięcie jest ostatnim etapem produkcji wlewków oraz odlewów i o tyle istotnym dla zapewnienia dobrej jakości wyrobów końcowych, że w zależności od na przykład szybkości chłodzenia, dochodzić może do powstawania zjawisk szkodliwych dla wyrobów jak np. nadmierny rozrost ziarna, duża segregacja składników bądź pękanie. Zjawiskiem towarzyszącym procesowi krzepnięcia jest również skurcz, powodujący zmniejszenie objętości metalu i prowadzący tym samym do powstawania jam skurczowych, zazwyczaj znajdujących się w górnej części wlewnicy [2].

Krystalizacja polega na przejściu substancji ze stanu ciekłego do stałego, w którym ciekły metal krzepnie. Składa się z dwóch etapów, jakimi są zarodkowanie, czyli tworzenie się zarodków krystalicznych i następujący po nim wzrost zarodków, aż do zetknięcia się powstałych kryształitów ze sobą [88]. Początkowa liczba zarodków decyduje o ilości utworzonych później ziaren [2]. Wzrost kryształów jest determinowany przez szybkość odprowadzania ciepła oraz dyfuzję atomów z fazy ciekłej do powierzchni krystalizującej. Kształt i wielkość kryształów zależą od warunków krzepnięcia – szybko krzepnące metale mogą tworzyć drobną, jednorodną mikrostrukturę, podczas gdy wolniejsze krzepnięcie sprzyja tworzeniu większych ziaren. Sam proces zarodkowania, będący pierwszą częścią procesu krystalizacji, można zdefiniować jako

tworzenie klastrów mających zdolność do zwiększania swoich rozmiarów. Energia potrzebna do utworzenia zarodka krystalicznego o promieniu r w jednorodnym środowisku jest wyrażana wzorem (1):

$$\Delta G = \frac{4\pi r^3 \Delta G_v}{3} + 4\pi r^2 \gamma \quad (1)$$

gdzie:

- ΔG – zmiana energii swobodnej,
- ΔG_v – zmiana energii swobodnej przypadającej na jednostkę objętości przy krzepnięciu,
- γ – napięcie powierzchniowe na granicy faz.

Gdy r osiąga krytyczną wartość r_c , dla której zmiana energii swobodnej ΔG jest maksymalna, zachodzi zarodkowanie. W wyniku przejścia ze stanu ciekłego do stałego stanu krystalicznego substancji, atomy tworzą kryształ z charakterystyczną siecią krystaliczną, gdzie sposób ułożenia atomów w kryształ determinuje jego własności fizyczne, a siły wzajemnie przyciągających się atomów lub wiązań atomowych kryształu utrzymują jego spójność. Wzrost kryształów opisuje się za pomocą równania transportu masy i ciepła. Szybkość rozrostu kryształu V może być wyrażona jako funkcja temperatury T (2):

$$V(T) = V_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

gdzie:

- V_0 – współczynnik preeksponentyacyjny,
- Q – energia aktywacji procesu wzrostu,
- R – stała gazowa,
- T – temperatura w kelwinach.

Badania doświadczalne wykazują, że zarodkowaniu kryształów sprzyjają pojawiające się w ciekłym metalu podkładki, czyli erozja materiałów ogniotrwałych przez ciekły metal lub wtrącenia wprowadzone do kąpieli specjalnie w celu modyfikacji stopu. Proces zarodkowania na podkładkach w ciekłym metalu nazywany jest zarodkowaniem heterogenicznym. Przykładowo, uproszczona teoria zarodkowania heterogenicznego zakłada, że skupiska powstałe w ciekłym metalu stykają się z podkładkami i przyjmują kształt fragmentów kulistych [26]. Struktura metalu po krzepnięciu zależy od wielu czynników, takich jak szybkość chłodzenia, skład chemiczny oraz obecność modyfikatorów. W przypadku stopów, krzepnięcie może prowadzić do powstania różnorodnych struktur, takich jak dendryty, eutektyki czy struktury granularne. W przypadku krzepnięcia stopów,

takich jak siluminy, możliwe jest powstanie mikrostruktur eutektycznych, które można opisać równaniem fazowym (3):

$$\frac{dT}{dC} = \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (3)$$

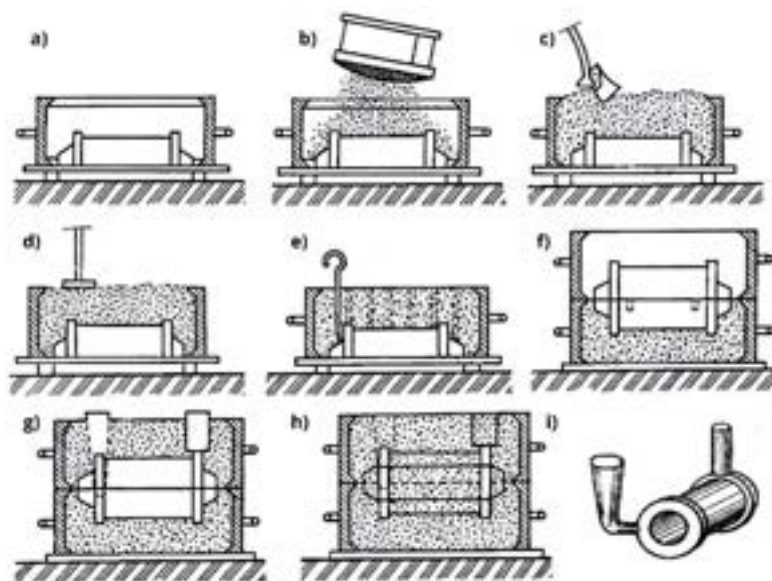
gdzie:

- ΔH – zmiana entalpii,
- ΔS – zmiana entropii przy krzepnięciu.

Zarodkowanie dla siluminów może przebiegać zarówno w sposób heterogeniczny, gdy zarodki krystaliczne powstają na powierzchniach form odlewniczych, jak i homogeniczny, gdy zarodki pojawiają się losowo w cieczy. Obecność krzemu wpływa na proces zarodkowania, sprzyjając tworzeniu się zarodków eutektycznych. Siluminy podeutektyczne, które zawierają mniej krzemu, krzepną poprzez formowanie się kryształów α -Al, podczas gdy krzem w formie eutektycznej obecny jest w mniejszym stopniu. Szybkie chłodzenie sprzyja formowaniu drobnoziarnistych struktur eutektycznych, co zwiększa twardość i wytrzymałość materiału. Z kolei wolne chłodzenie może prowadzić do wzrostu ziaren i tworzenia mniej jednorodnych struktur. Fraś [89] podkreśla, że kontrolowanie szybkości chłodzenia jest kluczowe w procesie odlewniczym, aby uzyskać pożądane własności mechaniczne stopu. W celu poprawy struktury krystalicznej siluminu często używane są modyfikatory, takie jak stront, które wpływają na rozmiar i kształt ziaren eutektycznych, wpływając na własności końcowe stopu. Zagadnienie to zostanie szerzej opisane w kolejnych rozdziałach pracy.

1.2.2. Odlewanie do form piaskowych

Proces odlewania do form piaskowych jest jedną z najstarszych i najpowszechniejszych metod wytwarzania metalowych odlewów. W przypadku produkcji mało i średnioseryjnej, jednorazowe formy piaskowe są tańszym sposobem zapewnienia możliwości produkcji w porównaniu z formami kokilowymi i ciśnieniowymi, które wymagają poniesienia kosztów. Metoda ta polega na wytworzeniu formy z piasku, do której następnie wlewa się roztopiony metal [88]. Schematycznie proces odlewania do formy piaskowej zobrazowano na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Schemat procesu odlewania do formy piaskowej:

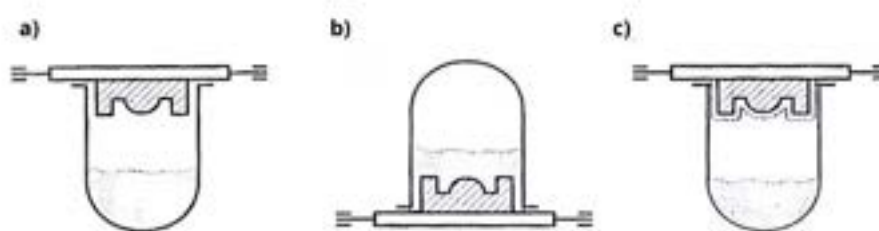
a – umieszczenie modelu w formie, b – naniesienie na model warstwy masy formierskiej przymodelowej, c – wypełnienie skrzynki masą formierską, d – zagęszczenie masy formierskiej, e – wykonanie nakłuwakiem kanałów odpowietrzających, f – odwrócenie dolnej pół-formy i przykrycie jej drugą płytą podmodelu, g – ustawienie modeli wlewu głównego i przelewu oraz naniesienie i zagęszczenie na górną część modelu masy modelowej, h – wyjęcie modelu z formy i ponowne jej złożenie, i – odlew modelu [90]

W przypadku siluminów, formy piaskowe są wytwarzane z mieszanki piasku kwarcowego, spoiwa (najczęściej gliny) oraz wody. Formowanie polega na ubijaniu tej mieszanki wokół modelu w specjalnych skrzyniach formierskich. Kluczowym aspektem jest uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości formy oraz jej przepuszczalności dla gazów, co zapobiega powstawaniu wad odlewniczych, takich jak porowatość czy niedolanie. Topienie stopów aluminium z krzemem odbywa się w piecach indukcyjnych lub tyglowych. Temperatura topnienia siluminów wynosi około 660-700 °C [90]. Proces topienia musi być kontrolowany pod względem temperatury i czystości metalu, aby uniknąć wtrąceń i zapewnić wysoką jakość odlewu. Po stopieniu metal jest przelewany do formy piaskowej, która wcześniej została przygotowana i nagrzana do odpowiedniej temperatury. Proces zalewania musi być przeprowadzony szybko i równomiernie, aby uniknąć utleniania metalu i powstawania wad powierzchniowych. Po zalaniu forma piaskowa jest pozostawiana do ostygnięcia. Chłodzenie powinno być kontrolowane, aby uniknąć naprężeń i pęknięć w odlewie. W ostatnim kroku forma jest rozbijana, a odlew oczyszczany z pozostałości piasku i poddawany obróbce powierzchniowej. Ten proces odlewania umożliwia produkcję dużych

i skomplikowanych kształtów przy relatywnie niskich kosztach form piaskowych, a dobra lejąność siluminów umożliwia odlewanie cienkościennych elementów. Proces ten wymusza jednak również konieczność precyzyjnego kontrolowania parametrów procesu oraz wymaga większego zużycia energii w porównaniu z innymi metodami odlewania, np. ciśnieniowym [92].

1.2.3. Odlewanie skorupowe

Odlewanie skorupowe, które schematycznie przedstawiono na rys. 1.3 polega na zalewaniu form z utwardzoną warstwą, skorupą powstałą w wyniku zasypania nagrzanej płyty modelowej formy masą i przetrzymana w tym stanie ok. 20 sekund. Skorupę można wzmocnić przez zanurzenie jej w masie ceramicznej i jej późniejsze wypalenie. Metodę odlewania skorupowego stosuje się w produkcji seryjnej, do wytwarzania małych i średnich odlewów o dużej dokładności. Badania przeprowadzone przez Jabłońskiego i Kaczmarka [93] wykazały, że odlewanie skorupowe pozwala na uzyskanie jednolitej mikrostruktury stopów aluminium, co przekłada się na lepsze własności mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie i twardość.



Rys. 1.3 Schemat formowania skorupowego;

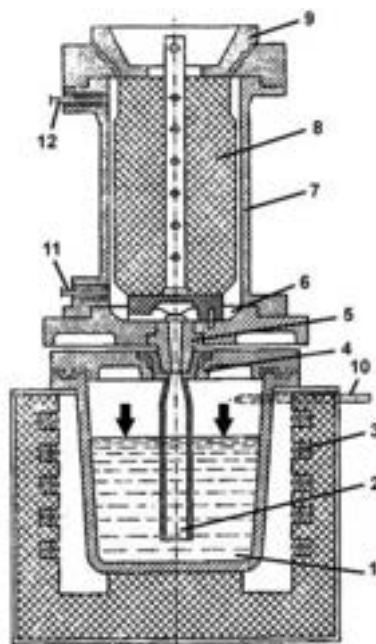
na rysunku przedstawiono kolejne etapy: a) zamocowanie zbiornika z masą do gorącej płyty modelowej, b) zasypanie modelu po obrocie układu i utworzeniu się skorupy, c) przywrócenie pozycji wyjściowej w wyniku ponownego obrotu układu [94]

Metoda ta stosowana jest zazwyczaj przy jednostkowej produkcji odlewów, gdyż jest mało wydajna i zbyt wolna by stosować ją w produkcji masowej i seryjnej. Według Wiśniewskiego [95] wysoka precyzja tej metody pozwala na produkcję skomplikowanych kształtów, takich jak głowice cylindrów i kolektory wydechowe, z minimalnym ryzykiem defektów. Badania prowadzone przez Kowalskiego i Nowaka [96] wykazują, że kontrola temperatury i czasu utwardzania skorupy mają kluczowe znaczenie dla jakości odlewów siluminowych, a optymalizacja tych parametrów minimalizuje wady odlewnicze, takie jak porowatość czy pęknięcia powierzchniowe.

1.2.4. Odlewanie kokilowe

Proces odlewania kokilowego polega na wlewaniu ciekłego metalu do trwałej formy (kokili), co pozwala na uzyskanie odlewów o wysokiej precyzji i wytrzymałości. Jest to jedna z najczęściej stosowanych metod odlewniczych, wykorzystywana głównie do produkcji elementów z metali nieżelaznych, takich jak aluminium czy miedź. Schematycznie proces przedstawiono na rys. 1.4.

Do odlewania kokilowego stosowane są obecne w maszynie odlewniczej dwuczęściowe formy, zwykle wykonane ze stali lub żeliwa. Materiał ten pozwala na prowadzenie produkcji wieloseryjnej w przypadku metali o stosunkowo niskiej temperaturze topnienia, jak aluminium, bizmut, ołów czy cyna oraz odlewów o dużych gabarytach, których odlewnie przy takim doborze materiałów nie prowadzi do zbyt intensywnego zużycia formy [97]. Procesy odlewania kokilowego obejmują odlewanie grawitacyjne oraz wykonywanie odlewów pod niskim ciśnieniem, jednak odlewy wytwarzane tą metodą charakteryzuje również mniejsza dokładność i konieczność dodatkowej obróbki w porównaniu do metod odlewania ciśnieniowego. W przemyśle motoryzacyjnym odlewanie kokilowe jest szeroko stosowane do produkcji części silników, takich jak tłoki i głowice cylindrów [98]. Badania przedstawione przez Hossaina i wsp. [99] wskazują, że komponenty wykonane tą metodą charakteryzują się dłuższą żywotnością i lepszą odpornością na zużycie w porównaniu do odlewów wykonanych innymi metodami, co potwierdzają także badania prowadzone przez Kima i Lee [100]. Autorzy w swojej pracy porównali własności odlewów siłuminowych wykonanych metodą kokilową i piaskową, które wykazały, że odlewy kokilowe mają wyższą wytrzymałość na rozciąganie i twardość, głównie dzięki mniejszej porowatości i bardziej jednolitej mikrostrukturze.



Rys. 1.4 Schemat urządzenia niskociśnieniowego do odlewania kokilowego;

1-awaryjny spust metalu, 2- tygiel grafitowy, 3- wlot sprężonego powietrza, 4 –stała połówka formy, 5- ruchoma połówka formy, 6- prowadnice, 7- cylinder hydrauliczny otwierania formy, 8 –stała płyta górna, 9- ruchoma płyta, 10- stała płyta dolna, 11-szczelina powietrzna, 12- rura zalewowa, 13- obudowa pieca, 14- ogrzewanie oporowe, 15- palnik gazowy [94]

W przypadku siluminów odlewanie kokilowe pozwala na uzyskanie drobnoziarnistej mikrostruktury, co znacząco poprawia wytrzymałość mechaniczną odlewów. Szybkie chłodzenie w formie metalowej prowadzi do tworzenia się małych ziaren krzemowych, co również jest korzystne dla własności mechanicznych stopu, co potwierdzają także wyniki przedstawione przez Zhanga i wsp. [101].

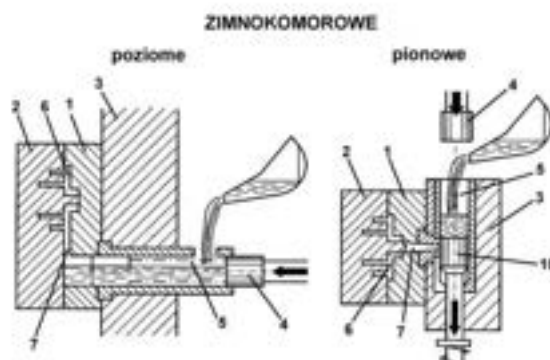
1.2.5. Odlewanie pod wysokim ciśnieniem

Odlewanie ciśnieniowe to metoda wytwarzania elementów metalowych polegająca na wtrysku określonej masy roztopionego metalu pod ciśnieniem do formy, poprzez ruch tłoka maszyny odlewniczej i wywieranie ciśnienia na ten metal do czasu jego zakrzepnięcia i wystudzenia. Krótki czas cyklu oraz możliwość automatyzacji procesu czynią tę metodę szczególnie efektywną dla produkcji wielkoseryjnej [102]. Po zakrzepnięciu i wystudzeniu, połówki formy są otwierane, a odlew wyjmowany ręcznie bądź z wykorzystaniem systemu zautomatyzowanego. Przed samym użyciem powierzchnia form stosowanych w procesie pokrywana jest środkami smarnymi oraz podgrzewana lub chłodzona w celu otrzymania

określonej temperatury [2]. Do podstawowych zalet technologii odlewania ciśnieniowego należy bardzo wysoka dokładność wymiarów oraz grubości ścianek dla detali o cienkich ściankach. Odlewy otrzymane tą metodą odznaczają się również małą chropowatością powierzchni, drobnoziarnistą mikrostrukturą oraz wysokimi własnościami mechanicznymi. Dzięki wysokiemu ciśnieniu odlewy wykonane tą metodą charakteryzują się wysoką dokładnością wymiarową i gładką powierzchnią, co minimalizuje potrzebę dalszej obróbki mechanicznej [103]. Koszty związane z zakupem maszyn i form mogą być wysokie, co sprawia, że metoda ta jest bardziej opłacalna przy dużych wolumenach produkcji, przede wszystkim dla odlewów o małych i średnich gabarytach [104, 105]. Zjawiskami mogącymi pogorszyć jakość wyrobu odlewanego mogą być wszelkiego rodzaju niedolewy, porowatości, pęcherze, pęknięcia i przywieranie materiału wsadowego do formy, chociaż według autorów prac [106, 107] odlewy te są zazwyczaj bardziej wytrzymałe i mniej podatne na porowatość w porównaniu z odlewami uzyskiwanymi przy zastosowaniu innych metod.

Wykorzystywane się dwa rodzaje maszyn do odlewania w pod wysokim ciśnieniem:

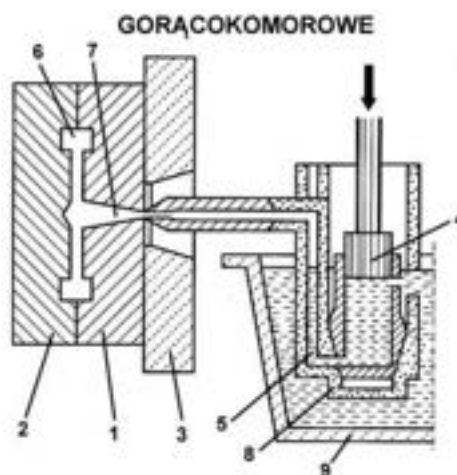
- **Maszyny zimnokomorowe** (rys. 1.5) cechują się tym, że zbiornik ciekłego metalu jest oddzielony od maszyny odlewniczej, a dostarczenie metalu do formy odbywa się poprzez wlewanie łyżką, ręcznie bądź mechanicznie. Metal wlewany jest do komory, z której pod ciśnieniem transportowany jest następnie do wnęki formy [108].



Rys. 1.5 Schemat odlewania zimnokomorowego:

1 – nieruchoma część formy, 2 – ruchoma część formy, 3 – kadłub przedni maszyny, 4 – tłok prasujący, 5 – komora ciśnienia gorąca lub zimna, 6 – wnęka formy odtwarzająca odlew, 7 – wlew, 8 – gorący zbiornik cylindryczny z przewodem wlewowym, 9 – tygiel pieca grzewczego, 10 – tłok dolny do ucinania wlewu i wyrzucenia nadmiaru metalu w postaci zestalonego krążka [94]

- **Maszyny gorąco-komorowe** (rys. 1.6) cechują się tym, że posiadają zbiornik ciekłego metalu oraz urządzenie ten metal transportujące, dzięki tym elementom ciekły metal jest automatycznie zbierany ze zbiornika i pod ciśnieniem wtryskiwany do formy metalowej [108].



Rys. 1.6 Schemat odlewania gorącokomorowego:

1 – nieruchoma część formy, 2 – ruchoma część formy, 3 – kadłub przedni maszyny, 4 – tłok prasujący, 5 – komora ciśnienia gorąca lub zimna, 6 – wnęka formy odtwarzająca odlew, 7 – wlew, 8 – gorący zbiornik cylindryczny z przewodem wlewowym, 9 – tygiel pieca grzewczego, 10 – tłok dolny do ucinania wlewu i wyrzucenia nadmiaru metalu w postaci zestalonego krążka [94]

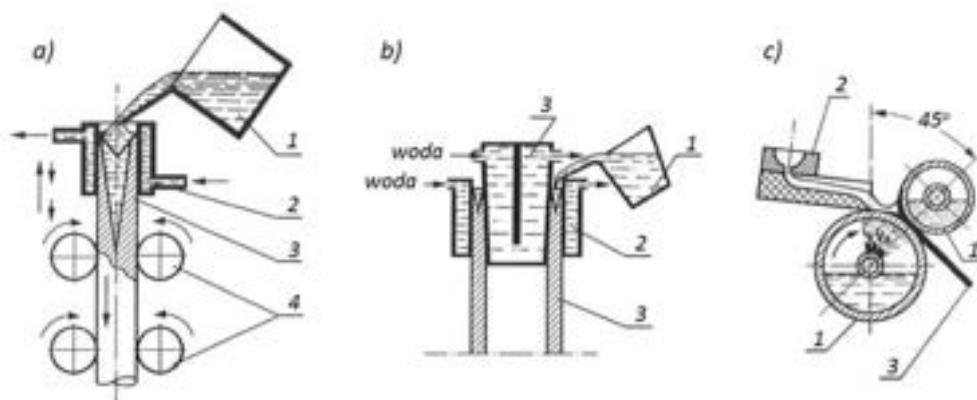
1.2.6. Odlewanie ciągle i półciągle

Odlewanie ciągle polega na wytwarzaniu odlewów o stałym przekroju poprzecznym i znacznej długości. Istotą procesu jest przy tym ciągle doprowadzanie ciekłego tworzywa do krystalizatora oraz odbieranie z niego odlewu w miarę krzepnięcia tworzywa. W procesie odlewania ciągłego krzepnący materiał jest ciągnięty przez krystalizator, co prowadzi do powstania długiego, ciągłego odlewu w postaci pręta, bloku lub płyty. Odlew w miarę potrzeb jest kolejno cięty na odpowiedniej długości fragmenty. Specyfika tego procesu pozwala na osiągnięcie wysokiej wydajności i niskich kosztów produkcji dla dużej ilości otrzymanego wyrobu, jak i mniejsze straty materiału w porównaniu do tradycyjnych metod odlewniczych. Odlewy wykonane tą metodą cechuje dobra jakość oraz jednorodna mikrostruktura. Odlewanie półciągle jest podobne do ciągłego, ale z pewnymi różnicami, które pozwalają na produkcję krótszych odlewów i bardziej skomplikowanych kształtów. Forma może być otwierana po częściowym stężeniu metalu, co umożliwia odprowadzenie

odlewu a sam proces powtarzany może być cyklicznie. Metoda ta umożliwia produkcję bardziej skomplikowanych kształtów, niż w przypadku odlewania ciągłego dla osiągnięcia efektu wysokiej jakości powierzchni odlewów [109].

Procesy odlewania ciągłego i półciągłego wykorzystuje się w przemyśle motoryzacyjnym do produkcji elementów konstrukcyjnych, jak bloki silników, wytwarzanie profili aluminiowych oraz drutów i przewodów, a w przemyśle elektronicznym do wytwarzania obudów i elementów konstrukcyjnych [110].

Na rys. 1.7 Przedstawiono schematycznie procesy odlewania ciągłego wałka, rury i blachy.



Rys. 1.7. Proces odlewania ciągłego:

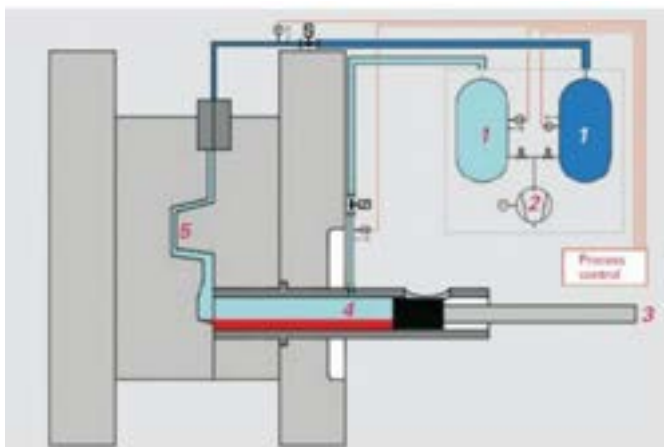
- a) wałka; 1 - kadz, 2 - krystalizator chłodzony wodą, 3 - odlew, 4 - rolki ciągnące odlew;
 b) rury; 1 - kadz, 2 - część zewnętrzną krystalizatora, 3 - krystalizator odtwarzający wewnętrzną powierzchnię rury, 4 - odlew rury; c) blachy; 1 - krystalizatory walcowe, 2 - zbiornik z ciekłym metalem, 3 - odlew blachy [94]

1.2.7. Odlewanie próżniowe

Jednym z negatywnych aspektów technologii odlewania ciśnieniowego jest powstawanie porowatości gazowej w różnych częściach odlewu, co jest spowodowane niewłaściwym odpowietrzeniem formy. Problemy te wynikają również z faktu, że odlewanie ciśnieniowe jest stosowane w produkcji wielkoseryjnej, która wymaga maksymalizacji prędkości wytwarzania odlewów. Wysoka prędkość tłoka i szybkie wtryskiwanie oraz wypełnianie formy nie dają wystarczająco dużo czasu na usunięcie gazów z formy, co prowadzi do ich rozpuszczenia w ciekłym metalu. Ilość zatrzymanego gazu zależy od wielu czynników, takich jak jego ciśnienie nad kąpielą, temperatura topnienia i czas przetrzymywania metalu w piecu podgrzewczym. Wysoka prędkość produkcji w klasycznym odlewaniu ciśnieniowym zwiększa zatem porowatość odlewów. Mathew [111] analizując rozkład porowatości w odlewach z siluminów za pomocą tomografii komputerowej wykazał, że

stosowanie procesu odlewania próżniowego znacząco redukuje ilość porowatości w odlewach, co prowadzi do poprawy własności mechanicznych. Metoda odlewania w warunkach obniżonego ciśnienia atmosferycznego pozwala na utrzymanie wysokiej wydajności maszyny odlewniczej oraz poprawę jakości odlewów. Proces ten polega na zmniejszeniu ciśnienia wewnątrz formy i komory maszyny odlewniczej. Schematycznie proces przedstawiono na rys. 1.8. Choć metoda ta nazywana jest odlewaniem próżniowym, nie tworzy się absolutnej próżni, a jedynie stan bliski próżni, różniący się od naturalnych warunków. Obniżone ciśnienie redukuje ilość powietrza i gazów powstających w wyniku parowania i spalania powłok ochronnych wewnątrz formy i komory. Powstające w ten sposób gazy muszą być usunięte przez układ próżniowy, jednak czasami w formach pozostają ich niewielkie ilości [112].

Eliminacja fazy gazowej powoduje, oprócz redukcji porowatości, zwiększenie prędkości wypełniania wnęki formy, obniżenie się turbulentności przepływu i wzrost prędkości strumienia. Odlewanie próżniowe stosuje się do wytwarzania elementów, które muszą pracować w podwyższonej temperaturze, które powinny charakteryzować się zwiększoną jakością mikrostruktury, lepszą jakością powierzchni, brakiem mikroporowatości podpowierzchniowej, co umożliwia łatwiejsze nakładanie powłok odlewniczych oraz obróbkę mechaniczną bez ryzyka odkrycia wewnętrznych nieciągłości. Posiadają także lepsze własności mechaniczne, co jest istotne podczas dalszej obróbki i spawania. Aby osiągnąć te korzyści, konieczne jest właściwe zaprojektowanie formy oraz dostosowanie pozostałych elementów, temperatury i powłok ochronnych. Szczególną wagę należy przywiązać do konstrukcji układu wlewowego i kanałów odpowietrzających, które powinny być głębokie i o dużym przekroju [2, 113]. Wadami procesu odlewania próżniowego w stosunku do metody klasycznej jest zwiększone występowanie zjawisk skurczowych oraz ich skutków, a także potrzeba stosowania wyłącznie metali o niskiej temperaturze topnienia. Należy liczyć się również z obniżeniem wydajności maszyny, ze względu na czas wymagany do wytworzenia warunków obniżonego ciśnienia. Równie istotny jest wysoki koszt narzędzi odlewniczych, co czyni metodę mniej opłacalną przy niskiej produkcji seryjnej, jak i wymusza potrzebę regularnych przeglądów maszyny i form, aby można je było używać z pompą próżniową. Obecnie technologia ta jest najbardziej rozpowszechnioną wśród metod specjalnych odlewania ciśnieniowego ze względu na prostotę oraz wysoką wydajność i znajduje zastosowanie w większości gałęzi przemysłu w których wymagany jest produkt o wysokiej jakości i dobrych własnościach, np. w przemyśle samochodowym, lotniczym i artykułów gospodarstwa domowego [115].

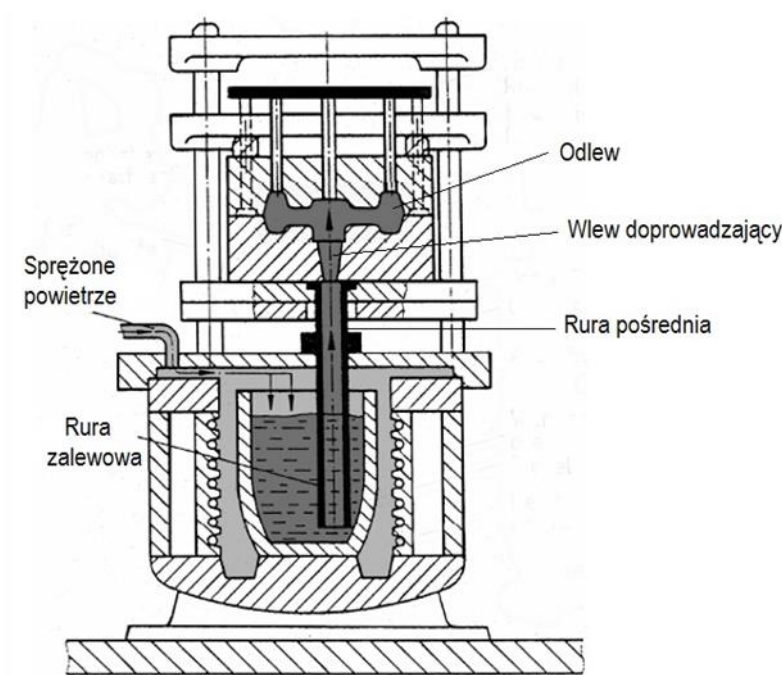


Rys. 1.8 Proces odlewania w warunkach obniżonego ciśnienia atmosferycznego;

1 – zbiornik próżniowy, 2 – pompa próżniowa, 3 – tłok, 4 – komora prasowania, 5 – wneka formy [116]

1.2.8. Odlewanie pod niskim ciśnieniem

Odlewanie pod niskim ciśnieniem jest technologią odlewniczą, która umożliwia produkcję wysokiej jakości odlewów metalowych. Jako odmiana odlewania kokilowego, metoda ta stosowana jest do wytwarzania odlewów poprzez wprowadzenie metalu do formy za pomocą ciśnienia niższego niż atmosferyczne. Forma jest wykonana z materiałów odpornych na wysoką temperaturę, takich jak stal narzędziowa. Forma składa się z dwóch części: stałej i ruchomej, co umożliwia łatwe wyjmowanie gotowego odlewu. Na etapie topienia ważna jest kontrola temperatury topienia, aby uniknąć zanieczyszczeń i defektów w odlewach. Stopiony metal jest transportowany do komory ciśnieniowej, skąd jest wstrzykiwany do formy pod niskim ciśnieniem (0,1-1,0 bar). Ciśnienie to jest wystarczające, aby wypełnić formę, ale na tyle niskie, aby zminimalizować porowatość i inne defekty. Po wprowadzeniu metalu do formy, zaczyna on krystalizować i twardnieć [117]. Schematycznie proces odlewania pod niskim ciśnieniem przedstawiono na rys. 1.9.



Rys. 1.9 Proces odlewania pod niskim ciśnieniem [94]

Chłodzenie może być naturalne lub wspomagane przez systemy chłodzące, co przyspiesza proces i poprawia własności mechaniczne odlewów. Po stwardnieniu metalu, forma jest otwierana, a odlew jest wyjmowany. Odlew może wymagać dalszej obróbki, takiej jak usuwanie nadmiaru materiału, szlifowanie, czy polerowanie. Proces pozwala na uzyskanie odlewów wysokiej jakości, z minimalną porowatością i defektami. Możliwość dokładnego kontrolowania przepływu metalu i ciśnienia umożliwia produkcję odlewów o złożonych kształtach i precyzyjnych wymiarach szybko i efektywnie, co pozwala na masową produkcję. Odlewanie pod niskim ciśnieniem cechuje optymalne zużycie materiału, a minimalne ilości odpadów odlewniczych przekładają się na niższe koszty produkcji [16, 118].

1.3. Metody rafinacji metalu

Rafinacja metalu jest kluczowym procesem w przemyśle metalurgicznym, mającym na celu poprawę jakości metalu. Proces ten obejmuje różne techniki, w tym stosowanie żużli i gazów obojętnych. Monroe [119] podkreśla, że porowatość w odlewach powstaje w wyniku uwięzienia gazów w metalach podczas procesu odlewania. W kontekście użycia gazów obojętnych, Monroe zauważa, że wprowadzenie gazów obojętnych, takich jak argon, podczas rafinacji metalu może zredukować reakcje chemiczne, które prowadzą do powstawania wtrąceń i porowatości. Gazy te używane do dekarbonizacji i innych procesów

rafinacji, pomagają w kontrolowaniu zawartości tlenu i innych zanieczyszczeń, co jest istotne dla uzyskania wysokiej jakości metali. Rafinacja metalu jest więc niezbędna do eliminacji tych problemów i poprawy integralności strukturalnej odlewów [120].

1.3.1. Rafinacja żużlowa

Rafinacja żużlowa metalu polega na dodaniu do ciekłego metalu odpowiednich substancji, które reagują z zanieczyszczeniami, tworząc zgary będące odpadem poprocesowym. Utworzone zgary są następnie usuwane, pozostawiając czystszy metal. Głównym celem tego procesu jest poprawa własności fizycznych, chemicznych i mechanicznych metalu poprzez usunięcie zanieczyszczeń takich jak siarczki, fosfor, tlenki czy azotki. Żużle pełnią kilka istotnych funkcji w procesie rafinacji. Przede wszystkim, działają jako medium absorpcyjne dla zanieczyszczeń niemetalicznych, takich jak tlenki, siarczki czy fosforany. Zanieczyszczenia te są chemicznie wiązane przez składniki żużłu, co umożliwia ich oddzielenie od metalu. Przybyłowicz [2] zwraca uwagę na skład chemiczny żużli, który jest starannie dobierany w zależności od rodzaju rafinowanego metalu i specyficznych zanieczyszczeń, które mają zostać usunięte. Na przykład, w procesach rafinacji aluminium, często stosuje się żużle zawierające fluorki, które efektywnie wiążą tlenki glinu. Stosowanie żużli umożliwia efektywne usuwanie zanieczyszczeń takich jak tlenki i siarczki. Wu i wsp. w swojej pracy [121] podkreślają, że proces rafinacji przy użyciu żużli polega na wykorzystaniu specjalnych mieszanek, które są dodawane do stopionego metalu. Żużle te mają za zadanie pochłaniać zanieczyszczenia oraz neutralizować szkodliwe substancje, co prowadzi do uzyskania czystszych stopów aluminium. Kashyap i Chandrashekar [122], wskazują, że efektywność stosowania żużli zależy od składu chemicznego oraz własności fizycznych użytych materiałów. Właściwie dobrany żużel może znacząco poprawić jakość metalu poprzez usuwanie tlenków i innych niepożądanych cząsteczek.

Istnieje wiele rodzajów żużli używanych w procesie rafinacji, w zależności od metalu, który ma być oczyszczany. Do najczęściej stosowanych należą:

- **Żużel kwaśny:** stosowany głównie do usuwania zasadowych zanieczyszczeń.
- **Żużel zasadowy:** używany do usuwania kwaśnych zanieczyszczeń.
- **Żużel obojętny:** stosowany, gdy zanieczyszczenia są zarówno kwaśne, jak i zasadowe.

Każdy rodzaj żużla spełnia określoną funkcję i jest wybierany na podstawie charakterystyki metalu oraz rodzaju i ilości zanieczyszczeń. Proces rafinacji żużlowej można podzielić na kilka etapów:

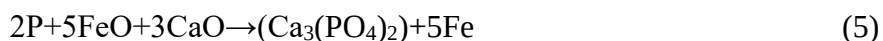
- **Topienie metalu:** Metal jest podgrzewany do temperatury topnienia.
- **Dodawanie żużla:** W odpowiednim momencie do ciekłego metalu dodawane są substancje tworzące żużel. Substancje te reagują z zanieczyszczeniami tworząc oddzielny żużel.
- **Oddzielanie żużla:** Po zakończeniu reakcji, żużel, który zwykle jest lżejszy od metalu, unosi się na powierzchni i może być łatwo usunięty.
- **Końcowe oczyszczanie:** W razie potrzeby, metal może być poddany dalszym procesom oczyszczania w celu usunięcia pozostałych zanieczyszczeń [2].

Podczas rafinacji żużlowej zachodzą różnorodne reakcje chemiczne. Przykładowe reakcje obejmują:

- **Usuwanie siarki:** Siarka w metalu reaguje z tlenkami wapnia (CaO) w żużlu, tworząc siarczki wapnia (CaS), które są usuwane razem z żużlem (4).



- **Usuwanie fosforu:** Fosfor reaguje z tlenkami żelaza (FeO) i wapnia (CaO), tworząc fosforany ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), które są następnie usuwane (5).



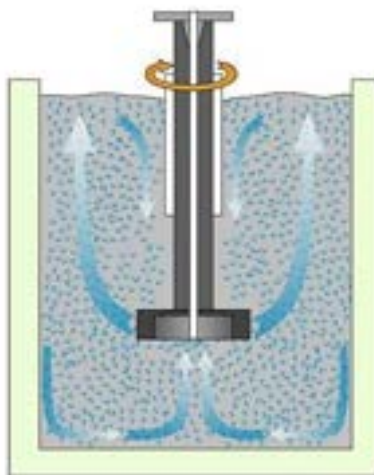
Rafinacja żużlowa jest nieodzownym procesem w nowoczesnej metalurgii. Pozwala na uzyskanie metali o wysokiej czystości, co jest kluczowe dla wielu zastosowań przemysłowych. Wysokiej jakości metale są niezbędne w produkcji wyrobów o wysokiej wytrzymałości, odporności na korozję i innych krytycznych właściwościach. Znajduje ona zastosowanie w oczyszczaniu różnych metali, w tym stali, miedzi, aluminium i innych metali nieżelaznych. Na przykład w przemyśle stalowym, rafinacja żużlowa jest kluczowa w procesach takich jak konwertor tlenowy (BOF), gdzie żużel pomaga usunąć węgiel, siarkę i inne zanieczyszczenia ze stopu żelaza [2, 26]. Wyniki przedstawione w pracy [140] dowiodły, że proces rafinacji miał obniżoną skuteczność przy temperaturze topnienia poniżej 700 °C. Rafinacja stopionego aluminium w temperaturze 740 °C skutkowałą zwiększeniem wytrzymałości na rozciąganie próbek o około 25,2 % oraz wydłużenia o około 17,5 %. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy ustalili, że optymalna temperatura topnienia przy której topnik skutecznie usuwa tlenki i wtrącenia ze stopionego aluminium wynosi około 740 °C. W temperaturze 740 °C uzyskano najlepsze rezultaty w zakresie jednorodności mikrostruktury, co jest związane z efektywnym usunięciem wtrąceń i tlenków. Przy temperaturze powyżej 740 °C, efektywność procesu rafinacji zmniejszała się. Przy wyższej temperaturze topnienia, jak 790 °C, absorpcja wodoru w stopionym aluminium została przyspieszona. Zjawisko to było spowodowane

zwiększonym parowaniem żużli oraz obniżoną stabilnością chemiczną niektórych dodatków. Dowiedziono, że zbyt wysoka temperatura może prowadzić do strat materiałowych i obniżenia skuteczności procesu. Żużle na bazie chlorków miały skuteczne działanie w niższej temperaturze wynoszącej około 700 °C, ale mniej efektywne w wyższej, gdzie ich działanie mogło być ograniczone przez parowanie. Żużle na bazie fluoru wykazywały lepszą efektywność w temperaturze powyżej 740 °C. Reagowały skutecznie z zanieczyszczeniami, a ich działanie było mniej podatne na wpływ podwyższonej temperatury. Majidi i wsp. [140] wykazują, że temperatura rafinacji ma kluczowe znaczenie dla skuteczności wykorzystywania żużli w rafinacji stopów aluminium. Wyniki badań sugerują, że optymalna temperatura dla skutecznego usuwania zanieczyszczeń i poprawy jakości aluminium mieści się w przedziale od 720 °C do 740 °C. Przekroczenie tego zakresu może prowadzić do obniżenia efektywności procesu z powodu parowania żużli i ich zmniejszonej stabilności chemicznej [140].

1.3.2. Rafinacja barbotażowa

Obecność porów w odlewach AlSi jest spowodowana przede wszystkim przez rozpuszczanie się wodoru w krzepnącym metalu. Wodór zostaje następnie uwięziony w środku, przekształcając się w porowatość po zakończeniu krzepnięcia. Jego usunięcie jest niezbędne do uzyskania odlewu wysokiej jakości [123]. Wiarygodną i skuteczną metodą monitorowania czystości stopu w zakresie obecności wodoru i tlenków w warunkach produkcyjnych jest kontrola indeksu gęstości [124]. Istnieje wiele sposobów radzenia sobie z wymienionymi zanieczyszczeniami. Jednym z nich jest rafinacja barbotażowa, metoda odgazowania stopionego metalu poprzez wprowadzenie do niego gazów obojętnych, takich jak argon lub azot, w połączeniu z jednoczesnym poddaniem go ruchowi obrotowemu następującemu po zanurzeniu wtryskiwacza gazu w cieczy. Wprowadzenie gazów obojętnych, takich jak argon lub azot, zwiększa efektywność rafinacji poprzez tworzenie pęcherzyków, które unoszą się ku powierzchni ciekłego metalu, zbierając po drodze zanieczyszczenia. Z obu tych gazów argon jest gazem bardziej kosztownym, jednocześnie jednak zapewniającym lepsze warunki w procesie samego barbotażu. Wyniki badań Liu i współp. [125] wskazują, że mechaniczne mieszanie przyczynia się do bardziej równomiernego rozproszenia gazu w metalu, co zwiększa efektywność usuwania zanieczyszczeń. Gaz oczyszczający dostaje się do metalu poprzez pionowy, wydrążony wał rotora, gdzie jest rozprowadzany w postaci małych pęcherzyków, które mieszają się ze stopionym materiałem, gdzie dokładne rozprowadzenie zapewniają specjalnie

ukształtowane łopatki rotora. Schematycznie proces rafinacji barbotażowej przedstawiono na rys. 1.10. Metoda ta zapewnia szybszą technikę odgazowania niż tradycyjne, starsze metody i jest lepsza w osiągnięciu niższych poziomów zagazowania [126]. Na sam proces odgazowania ma również wpływ wiele innych czynników decydujących o końcowym stanie ciekłego metalu. Wydłużenie czasu trwania procesu odgazowania skutkuje mniejszą ilością rozpuszczonych gazów w wytopie. W warunkach przemysłowych długość procesu należy zoptymalizować tak, aby otrzymać materiał odlewniczy bez porów, a sam proces nie powinien trwać zbyt długo [127]. Ponadto w przypadku stopów aluminium, w trakcie przetapiania wzrasta absorpcja wodoru, co zmniejsza skuteczność odgazowania [128]. Prawidłowo przeprowadzony proces odgazowania, przy zoptymalizowanych parametrach, prędkości wirnika i gazu rafinacyjnego przepływu, zapewnia wyraźny wzrost wytrzymałości na rozciąganie, granicę plastyczności, wydłużenia i twardość odlewów ciśnieniowych wykonywanych ze stopów aluminium [129].



Rys. 1.10 Schemat procesu rafinacji barbotażowej [130]

Badania przeprowadzone przez Saturnus i Merder [131] wskazują, że konstrukcja rotora ma kluczowy wpływ na efektywność procesu rafinacji aluminium. Optymalne parametry procesu rafinacji barbotażowej autorzy ustalili na 400 obrotów na minutę (rpm), a przepływ gazu obojętnego na 15 dm³/min oraz 500 rpm przy 10 dm³/min przepływu gazu obojętnego. Zastosowanie odpowiedniego kształtu i konfiguracji rotora może zwiększyć efektywność mieszania gazu z ciekłym metalem, co przyczynia się do lepszego usuwania zanieczyszczeń. Również Yamamoto i wsp. [132] badali, jak konstrukcja rotora wpływa na strukturę przepływu w ciekłym aluminium. Autorzy dowiedli, że optymalizacja kształtu rotora może znacząco poprawić jakość procesu, zmniejszając czas potrzebny na osiągnięcie pożądanego

poziomu czystości metalu. Odpowiedni czas trwania procesu powinien uwzględniać specyficzne warunki, takie jak kształt i rozmiar mieszadła, które wpływają na efektywność procesu rafinacji, a odpowiednie zaprojektowanie mieszadła oraz optymalizacja przepływu mogą znacząco wpłynąć na czas trwania procesu rafinacji poprzez skrócenie czasu potrzebnego do efektywnego odgazowania. Lichy w swojej pracy [133] przedstawił wyniki badań dotyczące rafinacji stopów aluminium przy użyciu rotorów wykonanych z grafitu. Uzyskane wyniki dowiodły, że materiał z jakiego jest wykonany rotor także może wpływać na efektywność rafinacji, w tym na szybkość rozpuszczania gazu w ciekłym metalu oraz na żywotność samego rotora. Orłowicz i wsp. [124] przeprowadzili badania nad wpływem rafinacji na porowatość stopów Al-Si odlewanych pod wysokim ciśnieniem. Celem badań było zbadanie, w jaki sposób rafinacja barbotażowa wpływa na jakość mikrostrukturalną i własności mechaniczne odlewów. Wyniki dowiodły znacznie obniżoną porowatość odlewów względem odlewów nie poddawanych procesowi rafinacji. Proces ten skutecznie usuwał rozpuszczone gazy oraz zanieczyszczenia, co prowadziło do zmniejszenia liczby i wielkości porów w odlewach. Dzięki redukcji porowatości oraz oczyszczeniu mikrostruktury stopu, odlewy poddane rafinacji barbotażowej wykazywały znacznie lepsze własności mechaniczne, w tym wyższą wytrzymałość na rozciąganie. Autorzy zauważyli, że odlewy miały wyższą odporność na pękanie oraz większą wytrzymałość zmęczeniową, co jest bezpośrednim efektem lepszej jakości mikrostruktury, która cechowała się większą jednorodnością, mniejszą liczbą i wielkością wtrąceń, a także bardziej jednorodną dystrybucją fazy krzemowej. Mikrostruktura po rafinacji była bardziej zwarta, co sprzyjało poprawie własności mechanicznych. Wykazano, że wyższa zawartość złomu we wsadzie może wydłużyć czas trwania procesu rafinacji, głównie z powodu większej ilości zanieczyszczeń i gazów, które muszą zostać usunięte. Usunięcie tych zanieczyszczeń, w tym tlenków i wodoru wymaga dłuższego czasu, co wpływa na całkowity czas trwania procesu rafinacji [124, 128].

1.3.3. Rafinacja łączona

Rafinacja łączona łączy elementy metod rafinacji żużlowej oraz barbotażowej, które omówiono w rozdziałach 1.3.1 i 1.3.2. W tej metodzie wykorzystuje się jednocześnie barbotowanie gazem oraz dodawanie żużli, co pozwala zoptymalizować efektywność procesu rafinacji. Dzięki kombinacji tych technik możliwe jest skuteczniejsze usuwanie zarówno gazowych, jak i stałych zanieczyszczeń. Połączenie obu metod umożliwia dostosowanie procesu do różnych rodzajów zanieczyszczeń, co w konsekwencji prowadzi

do poprawy własności mechanicznych i odlewniczych stopów. Badania porównawcze przeprowadzone przez Dhaneswarę i wsp. [134] dotyczyły różnych metod odgazowywania, w tym zastosowania czystego argonu oraz tabletek odgazowujących. Stwierdzono, że dodatek odgazowacza zawierającego NaF (fluorek sodu) i NaNO_3 (azotan sodu) wpływa na proces obróbki topiącego się aluminium, zgodnie z reakcjami chemicznymi przedstawionymi w równaniach (6) i (7):



Produktem tych reakcji jest wydzielający się azot (N_2), który po zanurzeniu w stopionym aluminium tworzy pęcherzyki. Obecność pęcherzyków azotu powoduje wiązanie wodoru (H_2), rozpuszczając go w pęcherzykach, a następnie przenosząc na powierzchnię stopionego aluminium.

Równania (5) i (6) wskazują, że związki obecne w żużlach mogą wiązać zanieczyszczenia w postaci tlenków, które unoszą się na powierzchnię stopionego aluminium i są usuwane jako zgary. Dzięki temu zmniejsza się porowatość metalu, co prowadzi do poprawy własności mechanicznych odlewów aluminiowych. Dodatek fluorku sodu i azotanu sodu skutkuje więc poprawą jakości stopu aluminium poprzez redukcję porowatości oraz zwiększenie wytrzymałości mechanicznej gotowych produktów.

Dhaneswara i wsp. [134] wykazali, że zastosowanie czystego argonu daje najlepsze wyniki w zakresie redukcji zawartości wodoru w ciekłym aluminium. Chociaż żużle na bazie NaF- NaNO_3 są skuteczne w usuwaniu zanieczyszczeń i poprawie jakości odlewów, a ich wysoka temperatura topnienia umożliwia efektywne oczyszczanie metalu, to każdy stop wymaga indywidualnego podejścia. Dodatkowo, precyzyjne sterowanie wieloma parametrami może wymagać zaawansowanej wiedzy i doświadczenia technicznego. Złożoność procesu, związana z większą liczbą etapów oraz wykorzystaniem różnych metod, może również zwiększać koszty produkcji oraz wydłużać czas trwania procesu [2].

1.4. Metody czyszczenia i obróbki wykańczającej odlewów

Po otrzymaniu odlewu, zazwyczaj następują procesy związane z jego obróbką. Czyszczenie i obróbka wykańczająca odlewów to kluczowe etapy w procesie produkcji odlewów metalowych. Mają one na celu usunięcie nadmiarowego materiału, poprawę jakości powierzchni oraz przygotowanie odlewu do dalszych etapów produkcji. Rodzaje operacji zależą od materiału i specyfikacji wyrobu, można wyróżnić od kilku do kilkudziesięciu

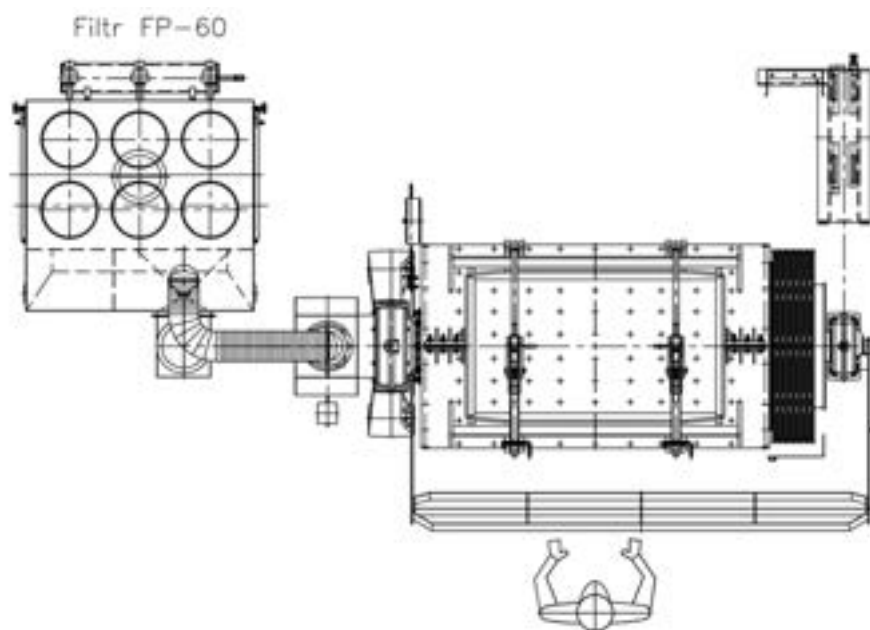
procesów, które towarzyszą odlewowi po jego wykonaniu [2]. W kolejnych podrozdziałach opisano kilka z tych procesów.

1.4.1. Metody czyszczenia

Poniżej opisano wybrane metody czyszczenia odlewów.

- **Oczyszczanie grawitacyjne, ocierne**

Proces ten przeprowadza się w obracających się bębnach, w których odlewy ocierają się i uderzają o siebie. W bębnach znajdują się także metalowe lub ceramiczne kształtki, które mogą dotrzeć do trudno dostępnych miejsc na odlewach. Główną wadą tego procesu jest wysoki poziom hałasu i uwalnianie dużych ilości pyłu. Aby to zminimalizować, stosuje się dźwiękoszczelne kabiny oraz wyściela wnętrze bębna płytami gumowymi lub stosuje izolację w postaci zbiornika wypełnionego cieczą, co tłumi dźwięk procesu [112]. Schematycznie proces przedstawiono na rys. 1.11.



Rys. 1.11 Oczyszczarka bębnowa OB-1000 [135]

- **Oczyszczanie strumieniowe**

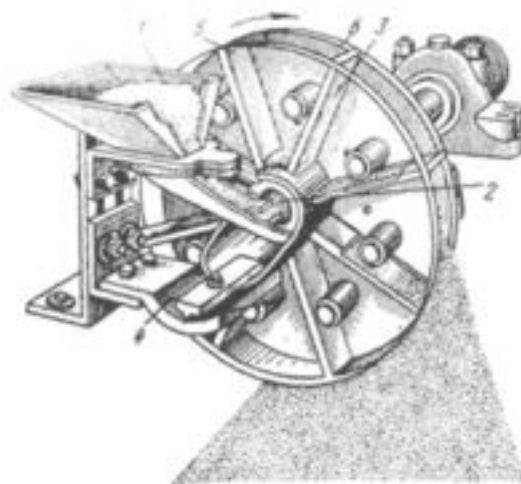
Proces ten, zwany również śrutowaniem, jest metodą modyfikacji powierzchni, której celem jest poprawa jej własności, takich jak odporność na zmęczenie i uszkodzenia, poprzez wprowadzenie resztkowych naprężeń ściskających. Schematyczna ilustracja tego procesu została przedstawiona na rys. 1.12. Oczyszczanie strumieniowe polega na wyrzucaniu metalowych lub szklanych kulek za pomocą sprężonego powietrza lub siły odśrodkowej z wirnika. Śrutowanie jest głównie stosowane do małych i średnich odlewów [134].

Jednak w przypadku niektórych elementów maszyn wirnikowych, takich jak łopatki turbin gazowych i parowych wykonanych ze stali, stopów tytanu oraz nadstopów, intensywne śrutowanie może zwiększać chropowatość powierzchni. To z kolei może prowadzić do obniżenia aerodynamiki i wydajności turbiny, sprzyjać osadzaniu się zanieczyszczeń, korozji i erozji, a także zwiększać ryzyko pęknięć korozyjnych i zmniejszać odporność na zmęczenie [134].



Rys. 1.12 Efekt procesu śrutowania [135]

Aby przeciwdziałać tym negatywnym skutkom, prowadzone są badania nad modyfikacją procesu śrutowania. Jednym z rozwiązań jest prowadzenie dwuetapowego procesu śrutowania, co opisano w patencie EP2353782 [141]. Pierwszy etap obejmuje śrutowanie mokrymi kulkami szklanymi w celu wprowadzenia resztkowych naprężeń ściskających blisko powierzchni elementu. Drugi etap polega na wygładzaniu powierzchni przy użyciu mniejszych kulek szklanych, również na mokro, ale z mniejszą intensywnością, co pozwala zachować naprężenia ściskające na powierzchni czyszczonego komponentu [140]. Zyzak w swojej pracy [138] analizował parametry strumienia śrutowego przy użyciu wskaźników testu z płytkami kontrolnymi. Przeprowadzony test pozwolił na optymalizację procesu śrutowania, tak aby osiągnąć równomierne rozłożenie naprężeń ściskających na powierzchni metalu. Istotna, jak zauważył jest dokładna regulacja ciśnienia, przepływu śrutu oraz odległości od powierzchni odlewu. Schemat wirnika wrzutowego przedstawiono na rys. 1.13.



Rys. 1.13 Schemat wirnika rzutowego;

1 - zbiornik zasypowy, 2 - lej zasypowy, 3 - łopatki rzutowe, 4 - elementy mocowania łopatek, 5 - łopatką, 6 - tarcze koła rzutowego [144]

- **Oczyszczanie strumieniowe**

Proces oczyszczania strumieniowego wykorzystuje energię strumienia wodnego do usuwania zanieczyszczeń z powierzchni odlewów i prowadzony jest przy użyciu wody lub wody z piaskiem pod ciśnieniem od 16 do 25 MPa, z prędkością wynoszącą około 150 m/s [136]. W zależności od wartości ciśnienia i natężenia przepływu, strumień może działać tnąco lub rozluźniająco. Wyższe natężenie przepływu strumienia zwiększa działanie rozluźniające, natomiast wyższe ciśnienie - działanie tnące [2]. Dodanie piasku do wody zwiększa właściwości tnące strumienia, co omawiają między innymi autorzy pracy [139]. Dowiedli oni, że zastosowanie dodatku materiału ściernego do strumienia wodnego pozwala na precyzyjne usunięcie nadmiaru materiału z powierzchni odlewu, bez uszkodzania głównej struktury odlewu. Przy czym technika ta nie generuje wysokiej temperatury, co jest korzystne dla właściwości materiału oraz jest metodą ekologiczną, ponieważ używana jest woda bez dodatków środków chemicznych.

- **Oczyszczanie cieplne**

Technika oczyszczania cieplnego odlewów polega na nagrzewaniu materiału, a następnie szybkim chłodzeniu, co skutkuje odpadaniem zanieczyszczeń dzięki rozszerzalności cieplnej. Metody cieplne obejmują techniki z użyciem łuku elektrycznego i ognia. Oczyszczanie płomieniem gazowym polega na skierowaniu płomienia na zanieczyszczoną powierzchnię odlewu, co powoduje usunięcie zanieczyszczeń, takich jak tłuszcze czy farby [112].

1.4.2. Metody obróbki wykańczającej

Po oczyszczeniu odlewów z zanieczyszczeń przeprowadza się ich obróbkę wykańczającą. Usuwanie elementów układu wlewowego często odbywa się ręcznie, zarówno w małych, jak i większych zakładach, ze względu na prostotę tej metody, zwłaszcza jeśli punkt styku układu z odlewem jest mały, a odlew wykonany jest z kruchego stopu. Aby usprawnić ten proces, już na etapie projektowania formy odlewniczej wprowadza się specjalne przepustki. Jeśli nadlewy są bardzo wytrzymałe lub mają dużą powierzchnię kontaktu z odlewem, do ich usunięcia stosuje się mechaniczne piły, na przykład piły tarczowe, które cechuje wysoka wydajność cięcia. Piły taśmowe są używane do obróbki nadlewów nieżelaznych. Rzadziej stosowaną metodą jest obróbka skrawaniem. Prasy hydrauliczne również są wykorzystywane do usuwania nadlewów poprzez odpowiednie przycinanie zbędnych elementów. Obróbka wykańczająca polega na usunięciu nierówności powstałych podczas odlewania lub usuwania nadlewów, obejmując szlifowanie, ścinanie oraz metody specjalne, takie jak tokarek, zwłaszcza do stopów metali nieżelaznych. Szlifowanie, niezależnie od rodzaju szlifierki, obróbka wybuchowa, cieplna i kriogeniczna. Powszechnie używa się do tych celów frezarek i wymaga pewnego udziału prac ręcznych. Wybór metody szlifowania zależy głównie od rodzaju obrabianego odlewu i wielkości produkcji. Do średnich i dużych odlewów najczęściej stosuje się szlifierki ręczne, do małych – szlifierki stojakowe, a w produkcji masowej – szlifierki automatyczne. Wydajność szlifowania zależy od siły docisku i prędkości obwodowej procesu [2].

1.4.3. Powłoki ochronne

Stosowanie powłok ochronnych ma na celu głównie zabezpieczenie odlewów przed działaniem korozji. Odlewy mogą być narażone na korozję atmosferyczną już podczas przechowywania na zewnątrz lub transportu, dlatego istotne jest stosowanie osłon, zazwyczaj określonych w specyfikacji wyrobu.

- **Malowanie odlewów**

Proces malowania odlewów obejmuje trzy kluczowe etapy: przygotowanie powierzchni, malowanie i suszenie. Przygotowanie powierzchni polega na oczyszczeniu odlewu, co można osiągnąć poprzez obróbkę mechaniczną, taką jak piaskowanie i śrutowanie. Zanieczyszczenia smarami i olejami usuwa się za pomocą procesów odtłuszczania lub mycia w myjkach ultradźwiękowych, używając różnych rozpuszczalników, emulsji i alkaliów w zmechanizowanych urządzeniach odtłuszczających. Odtłuszczanie emulsyjne wykorzystuje ciecz z rozpuszczalnika i środka powierzchniowo czynnego, po czym odlewy

są myte gorącą wodą i suszone. Alternatywą jest odtłuszczanie alkaliczne, w którym emulsję zastępuje trawienie. Następnym etapem jest nakładanie powłoki ochronnej, które zazwyczaj wykonuje się przez malowanie natryskowe, polegające na rozpylaniu materiałów ochronnych na powierzchni odlewu, lub przez malowanie zanurzeniowe, gdzie odlew jest zanurzany w materiale malarskim. Metoda zanurzeniowa jest szczególnie użyteczna dla drobnych odlewów, gdzie malowanie natryskowe byłoby mniej efektywne. Ostatni etap to suszenie, które może przebiegać naturalnie na powietrzu lub sztucznie przy użyciu specjalistycznych urządzeń [2, 112].

- **Nakładanie powłok metalowych**

Proces nakładania powłok metalowych ma na celu nie tylko ochronę przed korozją, ale również poprawę estetyki obrabianego odlewu. Proces ten zazwyczaj odbywa się poprzez natryskiwanie cieplne, gdzie materiał powłokowy jest podgrzewany do stanu ciekłego lub plastycznego, a następnie aplikowany na przygotowaną powierzchnię. Warstwa i podłoże łączą się głównie w sposób mechaniczny, co umożliwia łączenie materiałów, które mogłyby być chemicznie niekompatybilne. Dlatego kluczowe jest odpowiednie przygotowanie i oczyszczenie powierzchni odlewu przed rozpoczęciem procesu. Dzięki możliwości pracy przy niskiej temperaturze podłoża, unika się odkształcenia pokrywanych elementów. Najczęściej wykorzystywanymi metodami nakładania powłok metalicznych są natryskiwanie płomieniowe, łukowe, plazmowe oraz naddźwiękowe (HVOF) [2, 112].

- **Emaliowanie odlewów**

Proces emaliowania odlewów jest techniką szeroko stosowaną w różnych branżach przemysłowych. W szczególności znajduje zastosowanie w produkcji wanien, naczyń kuchennych, a także wytwarzaniu sprzętu dla przemysłu chemicznego, spożywczego i farmaceutycznego. Proces emaliowania polega na pokryciu powierzchni odlewów specjalną warstwą szkliwa, co poprawia ich estetykę, trwałość i odporność na działanie czynników zewnętrznych. Emaliowanie najczęściej przeprowadza się metodą zanurzeniową i natryskową. W metodzie zanurzeniowej wyroby są zanurzone w wannie wypełnionej płynną emalią. Ta metoda zapewnia równomierne pokrycie powierzchni emalią. Alternatywnie, w metodzie natryskowej emalia jest rozpylana na powierzchni przedmiotu. W związku z tym wyróżnia się dwa główne typy emaliowania: na sucho i na mokro. Metoda na sucho zazwyczaj odnosi się do natryskiwania emalii w formie proszku, podczas gdy metoda na mokro używa płynnej emalii aplikowanej poprzez zanurzenie lub natrysk. Oba procesy mają swoje specyficzne zastosowania w zależności od wymagań technicznych i estetycznych wyrobów [2, 112].

1.5. Krytyczna analiza stanu zagadnienia

Aby spełnić wymagania współczesnego rynku, odlewy muszą charakteryzować się wysoką jakością i precyzją wykonania, które są kluczowe dla zapewnienia ich funkcjonalności i trwałości w różnych zastosowaniach przemysłowych. Współczesne standardy wymagają, aby miały bardzo dobrą jednorodność, co oznacza minimalizację defektów takich jak pęknięcia, porowatości czy wtrącenia niepożądanych pierwiastków. Kluczowe jest również zachowanie odpowiednich własności, takich jak wytrzymałość na ściskanie, twardość i odporność na korozję, które muszą być zgodne z normami i specyfikacjami technicznymi dla danego zastosowania. Aby spełnić te wymagania, w procesie produkcji należy uwzględniać parametry technologiczne, takie jak temperatura topnienia metalu, czas krzepnięcia oraz jakość formy. Dzięki temu można zapewnić powtarzalność i wysoką jakość gotowych produktów. Ponadto, efektywne wykorzystanie nowoczesnych technologii, takich jak symulacje komputerowe, kontrola jakości za pomocą zaawansowanych narzędzi pomiarowych oraz zastosowanie materiałów o wysokich własnościach mechanicznych, stają się normą w dążeniu do optymalizacji procesu i minimalizacji błędów. Integracja tych elementów w procesie produkcji odlewów jest niezbędna dla spełnienia rosnących wymagań rynku oraz zapewnienia konkurencyjności [129].

Rafinacja metalu to kluczowy proces w przemyśle metalurgicznym, który ma na celu poprawę jakości metalu. Jedną z popularnych metod jest rafinacja barbotażowa. Badania Bhaskara i wsp. [115] oraz Gyarmatiego i wsp. [127] wskazują, że najważniejsze parametry tego procesu to wielkość przepływu gazu (argon lub azot), geometria rotora oraz temperatura kąpieli. Zbyt mały przepływ gazu powoduje słaby kontakt z ciekłym metalem, co obniża skuteczność usuwania wodoru i zanieczyszczeń. Natomiast zbyt duży przepływ prowadzi do rozpryskiwania metalu i nadmiernych strat ciepła. Bhaskar i wsp. [115], analizując proces odgazowywania aluminium i jego stopów, podkreślają, że optymalizacja takich parametrów jak prędkość obrotowa mieszadła, temperatura oraz rodzaj gazu są kluczowe. Z badań wynika, że większa prędkość mieszadła skutkuje lepszym usuwaniem wodoru, ale też większymi stratami ciepła, co wydłuża proces. Wyższa temperatura z kolei przyspiesza rozpuszczanie gazu, skracając czas rafinacji, ale zwiększa ryzyko utleniania metalu. W sytuacjach, gdy stosowany jest większy udział złomu, optymalizacja temperatury i prędkości obrotowej mieszadła stają się kluczowe dla skrócenia czasu rafinacji.

Gyarmati i wsp. [127] wskazali, że zawartość złomu wpływa na skład chemiczny stopu, co może zmieniać wymagania dotyczące parametrów rafinacji, takich jak temperatura

i intensywność przepływu gazu. Większa ilość złomu wymaga modyfikacji standardowych parametrów, aby zapewnić pożądane własności mechaniczne odlewów. Czas barbotażu zaproponowany przez autorów wynosił od 5 do 15 minut, a w przypadku Bhaskara i wsp. [115] 12 minut, przy przepływie gazu w zakresie 6-20 L/min. Przeprowadzone badania obejmowały tomografię wlewków i analizę mikroskopową, nie uwzględniono jednak wpływu zawartości złomu, a skupiono się na skutkach dodatku żużli. Shabestari i wsp. [126] badali wpływ parametrów procesu rafinacji rotacyjnej aluminium. Wykazano, że prędkość mieszadła i ciśnienie gazu mają duże znaczenie dla efektywności odgazowywania. Zwiększenie prędkości mieszadła i zmniejszenie ciśnienia gazu poprawiają usuwanie gazów, co skraca czas rafinacji. Przy prędkości mieszadła wynoszącej 450 obr./min efektywność procesu wzrasta. Większa zawartość złomu zwiększa ilość zanieczyszczeń i wodoru w kąpeli, co wymaga dłuższego czasu rafinacji lub bardziej intensywnych parametrów, np. większego przepływu gazu. Shabestari i wsp. [126] udowodnili, że wyższa zawartość złomu wymaga nie tylko zmian parametrów, ale również dodatkowych cykli rafinacji lub metod, jak flotacja. Optymalny czas rafinacji zależy od wielu czynników, jak rodzaj gazu, przepływ i temperatura stopu. Efektywność odgazowywania maleje, gdy temperatura wzrasta z 755 °C do 780 °C, ponieważ ze wzrostem temperatury zwiększa się absorpcja wodoru. Wydłużenie czasu rafinacji może poprawić jakość odlewów, ale tylko do pewnego momentu – zbyt długi proces prowadzi do negatywnych skutków, takich jak segregacja składników czy utlenianie powierzchniowe. Czas trwania rafinacji jest kluczowym parametrem, który wpływa na jakość uzyskanego stopu, efektywność usuwania zanieczyszczeń oraz koszty procesu. Zbyt krótki czas rafinacji skutkuje niedostatecznym usunięciem gazów i wtrąceń, co pogarsza jakość stopu, zwiększając ryzyko wystąpienia wad w produkowanych komponentach, co w konsekwencji prowadzi do mniejszej efektywności procesu, a więc i zwiększonej liczby odrzutów i konieczności powtórnej rafinacji, a tym samym przekłada się na zwiększenie kosztów. Z kolei zbyt długi czas rafinacji zwiększa zużycie gazu rafinacyjnego, co również podnosi koszty operacyjne. Nadmierne mieszanie i przedłużone działanie wysokiej temperatury mogą prowadzić do niekorzystnych zmian mikrostrukturalnych, takich jak segregacja składników, a dłuższy kontakt stopu z powietrzem może powodować zwiększone utlenianie powierzchniowe i straty materiałowe. Zawartość złomu obiegowego we wsadzie ma istotny wpływ na parametry procesu rafinacji i końcową jakość stopu. Wysoka zawartość złomu obiegowego może zawierać więcej zanieczyszczeń, tlenków i wtrąceń, co zwiększa wymagania odnośnie rafinacji i może prowadzić do trudności w osiągnięciu odpowiedniej czystości stopu. Co

szczególnie istotne, w warunkach przemysłowych, złom może pochodzić z różnych źródeł, dlatego może mieć zróżnicowany skład chemiczny, może zawierać tlenki i zanieczyszczenia, co utrudnia uzyskanie jednorodnego stopu i zwiększa wymagania dotyczące rafinacji [2, 3]. Ograniczenie zawartości złomu obiegowego wiąże się jednak z wyższymi kosztami materiałowymi, co negatywnie wpływa na rentowność produkcji. Dlatego istotne jest precyzyjne dobranie parametrów rafinacji barbotażowej, w tym czasu trwania procesu, aby zapewnić wysoką jakość odlewów ze stopów aluminium. Parametry te muszą być dostosowane do warunków, takich jak zawartość złomu we wsadzie, aby usunąć dodatkowe zanieczyszczenia bez niepotrzebnego wydłużania procesu, które mogłoby przynieść negatywne skutki [6]. Żelazo w stopach aluminium jest traktowane jako zanieczyszczenie, które może powodować tworzenie się niepożądanych faz, takich jak faza β -Fe (Al_5FeSi). Zmiany w składzie chemicznym i mikrostrukturze wynikające z podwyższonej zawartości żelaza oraz wielokrotnego przetapiania wpływają na proces krystalizacji. Większa zawartość żelaza oraz częste przetapianie mogą przyspieszać powstawanie niepożądanych faz, co zmienia kinetykę krystalizacji i skutkuje mikrostrukturą o gorszych właściwościach mechanicznych. Badania pokazują, że kontrola zawartości żelaza oraz liczby przetopień jest kluczowa dla utrzymania odpowiednich właściwości stopu AlSi9Cu3 . Wielokrotne przetapianie i wyższy poziom żelaza mogą obniżać jakość stopu, co wymaga wprowadzenia odpowiednich strategii kontrolnych w procesach produkcyjnych i recyklingowych. Niezbędne jest stosowanie odpowiednich żużli oraz metod rafinacji, aby zredukować tego typu zanieczyszczenia [72].

Badania przeprowadzone przez Orłowicza i wsp. [124] nad wpływem rafinacji na porowatość stopów Al-Si odlewanych pod wysokim ciśnieniem wskazują na związek między jakością procesu rafinacji a porowatością odlewów ciśnieniowych ze stopów aluminium. Analiza ta obejmowała szczegółową ocenę czasu trwania procesu rafinacji barbotażowej dla stopu AlSi12 oraz jego wpływu na porowatość, twardość i mikrostrukturę. Wyniki badań pokazały, że odpowiednio dobrany czas rafinacji, ustalony na 12 minut, zoptymalizowany przepływ gazu i zawartość złomu są kluczowe dla minimalizacji porowatości. Wskazano również, że wyższa zawartość złomu we wsadzie może wydłużyć czas trwania procesu rafinacji, głównie z powodu większej ilości zanieczyszczeń i gazów, takich jak tlenki i wodór, które wymagają dłuższego czasu na usunięcie. Autorzy sugerowali dalsze badania nad optymalizacją tego procesu, aby w pełni wykorzystać jego potencjał w przemyśle odlewniczym.

W literaturze istnieje wiele badań dotyczących recyklingu złomu aluminium, jednak brak jest szczegółowych danych na temat maksymalnych ilości złomu obiegowego, które można dodać do wsadu, aby zachować optymalne własności mechaniczne i chemiczne odlewów. Prowadzone w ramach doktoratu badania dostarczają nowych informacji na temat tego aspektu, co może znacząco wpłynąć na praktyczne zastosowanie recyklingu w przemyśle. Ponadto, pomimo że proces rafinacji barbotażowej jest szeroko badany, brakuje prac, które szczegółowo uwzględniają optymalny czas rafinacji w kontekście zarówno jakościowym, jak i ekonomicznym. Badania realizowane w ramach doktoratu prowadzono we współpracy z Odlewnią Ciśnieniową Metal - Zel, wykonano wiele prób, co w konsekwencji pozwoliło na optymalizację czasu rafinacji barbotażowej w rzeczywistych warunkach przemysłowych. W literaturze niewiele jest badań dotyczących wpływu dodatku miedzi na proces rafinacji barbotażowej oraz na końcowe własności odlewów, dlatego prowadzone w ramach doktoratu badania wnoszą nową wiedzę na temat tego, jak miedź wpływa na efektywność rafinacji i jakość stopu.

W pracy zastosowano szereg technik badawczych, jak mikroskopię świetlną, skaningową, mikroskopię elektronową wraz z analizą składu chemicznego EDS, badania twardości, jednoosiową próbę ściskania. Przeprowadzono również badania z wykorzystaniem tomografii komputerowej zarówno na odlewach wykonanych metodą odlewania ciśnieniowego, jak i na wlewkach, co pozwoliło na określenie rozkładu porowatości w oparciu o kształt, grubość części badanych odlewów, co jest ważną informacją dla projektantów odlewów, którzy muszą uwzględniać tę tendencję w procesie produkcji. Ponadto wykonano analizę statystyczną wydzielen obecnych w stopach w zależności od czasu rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego.

Zrozumienie, jak różne poziomy zawartości złomu recyklingowego wpływają na efektywność rafinacji i mikrostrukturę stopu, pozwoli na lepsze dostosowanie procesu do rzeczywistych warunków produkcyjnych. Dzięki istniejącym badaniom, można zauważyć, że optymalizacja procesu rafinacji barbotażowej, uwzględniając zarówno czas rafinacji, jak i zawartość złomu recyklingowego, może znacząco poprawić własności mechaniczne i mikrostrukturalne stopów aluminium. Czas trwania procesu jest kluczowym czynnikiem wpływającym na skuteczność rafinacji gazowej. Wzrost standardów jakości i bezpieczeństwa w przemyśle metalurgicznym wymaga ciągłego doskonalenia procesów produkcyjnych. Badania nad procesem rafinacji barbotażowej pomagają w spełnieniu rygorystycznych norm jakościowych oraz zapewnieniu, że produkty są zgodne z międzynarodowymi standardami [145].

2. CEL I TEZA PRACY

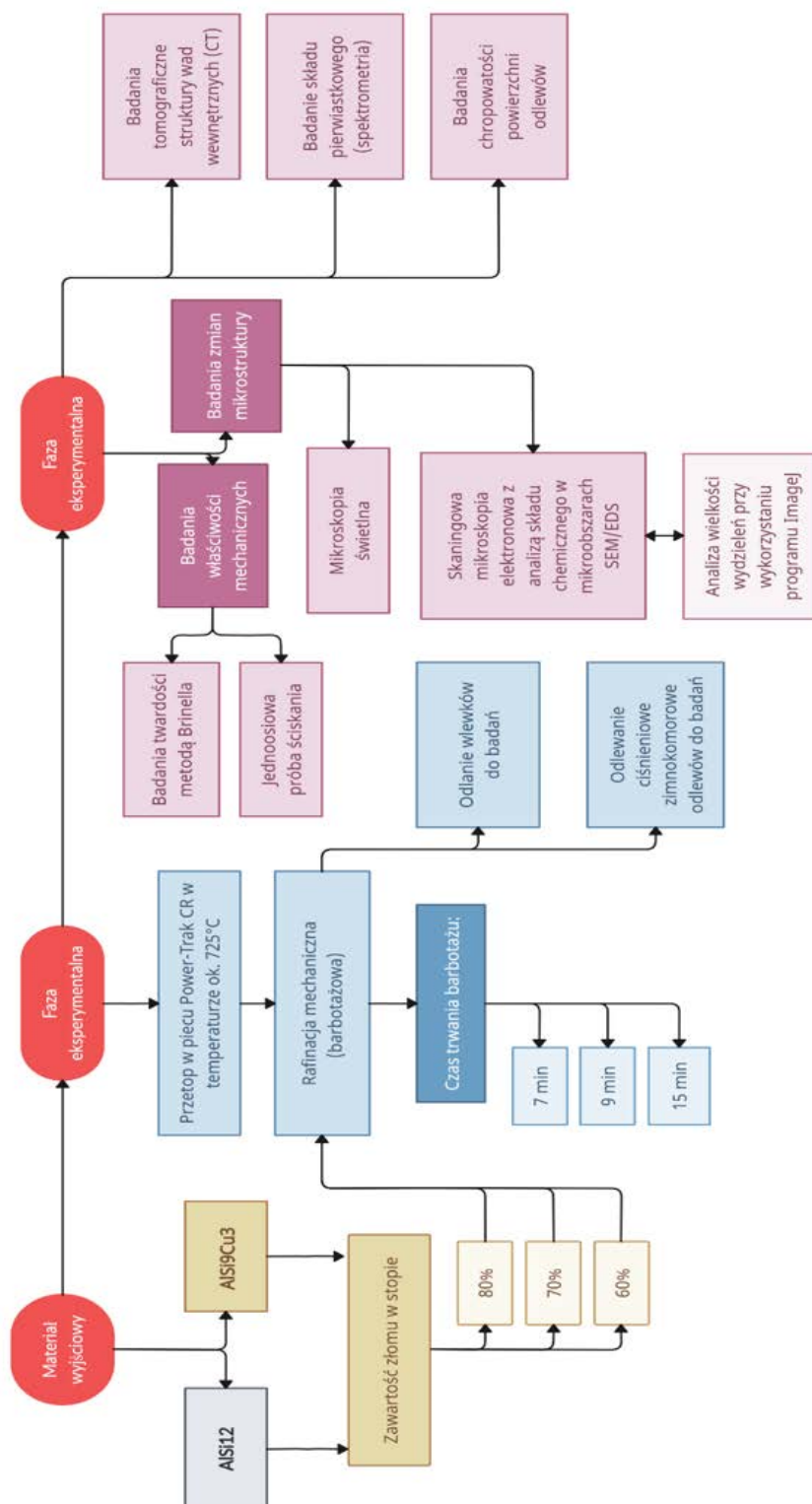
Postawiona teza, zakłada że poprzez odpowiedni dobór zawartości złomu poprocesowego, istnieje możliwość wytworzenia wysokiej jakości odlewów wysokociśnieniowych zimnokomorowych charakteryzujących się odpowiednimi własnościami mechanicznymi oraz niskim stopniem zagazowania. Jednocześnie możliwe jest skrócenie czasu rafinacji barbotażowej.

W pracy przyjęto następujące cele eksperymentalne:

- Określenie maksymalnej zawartości złomu obiegowego, która umożliwi uzyskanie odlewów (detali) charakteryzujących się dobrymi własnościami mechanicznymi oraz niską porowatością przy jednoczesnym zapewnieniu zgodności składu chemicznego z normą oraz niskiego poziomu zanieczyszczeń;
- Określenie optymalnego czasu rafinacji barbotażowej uwzględniającego zarówno aspekty jakościowe, jak i ekonomiczne;
- Określenie wpływu dodatku miedzi na przebieg procesu rafinacji barbotażowej i późniejsze własności odlewów.

Przeprowadzone badania przyczynią się do optymalizacji procesu produkcyjnego wybranych odlewów ciśnieniowych zimnokomorowych, w szczególności do poprawy ich jakości oraz eliminacji wad na poszczególnych etapach operacji technologicznych.

Dla zrealizowania przyjętych celów przeprowadzono badania doświadczalne, których schematyczny przebieg przedstawiono na rysunku 2.1



Rys. 2.1. Plan badań

3. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

W rozdziale tym zamieszczono informacje dotyczące stosowanych materiałów, procesu wytwarzania oraz przeprowadzonych badań. Badania prowadzono częściowo w warunkach przemysłowych w Odlewni Ciśnieniowej META-ZEL Sp. z o.o. oraz na Wydziale Metali Nieżelaznych AGH.

3.1. Materiały do badań

Materiał wsadowy stanowiły dwa stopy aluminium EN AN 44200 oraz EN AN 46000. W celu weryfikacji składu chemicznego stopów, wykonano także badania przy zastosowaniu optycznego spektrometru emisyjnego Thermo Fisher (ARL)-3460.

Skład chemiczny czystych gąsek przed przetopem był zgodny z normą: PN-EN 1706 +A1:2022-01. Wyniki badania składu chemicznego stopów zestawiono w tabelach 3.1 i 3.2.

Tabela 3.1 Wyniki badań składu chemicznego wlewków wykonanych ze stopu AlSi12, niepoddanych rafinacji barbotażowej

Tabela 3.2 Wyniki badań składu chemicznego wlewków wykonanych ze stopu AlSi9Cu3, niepoddanych rafinacji barbotażowej

Zawartość złomu w składzie stopu	Zawartość procentowa złomu w składzie odlewu wykonanego ze stopu AlSi12			
Pierwiastek, % mas.	100	80	70	60
Al	87,63	88,08	87,97	88,14
Si	10,20	11,10	11,30	11,10
Fe	0,74	0,45	0,33	0,42
Cu	0,13	0,10	0,07	0,08
Mn	0,04	0,02	0,02	0,02
Mg	0,50	0,02	0,03	0,02
Zn	0,13	0,08	0,07	0,06
Cr	0,07	0,06	0,01	0,03
Reszta	0,56	0,09	0,2	0,13

Zawartość złomu w składzie stopu	Zawartość procentowa złomu w składzie odlewu wykonanego ze stopu AlSiCu3			
Pierwiastek, % mas.	100	80	70	60
Al	86,29	82,61	85,65	85,49
Si	8,79	10,10	9,23	9,50
Fe	1,07	1,44	1,31	0,98
Cu	1,95	2,59	2,30	2,49
Mn	0,24	0,17	0,22	0,16
Mg	0,37	0,59	0,29	0,33
Zn	0,84	1,00	0,64	0,72
Cr	0,04	0,05	0,05	0,03
Reszta	0,41	1,38	0,29	0,29

Materiał wsadowy składał się z różnych proporcji czystych gąsek i złomu. Zawartość złomu wykorzystanego do produkcji odlewów wynosiła odpowiednio: 80%, 70% i 60%. Założono, że czas trwania procesu rafinacji, zawartość złomu obiegowego w składzie wsadu odlewniczego oraz skład chemiczny stopu mają istotny wpływ na jakość finalną detali wykonywanych z badanych stopów.

3.2. Proces rafinacji barbotażowej

Badane stopy poddano procesowi rafinacji barbotażowej. Przyjęto następujące czasy rafinacji: 0, 7, 9 i 15 minut. W pierwszej kolejności przetopiono badane stopy w piecu do topienia Power-Trak CR firmy Inductotherm Europe, w temperaturze ok. 725°C. Metal ładowano ostrożnie w małych partiach, aby zapobiec tworzeniu się nawisów niestopionego metalu. Wytop poddany był kolejno rafinacji za pomocą urządzenia FDU Mini Degasser w celu odgazowania, oczyszczenia i rozdrobnienia ziarna. Aby to zrealizować, do ciekłego metalu wprowadzany był zestaw złożony z trzonu i wirnika, który następnie wprowadzany jest w ruch obrotowy. Jednocześnie przez kanał gazowy znajdujący się w trzpieniu wdmuchiwany był argon. Zanurzony w metalu wirnik pracuje na zasadzie mieszadła obracającego się wokół osi pionowej. Prędkość wirnika wynosi 500 obrotów na minutę, przy przepływie argonu wynoszącym 20 litrów na minutę. Na 3.1 przedstawiono zdjęcie procesu rafinacji barbotażowej.



Rys. 3.1 Proces rafinacji barbotażowej

3.3. Proces odlewania ciśnieniowego

Po przetopieniu metalu usunięto pływające po powierzchni zgary i tlenki. Po czym metal transportowany był do pieców stanowiskowych, znajdujących się przy maszynach odlewniczych. Przed ich wypełnieniem usuwane są po raz kolejny zanieczyszczenia z powierzchni metalu. Odlewy wykonywano w procesie odlewania ciśnieniowego zimno komorowego, gdzie wtrysk metalu odbywa się przy użyciu pompy łopatkowej R5 RA 0063. Kolejno po transporcie do komory stop jest wtryskiwany do formy, gdzie zastyga. Następnie dochodzi do jego usunięcia dzięki systemowi wypychaczy, a powierzchnia formy spryskiwana jest smarem ochronnym w oczekiwaniu na kolejne wypełnienie. Etap ten powtarzany był wielokrotnie dla stopu AlSi12 oraz stopu AlSi9Cu3, w celu uzyskania próbek różniących się czasem przeprowadzanej rafinacji oraz zawartością złomu obiegowego we wsadzie. Czas rafinacji wynosił: 0, 7, 9 i 15 min. Ze stopu AlSi12 w procesie odlewania ciśnieniowego odlewano komory maszynki do mielenia, natomiast stop AlSi9Cu3 przeznaczono do odlewów pokrywy kasety do systemu rolet. Na rysunkach 3.2 i 3.3 przedstawiono odpowiednio zdjęcie komory maszynki do mielenia oraz pokrywy kasety do systemu rolet.



Rys. 3.2 Komora maszynki do mielenia wytworzona w procesie odlewania ciśnieniowego stopu AlSi12



Rys. 3.3 Pokrywa kasety do systemu rolet wytworzona w procesie odlewania ciśnieniowego stopu AlSi9Cu3

Układ wlewowy obu odlewów został następnie usunięty na prasach, po czym poddano je obróbce powierzchniowej w procesie kulowania.

3.4. Określenie stopnia zagazowania stopów

Stopień zgazowania próbek określano za pomocą wagi MK 3000. W tym celu pobierano próbki z kąpieli metalowej wlewając je do stalowego tygla i chłodząc na powietrzu oraz w warunkach obniżonego ciśnienia atmosferycznego. Wymiary tygla były następujące: wysokość – około 4 cm, średnica podstawy – 2,6 cm; średnica góry - 2,8 cm. Objętość pojedynczej próbki wynosiła około 39 cm³. Na rysunku 3.4 przedstawiono przykładowe zdjęcie wlewka.



Rys. 1.4 Poglądowe zdjęcie przedstawiające przykładowy wlewk wykorzystany do badań

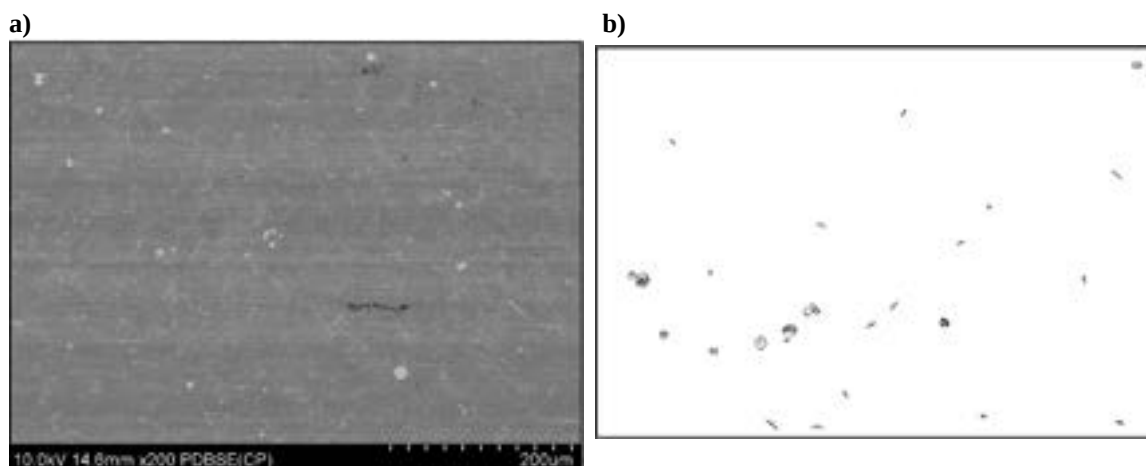
3.5. Badania mikrostruktury próbek

Badania mikrostruktury próbek przeprowadzono przy zastosowaniu mikroskopu świetlnego OLYMPUS GX51 oraz skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI SU 70 wyposażonego w działo elektronowe z termiczną emisją polową – emiter Schottky’ego (FESEM) oraz detektor EDS (Energy X-ray Dispersive) z oprogramowaniem analitycznym Thermo NORAN System 7 (NSS). Wyniki badania składu chemicznego w mikroobszarach przedstawiono w postaci map rozkładu pierwiastków w mikroobszarach.

Zgłady metalograficzne do obserwacji mikroskopowych wykonano szlifując próbki przy użyciu automatycznej szlifierki – polerki TegraPol firmy STRUERS na papierach ściernych o gradacji 220 – 4000, a następnie polerując zgodnie z procedurą firmy STRUERS przy zastosowaniu zawiesiny pasty diamentowej Dia Duo o wielkości ziarna 3 μm oraz koloidalnej zawiesiny tlenku krzemu OPS do polerowania wykańczającego o wielkości ziarna 0,25 μm . Przed wykonaniem zgładów metalograficznych, próbki zainkludowano w żywicy przewodzącej PolyFast.

3.5.1 Analiza ilościowa obrazu

Wyniki badań mikrostrukturalnych uzupełniono o metody ilościowe. W tym celu wykorzystano darmowe oprogramowanie Image J. Określono pole powierzchni przekroju wydzieleni obecnych w badanych materiałach oraz sumaryczne pole powierzchni zajmowanej przez poszczególne wydzielения obecne w stopie w zależności od czasu rafinacji. Aby zminimalizować błąd, odrzucono wyniki dla wszystkich wydzieleni o polu powierzchni mniejszym niż 5 μm^2 . Analizę ilościową wykonano na podstawie zdjęć mikrostruktury wykonanych przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego. Przykłady zdjęć wykorzystanych do analizy ilościowej oraz wykonanych na ich podstawie obrazów binarnych przedstawiono na rysunku 3.5.



Rys. 3.5 Mikrostruktura odlewu wykonanego ze stopu AlSi12, rafinowanego przez 15 min. i o zawartości złomu wynoszącej 70%: a) obraz SEM, b) zdjęcie binarne - wydzielenia fazy bogatej w Fe zaznaczono kolorem czarnym

3.6 Badania z zastosowaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej

W celu zbadania struktury rozkładu porów wewnątrz wlewków oraz odlewów użyto tomografu YXLON Y.MU2000-D. Pozwoliło to na wygenerowanie modeli 3D. Badania rentgenowskie przeprowadzono z parametrami natężenia prądu 15 mA, a napięcie lampy emisyjnej wyniosło 120 kV. Czas pomiaru wyniósł ok. 5 min dla każdego badanego obiektu przy wymiarze pojedynczego voxela 0,4 mm przy wielkości aktywnej detektora wynoszącej 200 mm × 200 mm i odległości lampa-detektor, przyjętej na potrzeby pomiarów, wynoszącej 795 mm. Badania przeprowadzono poprzez umieszczenie obiektu w komorze tomografu YXLON Y.MU2000-D na platformie pozwalającej na przesuwanie odlewu względem lampy emisyjnej RTG i detektora promieniowania, jak i obracania względem własnej osi. Następnie lampą generowane było promieniowanie, które częściowo zaabsorbowane zostało przez próbkę, promieniowanie to zostało przeanalizowane przez detektor i przetworzone na cyfrowy obraz. W takim stanie rejestrowania próbka była obracana poprzez obrót platformy, na której się znajduje, przy czym każdemu etapowi obrotu towarzyszy zapis jednej projekcji, co pozwoliło na wygenerowanie modeli 3D zawartych w pracy.

3.7 Badania własności mechanicznych

Jednym z etapów badań była ocena własności mechanicznych badanych odlewów. Własności te zostały wyznaczone poprzez pomiar twardości metodą Brinella oraz określenie wytrzymałości na ściskanie w próbie ściskania.

3.7.1 Jednoosiowa próba ściskania

Statyczna próba jednoosiowego ściskania została przeprowadzona w temperaturze otoczenia z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick Roell Z2020. W tym celu przygotowano dla każdego wariantu zestaw 4 próbek w kształcie walca i stosunku wysokości do średnicy próbki wynoszącym 1,5 zgodnie z normą ASTM E-9. Próba ściskania przeprowadzona została ze stałą prędkością posuwu narzędzia 0,7 mm/s i została przerwana po osiągnięciu trwałego odkształcenia na poziomie 45%.

3.7.2 Badania twardości metodą Brinella

Badania twardości przeprowadzono metodą Brinella, zgodnie z normą PN-EN ISO 6506-1. Zastosowano kulkę z węglików spiekanych o średnicy 2,5 mm, i obciążenie 31,25 kG. Czas pomiaru wynosił ok. 60 s. Dla każdej próbki wykonano po 6 pomiarów.

3.8 Badania chropowatości odlewów

Chropowatość odlewów przed i po procesie obróbki powierzchniowej w procesie kulowania (wybłyszczania powierzchni w celu uzyskania lepszej jakości powierzchni i podniesienia walorów estetycznych przy użyciu kulek stalowych o średnicy 2-3 mm) badano przy wykorzystaniu urządzenia MarSurf M 400, zgodnie z normami ISO 12085. Nacisk pomiarowy wynosił 0,75 mN, odcinek pomiarowy miał 5,6 mm, prędkość skanowania była równa 0,2 mm/s, a odległość pomiędzy pomiarami wynosiła 0,8 mm. Z uzyskanych wyników określono średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej oraz wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu (R_a i R_z).

4. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

Rozdział 4, przedstawiający wyniki badań, został podzielony na dwa podrozdziały. Podrozdział 4.1 poświęcono stopowi AlSi12, natomiast podrozdział 4.2 dotyczy stopu AlSi9Cu3. Dla każdego z tych stopów przeprowadzono badania opisane w rozdziale 3.

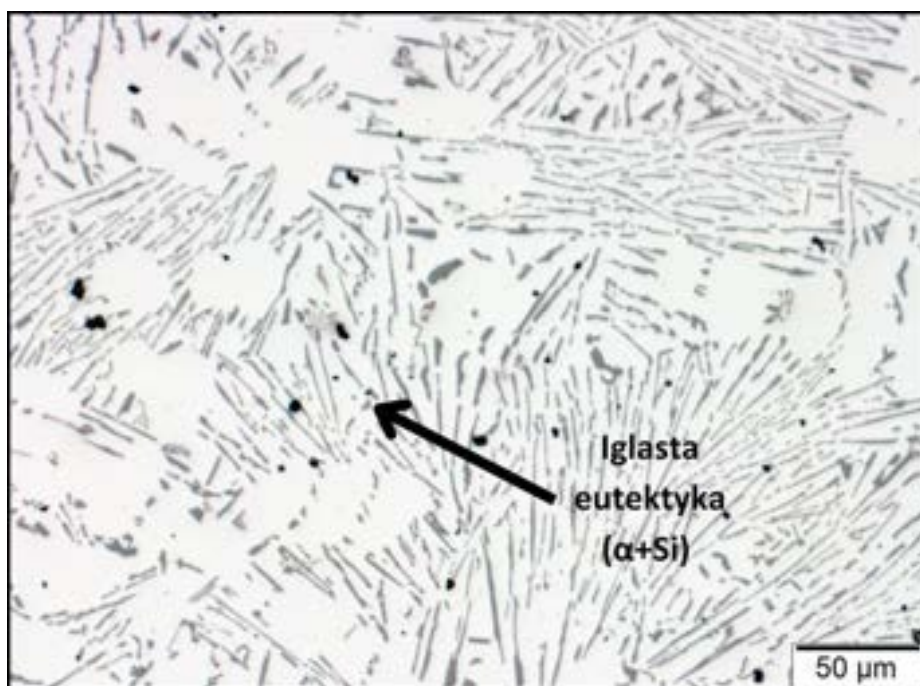
4.1. Wyniki badania wlewków i odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi12

W tym rozdziale zestawiono wyniki badań uzyskane dla wlewków i odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi12.

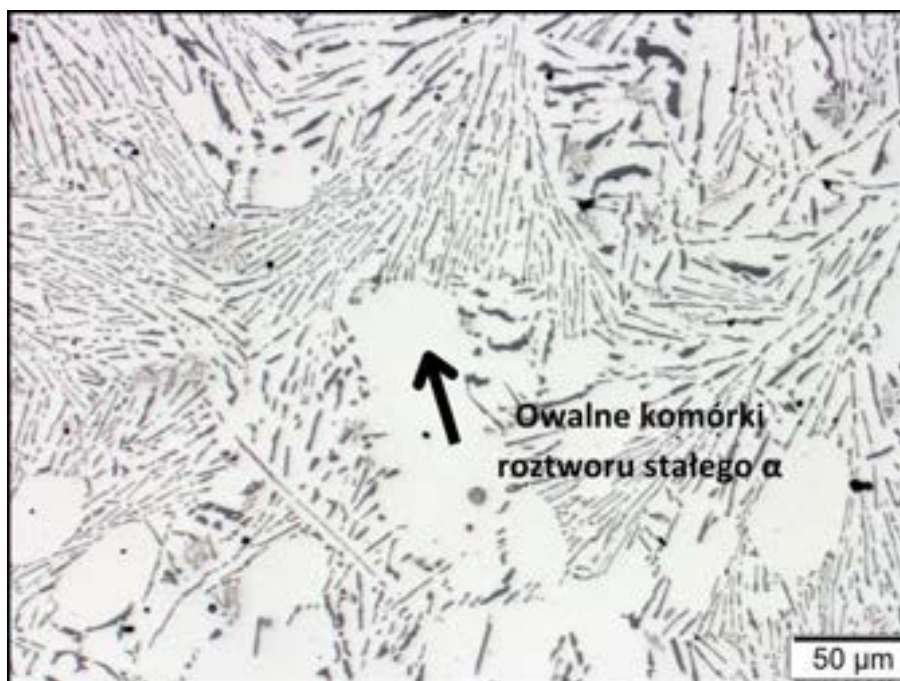
4.1.1. Wyniki badania mikrostruktury próbek

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań mikrostruktury stopu AlSi12. Ponadto przedstawiono wyniki mikroanalizy chemicznej EDS, które umożliwiły identyfikację faz obecnych w stopie. Aby dokładniej określić wpływ rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego na wielkość wydzielen w badanym stopie, badania zostały uzupełnione o analizę statystyczną faz obecnych w mikrostrukturze.

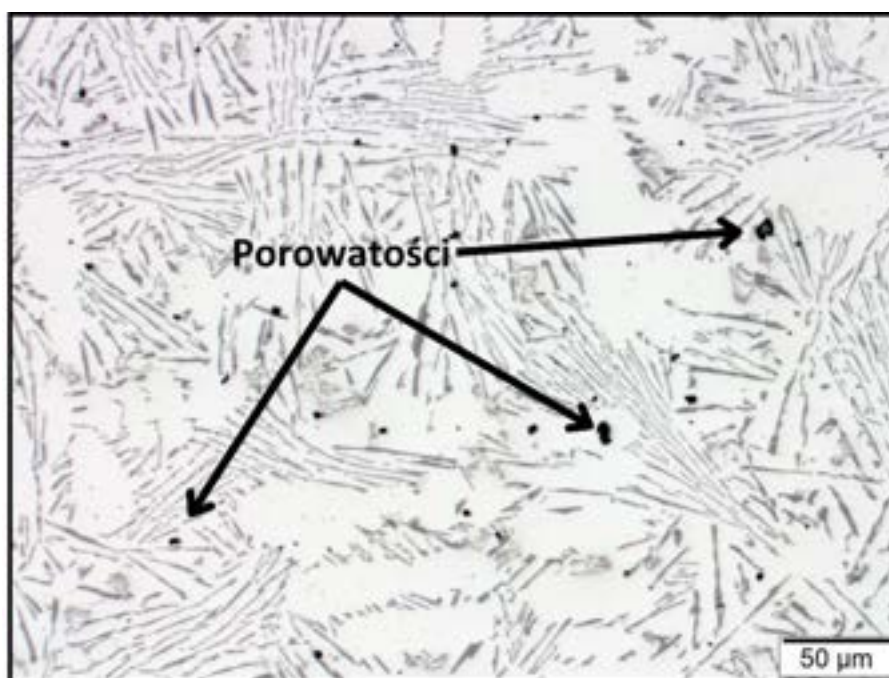
Na rysunkach 4.1-4.9 przedstawiono reprezentatywne zdjęcia mikrostruktury wlewków wykonane przy użyciu mikroskopu świetlnego, natomiast mikrostrukturę odlewów pokazano na rysunkach 4.10-4.18.



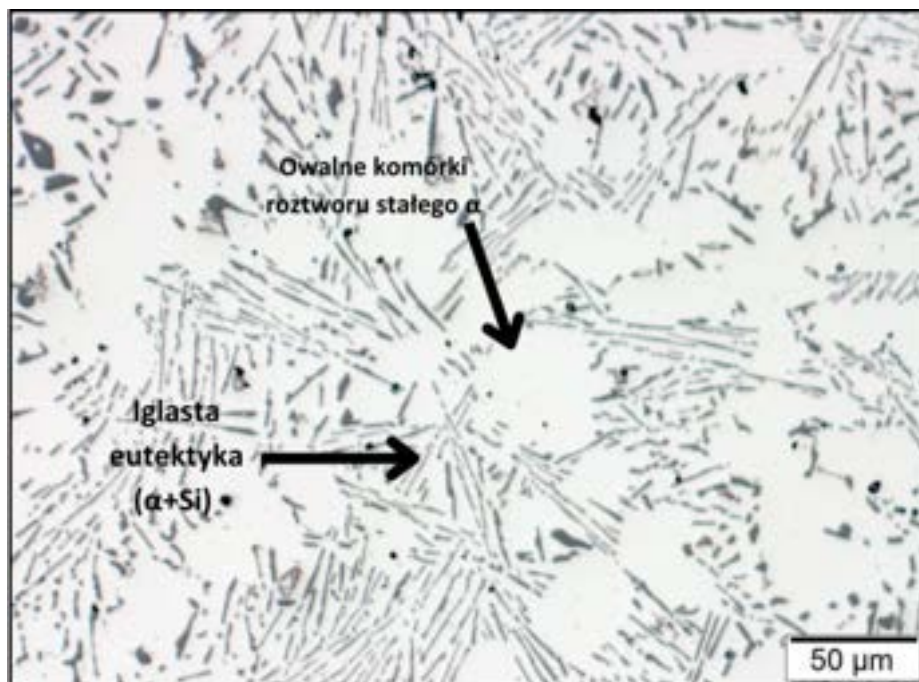
Rys. 4.1. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



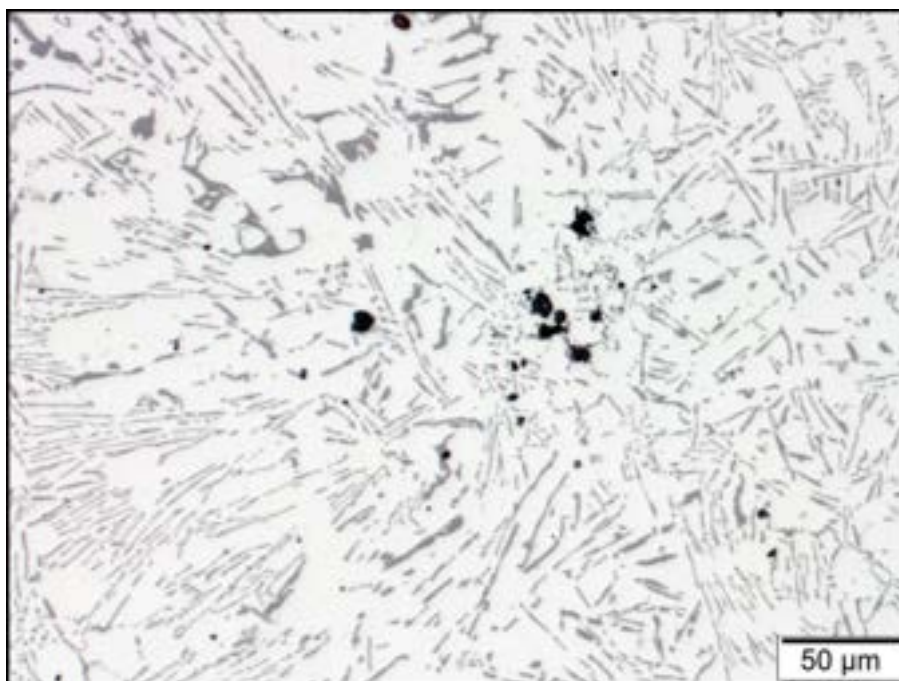
Rys. 4.2. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



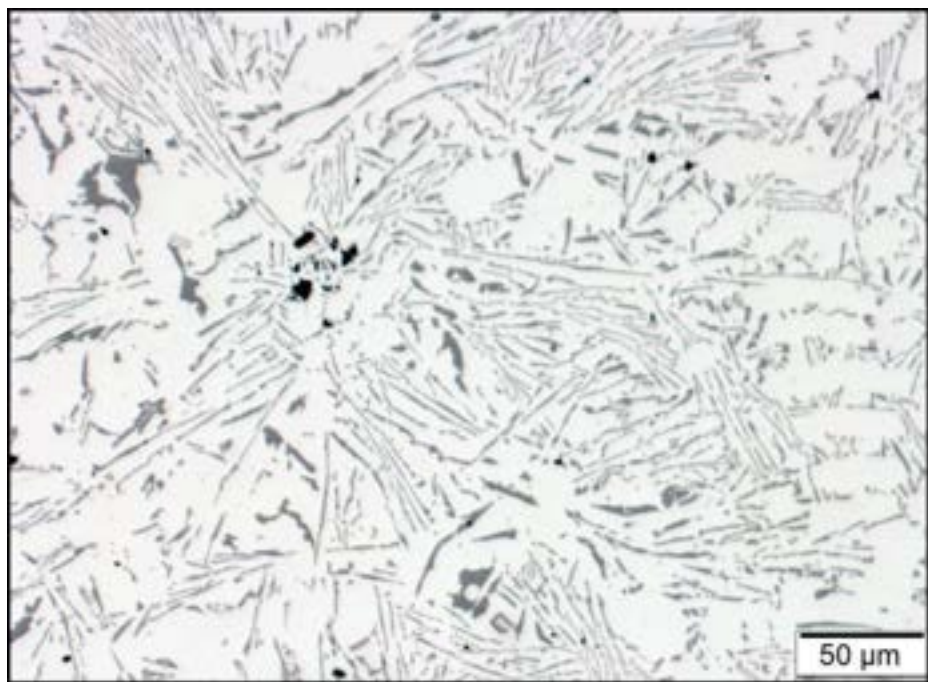
Rys. 4.3. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



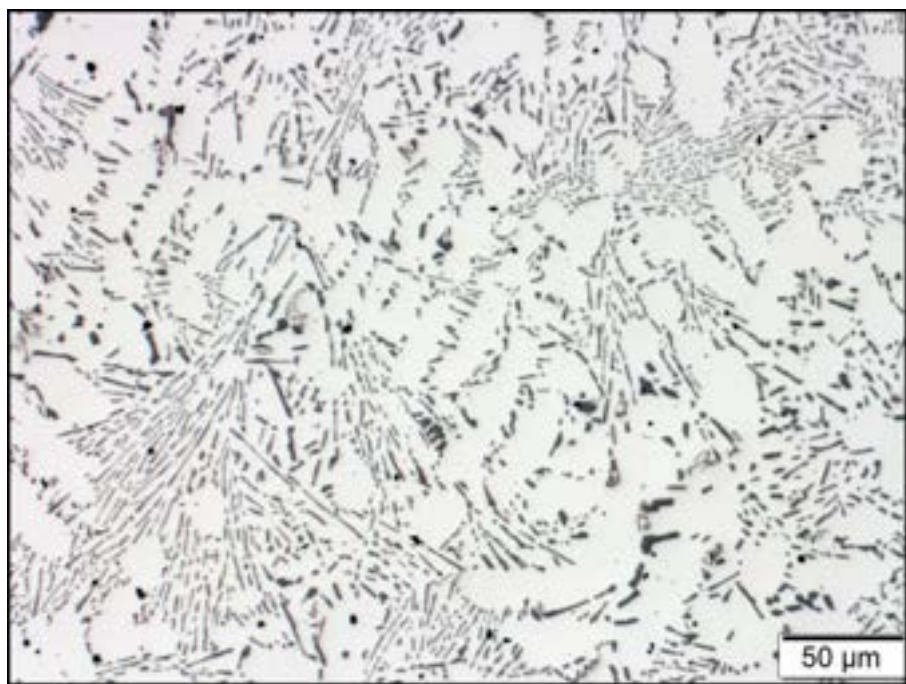
Rys. 4.4. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



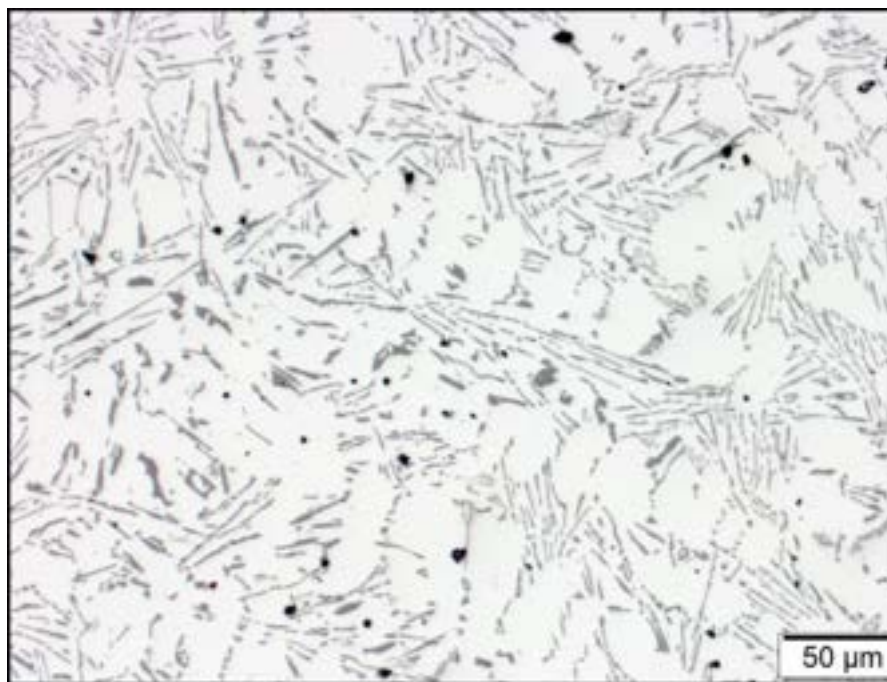
Rys. 4.5. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



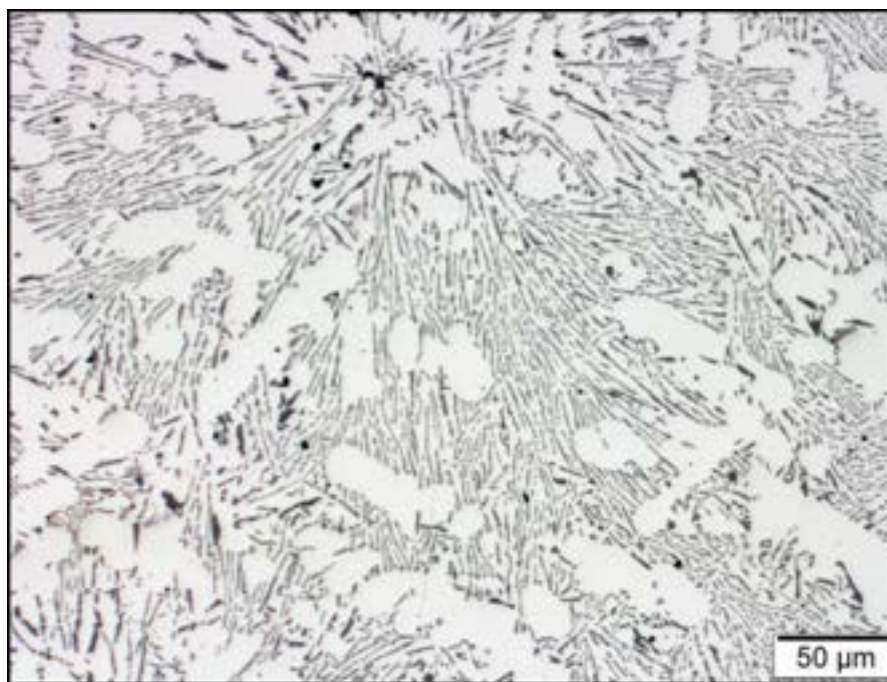
Rys. 4.6. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



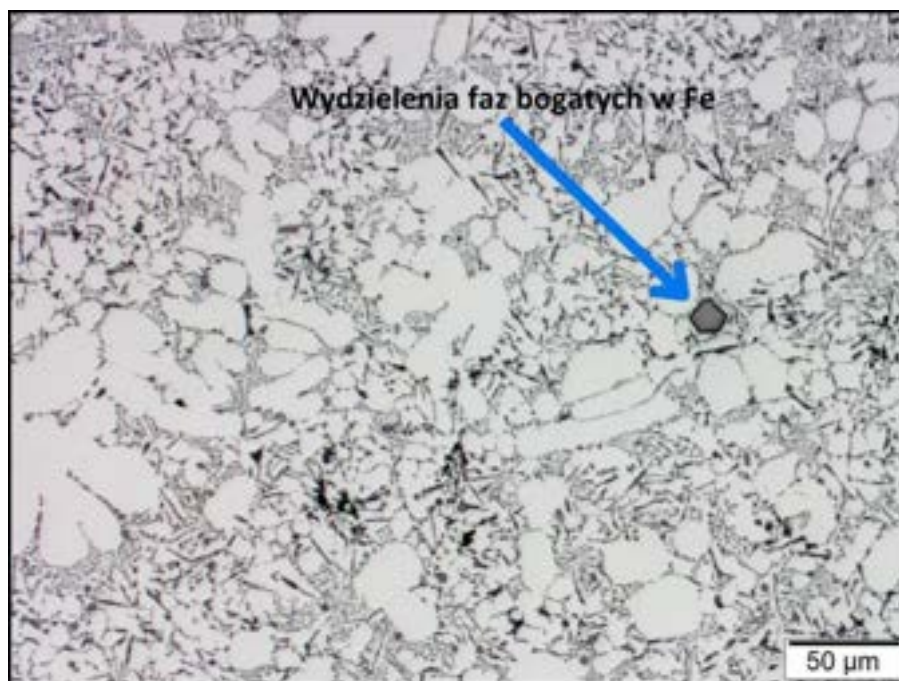
Rys. 4.7. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



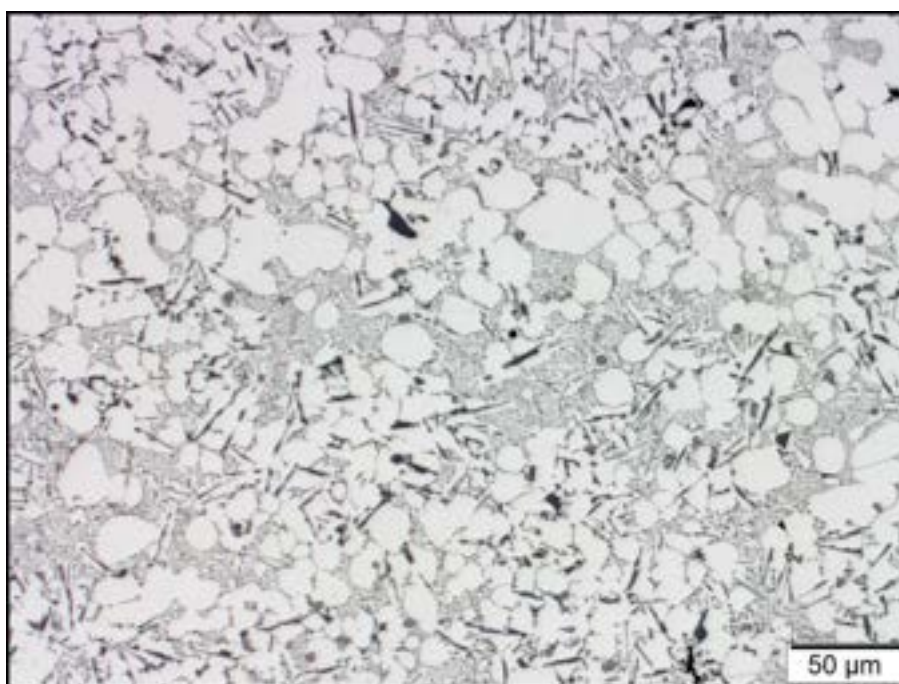
Rys. 4.8. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



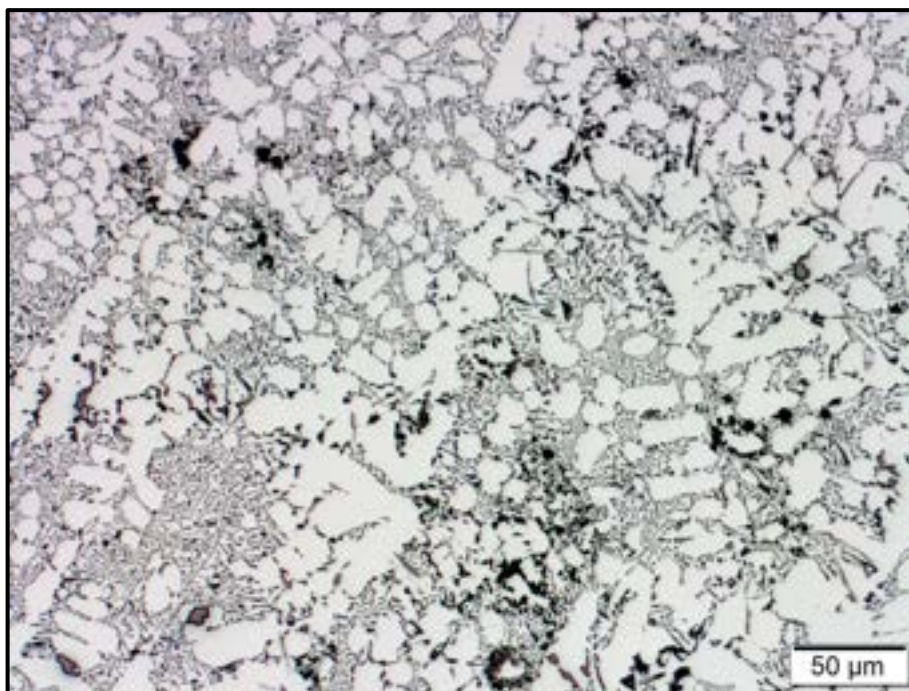
Rys. 4.9. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



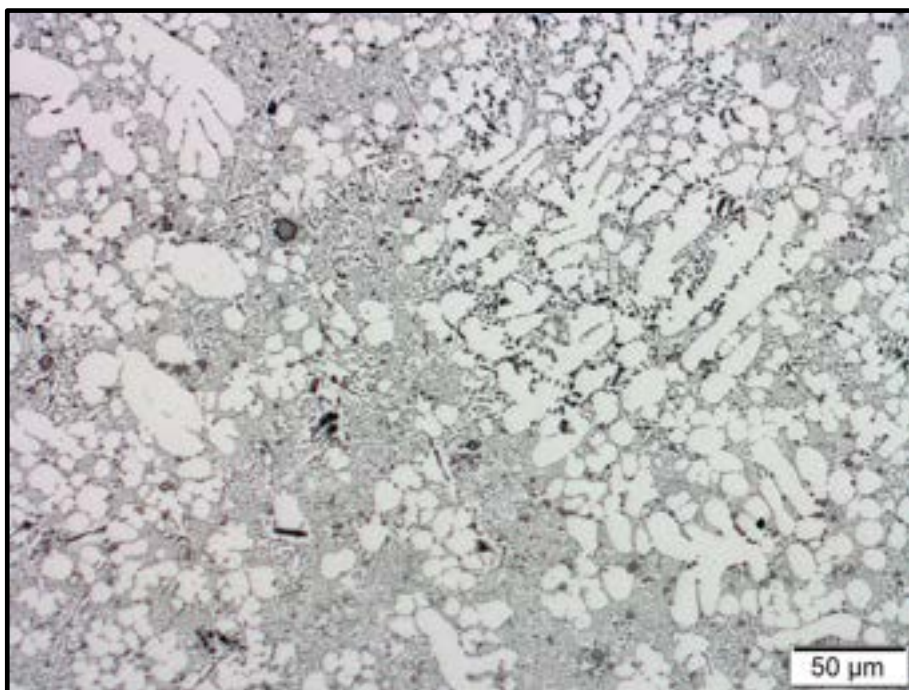
Rys. 4.10. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



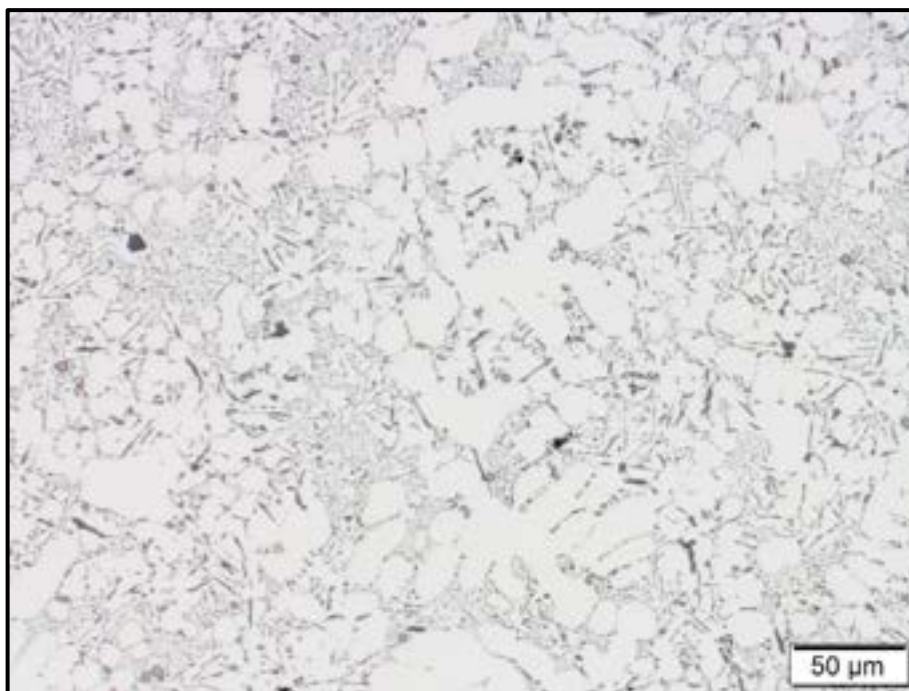
Rys. 4.11. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



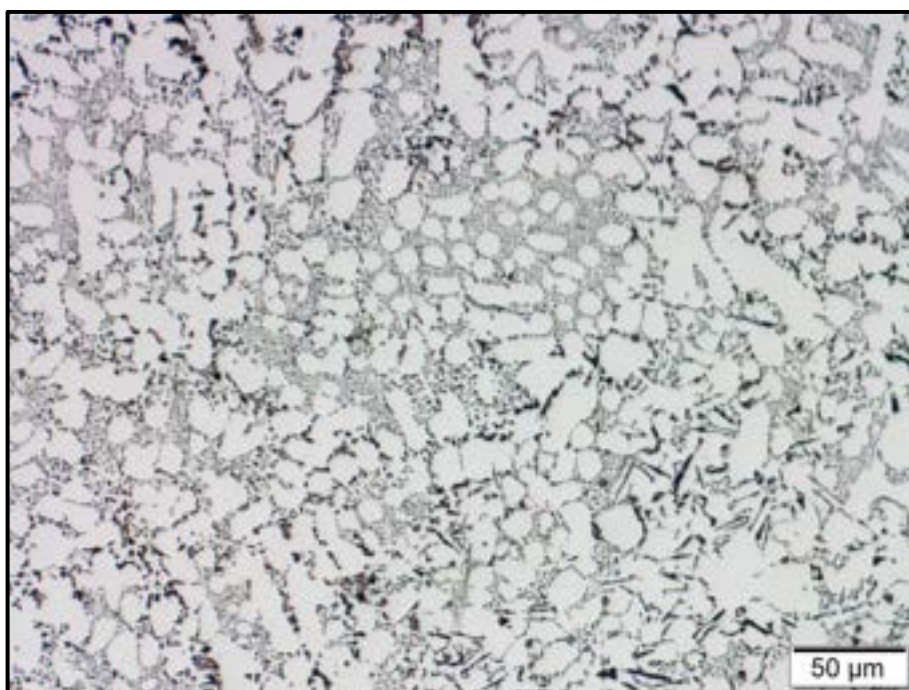
Rys. 4.12. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



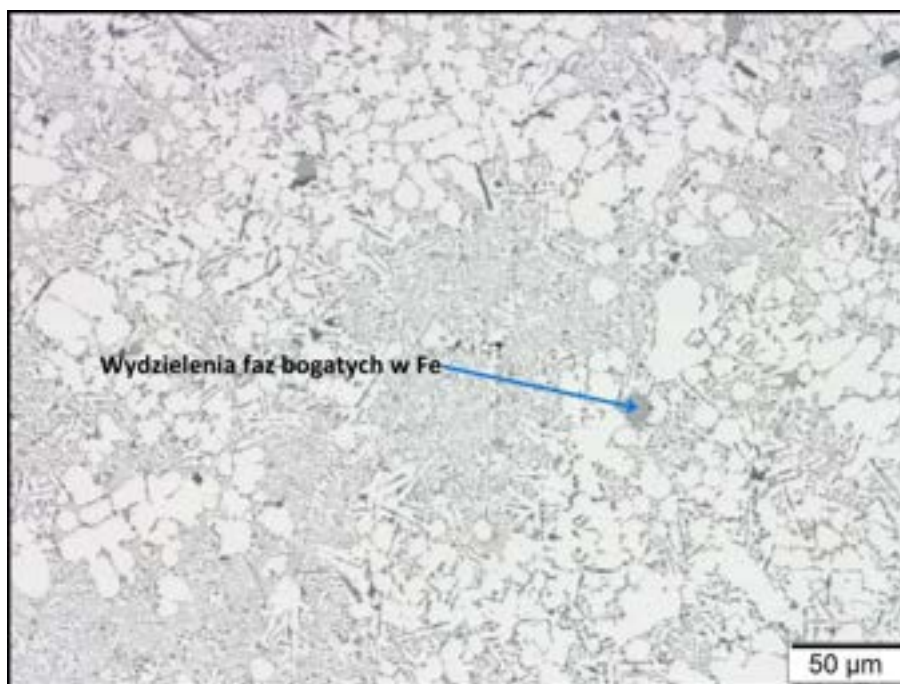
Rys. 4.13. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



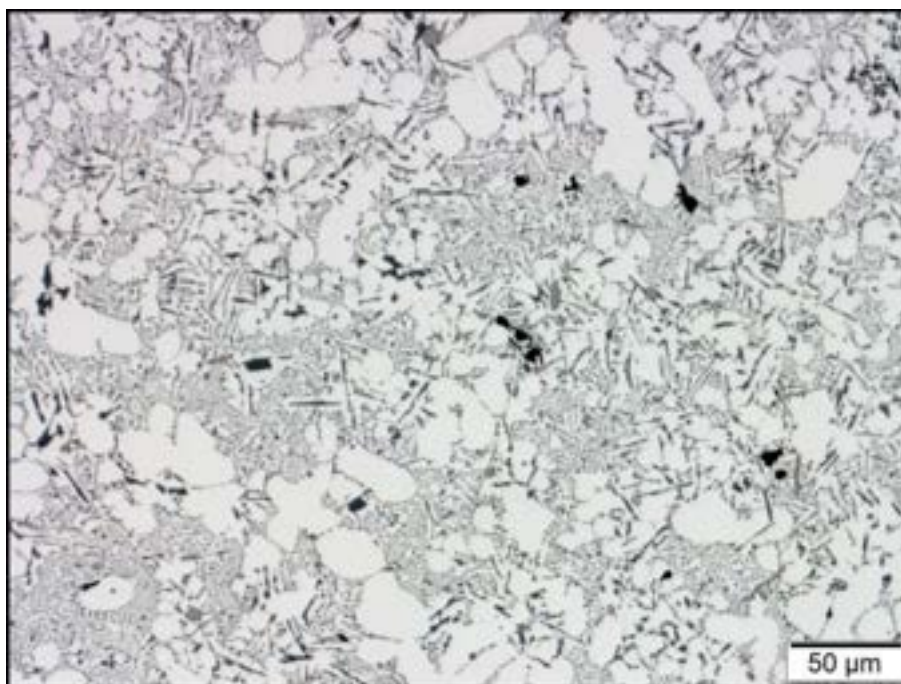
Rys. 4.14. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



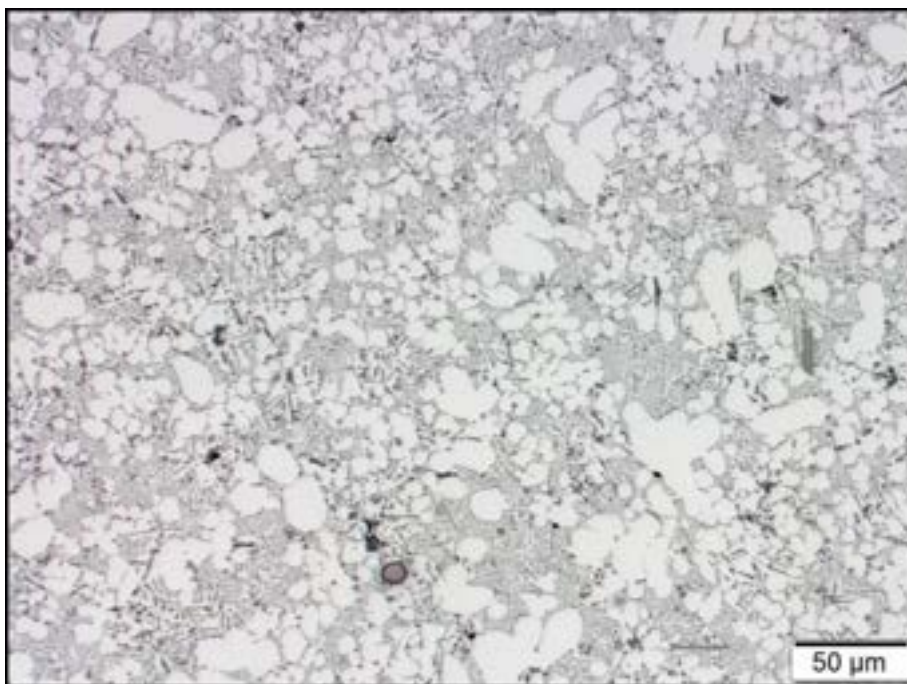
Rys. 4.15. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



Rys. 4.16. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



Rys. 4.17. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



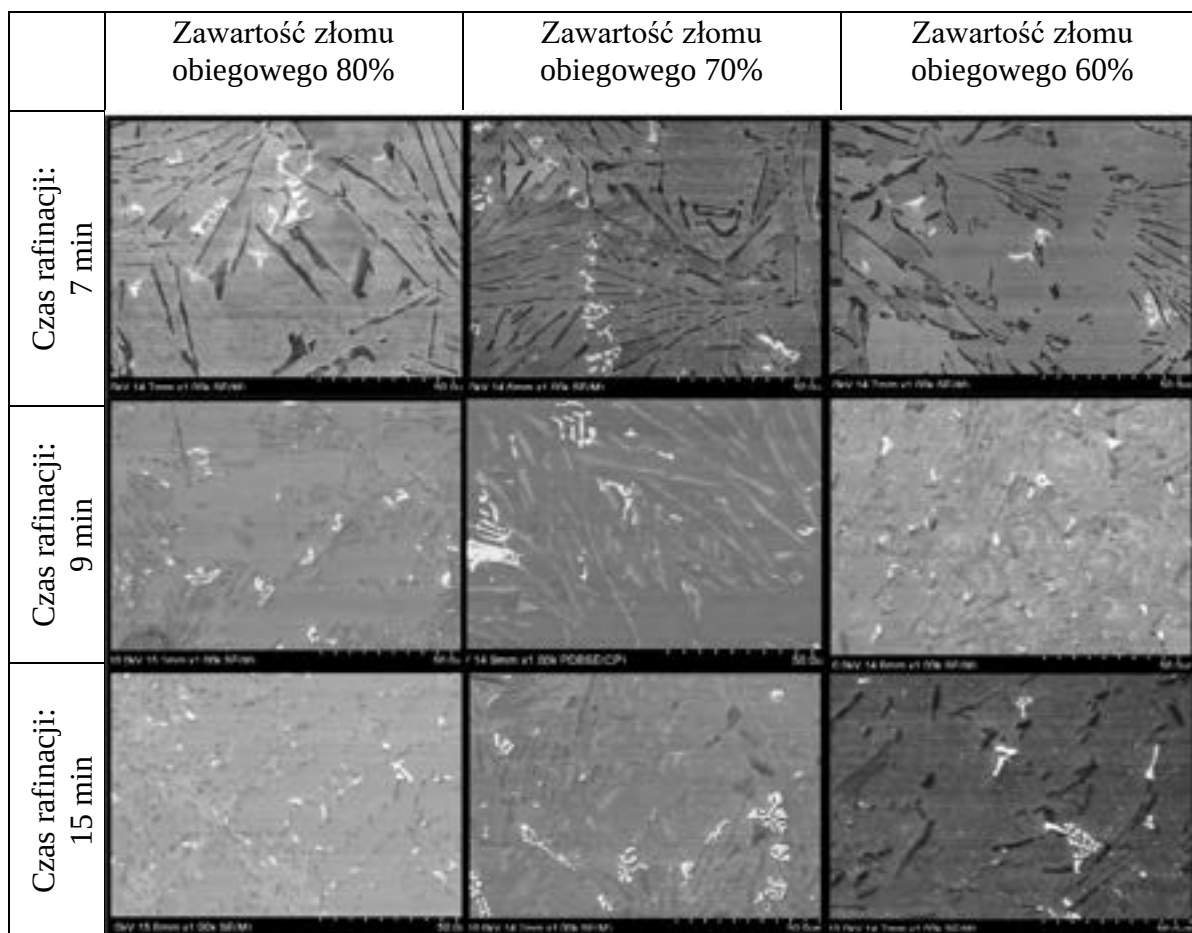
Rys. 4.18. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%

Uzyskane wyniki obserwacji mikrostruktury dowodzą jej zróżnicowania w zależności od zastosowanych paramentów procesu rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego. Wydłużenie czasu rafinacji sprzyja rozdrobnieniu mikrostruktury i jej ujednorodnieniu. Wlewki wykonane ze stopu AlSi12 charakteryzują się mikrostrukturą składającą się z fazy α (aluminium) oraz fazy eutektycznej Al-Si. W stanie lanym mikrostruktura jest stosunkowo gruboziarnista. Faza α , czyli osnowa aluminiowa, ma dendrytyczną strukturę, która jest rozgałęziona i rozciąga się w całej objętości wlewka. Między dendrytami fazy α występuje eutektyka Al-Si, której morfologia zależy od czasu rafinacji barbotażowej i dodatku złomu obiegowego. Krzem w eutektyce występuje w formie iglastej, co negatywnie wpływa na plastyczność stopu. Na rysunku 4.17 przedstawiającym mikrostrukturę odlewu wykonanego ze stopu AlSi12 widoczne są iglaste o nieregularnym kształcie wydzielania. Są to prawdopodobnie wydzielania fazy α -Al₁₅(FeMn)₃Si₂. Ta faza charakteryzuje się morfologią przypominającą "pismo chińskie" lub nieregularne struktury, które są typowe dla tej fazy i występują w stopach aluminium o zwiększonej zawartości żelaza i manganu i są widoczne na rysunku 4.27. Wydzielania te są charakterystyczne dla fazy α , która ma bardziej pożądaną strukturę niż faza β (igielkowata faza Al₅FeSi), która jest mniej korzystna z punktu widzenia własności mechanicznych stopu [68].

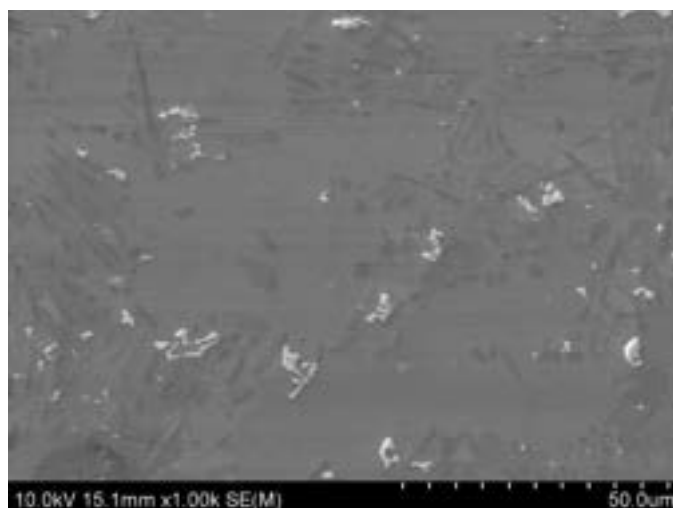
W przypadku odlewów ciśnieniowych ze stopu AlSi12 mikrostruktura jest bardziej jednorodna i drobnoziarnista w porównaniu do wlewka. Szybkie chłodzenie podczas odlewania ciśnieniowego powoduje znaczną redukcję rozmiarów dendrytów fazy α oraz zmienia morfologię krzemu w eutektyce Al-Si, który przyjmuje bardziej zaokrągloną, globularną formę. Ziarna fazy α mają bardziej owalny kształt, niż w przypadku wlewków. Taka struktura poprawia właściwości mechaniczne stopu, zwłaszcza wytrzymałość na rozciąganie i uderzenie.

Podobnie jak w przypadku wlewków, zwiększenie zawartości złomu obiegowego sprzyja powstawaniu wydzieleni faz międzymetalicznych, krzem przyjmuje mniej regularne kształty, jest bardziej wydłużony, co jest niekorzystne z punktu widzenia własności mechanicznych. Wydłużenie procesu barbotażu poprawia jednorodność mikrostruktury, modyfikuje morfologię krzemu i ogranicza ilość faz międzymetalicznych (rys. 4.8). Przykładowo, próbki z 80% złomu obiegowego i krótszym czasem rafinacji (7 minut) wykazują najwięcej nieregularnych wydzieleni, podczas gdy przy 60% złomu i czasie rafinacji 15 minut mikrostruktura jest „najczystsza”, z minimalną ilością widocznych wydzieleni.

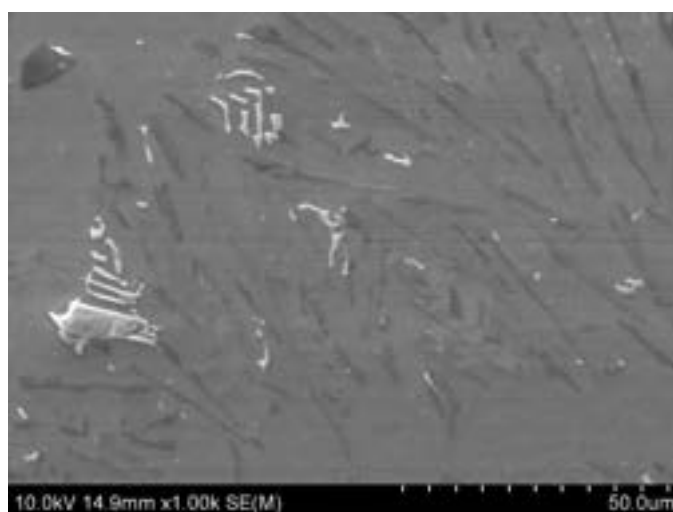
Na rysunkach 4.19 i 4.23 zaprezentowano charakterystyczne obrazy mikrostruktury uzyskane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, odpowiednio dla wlewków i odlewów wykonanych ze stopu AlSi12. Ponadto, na rysunkach 4.20–4.22 przedstawiono wybrane obrazy mikrostruktury wlewków, natomiast na rysunkach 4.24–4.26 reprezentatywne zdjęcia mikrostruktury odlewów. W celu szczegółowej analizy mikrostruktury i określenia składu chemicznego wydzieleni i osnowy wykonano mapy rozkładu pierwiastków w wybranych charakterystycznych obszarach mikrostruktury, które dla wybranych wariantów przedstawiono na rys. 4.27 oraz rys. 4.28.



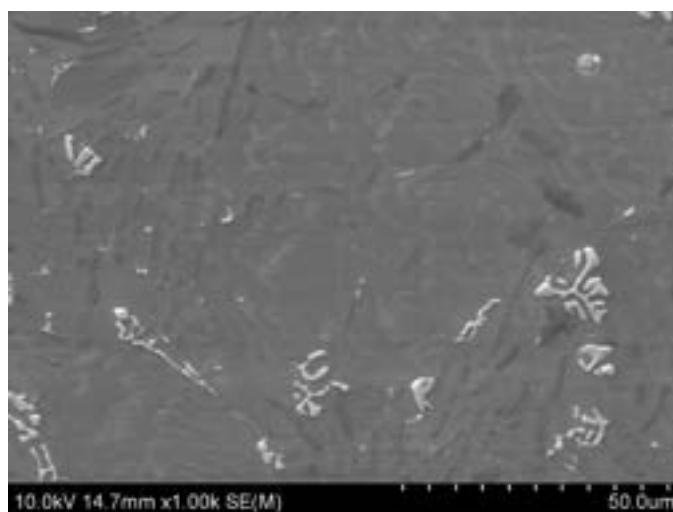
Rys. 4.19 Zestawienie zdjęć mikrostruktury wlewków ze stopu AlSi12 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM



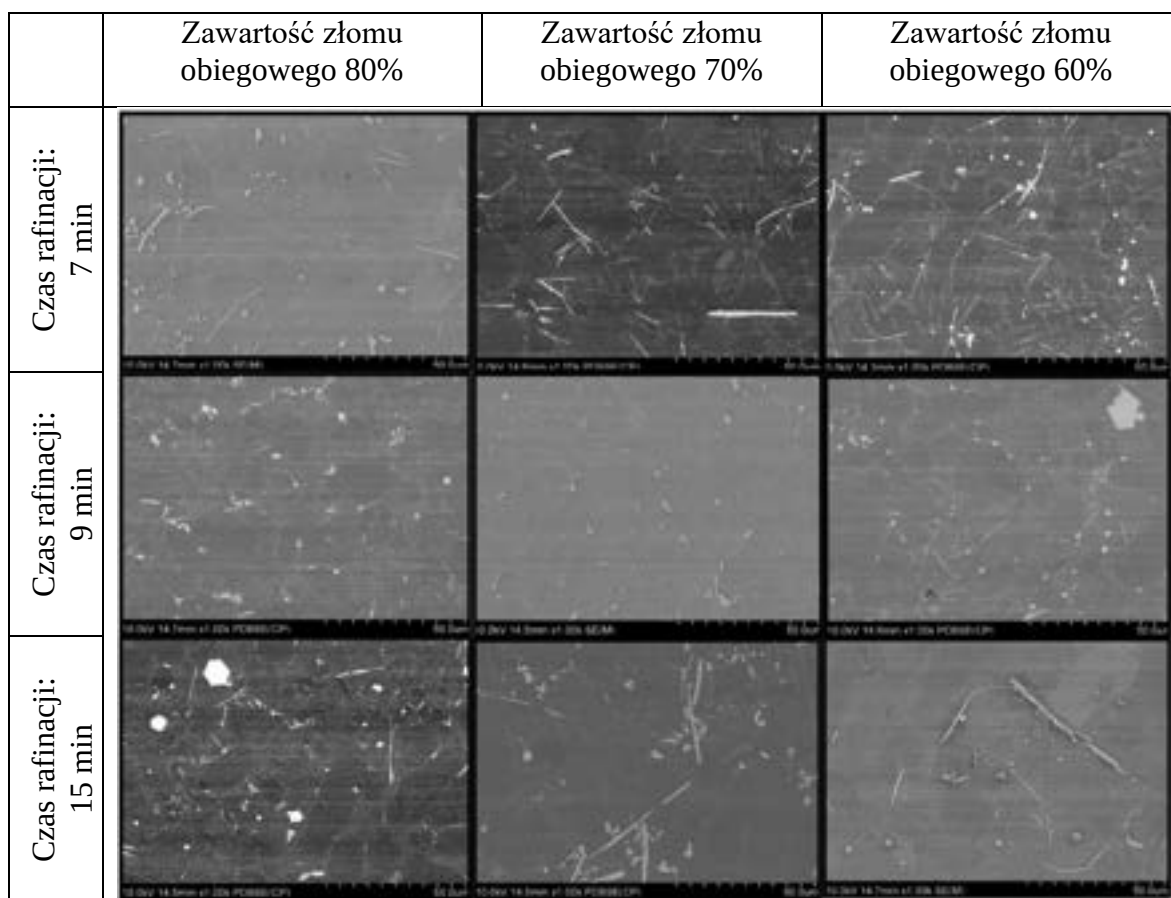
Rys. 4.20 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



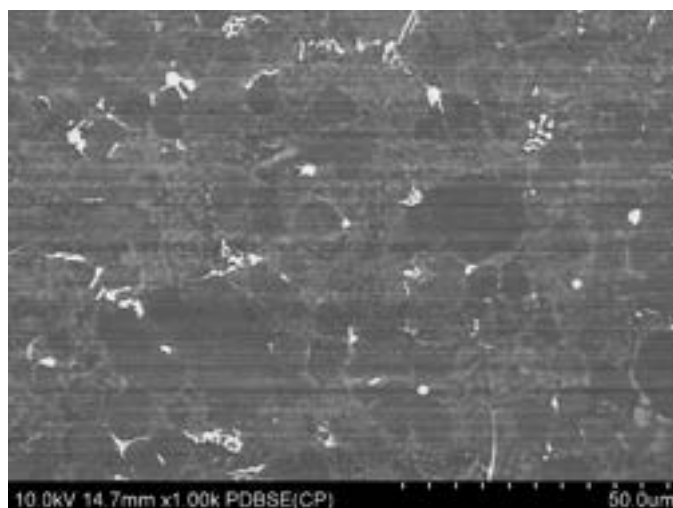
Rys. 4.21 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



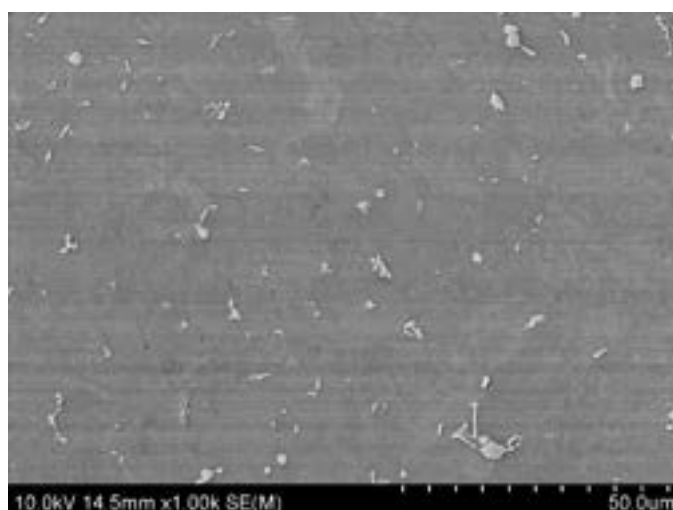
Rys. 4.22 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



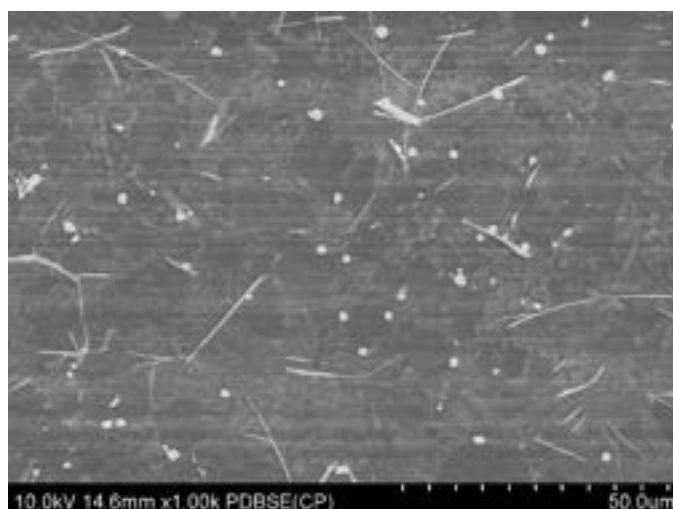
Rys. 4.23 Zestawienie zdjęć mikrostruktury odlewów ze stopu AlSi12 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM



Rys. 4.24 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



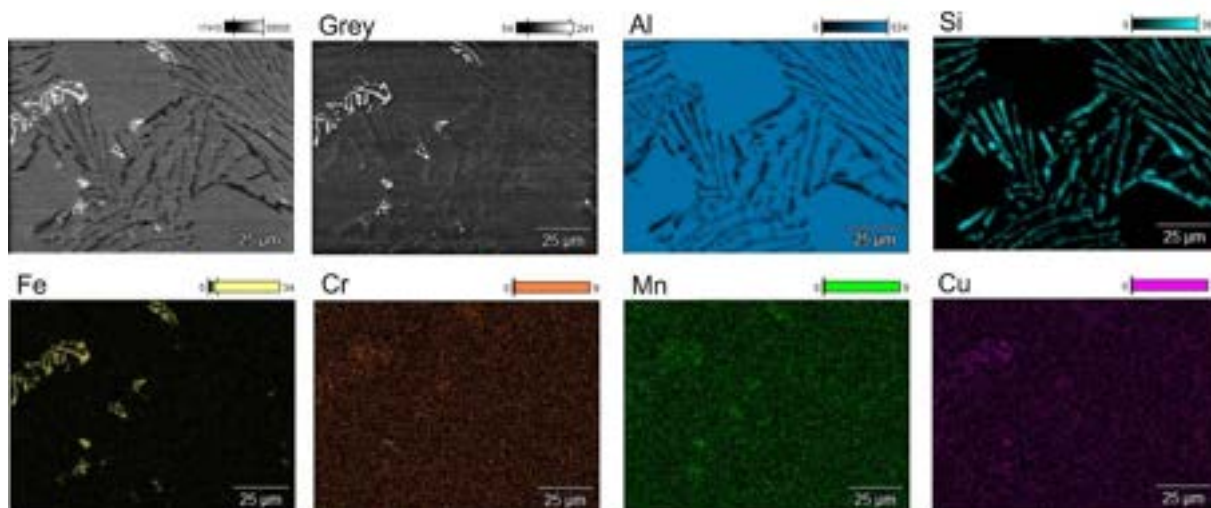
Rys. 4.25 odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



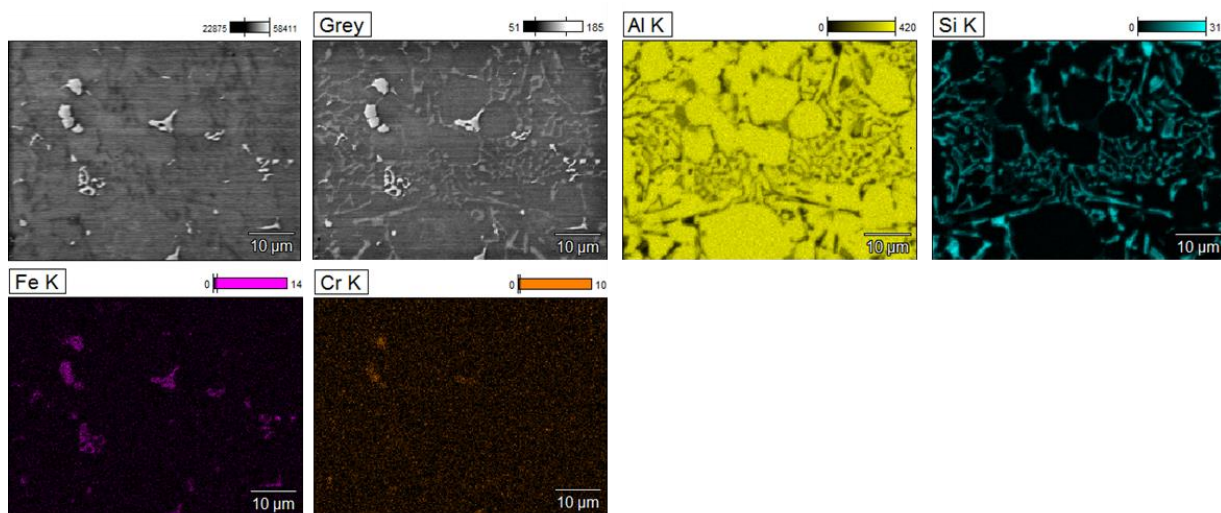
Rys. 4.26 Mikrostruktura na przekroju odlewu wykonanego ze stopu AlSi12 dla metalu rafinowanego przez 15 min. i zawartości złomu obiegowego 70%

Wyniki badania składu chemicznego w mikroobszarach przedstawione w formie map rozkładu pierwiastków potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące budowy mikrostrukturalnej wlewków i odlewów ciśnieniowych (rys. 4.27-4.28). W mikrostrukturze obecne są duże skupiska iglastych wydzielen krzemowych, a w przypadku odlewów ciśnieniowych częściowo także w formie wydzielen globularnych (rys. 4.24). Ponadto w mikrostrukturze obecne są wydzielienia bogate w Fe i Cr o nieregularnym kształcie, jak faza β -Fe (Al_5FeSi), faza ta ma iglastą lub płytkową morfologię, która negatywnie wpływa na plastyczność i wytrzymałość materiału. Ponadto występuje faza bogata w chrom, prawdopodobnie Al_7Cr , której tworzenie się jest szczególnie uprzywilejowane w stopach poddanych wysokotemperaturowym obróbkom cieplnym [16, 68].

Zarówno żelazo, jak i chrom wpływają korzystnie na właściwości mechaniczne odlewów, jak i na poprawę odporności na zużycie. Obecna w mikrostrukturze miedź oraz mangan wpływają także korzystnie na poprawę własności mechanicznych, oraz odporności na korozję [16, 69]. Ponadto w mikrostrukturze występują fazy bogate w żelazo (Fe) czy mangan (Mn), które tworzą związki międzymetaliczne (rys. 4.27, 4.28), występują one w postaci płytkowej lub iglastej, jak faza β -Fe (Al_5FeSi). Wyniki przedstawione w pracy [72] dowodzą, że wielokrotne przetapianie stopu AlSi9Cu3 przyczynia się do zwiększenia ilości i wielkości wydzielen fazy β - Al_5FeSi . Zjawisko to może mieć negatywny wpływ na ogólną jakość i wytrzymałość stopu. Dodatek złomu obiegowego wpływa na mikrostrukturę wlewków, zwiększona ilość złomu obiegowego sprzyja powstawaniu większej ilości faz międzymetalicznych, które przyjmują formę płytkowych wydzielen (rys. 4.27-4.28), co jest niekorzystne z punktu widzenia własności plastycznych, a także odporności na pękanie. Zastosowanie gazów obojętnych w procesie rafinacji barbotażowej, takich jak argon, pozwala na skuteczniejsze usunięcie zanieczyszczeń i gazów rozpuszczonych w ciekłym metalu, co zmniejsza liczbę porowatości i nieciągłości w materiale. Rafinacja barbotażowa przyczynia się do poprawy jednorodności mikrostruktury, redukcji „iglastego” krzemu oraz zmniejszenia ilości faz międzymetalicznych, co przekłada się na lepsze właściwości plastyczne oraz większą odporność na pękanie wlewków [15, 16].



Rys. 4.27 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12 rafinowanego przez 15 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cr, Mn i Cu; zawartość złomu obiegowego na poz. 80%



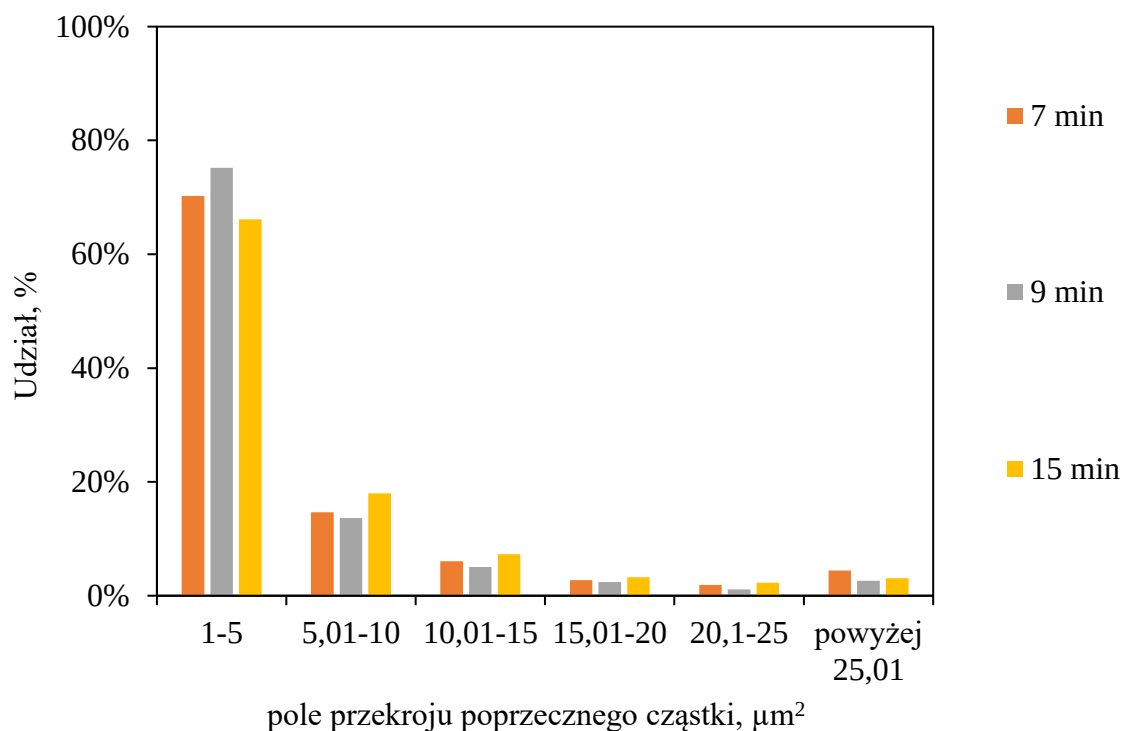
Rys. 4.28 Mikrostruktura odlewu ze stopu AlSi12 rafinowanego przez 9 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cu, Cr; zawartość złomu obiegowego na poz. 70%

Porównując mikrostrukturę odlewów ciśnieniowych i wlewków ze stopów AlSi12 zawierających różną zawartość złomu obiegowego, można zauważyć istotne różnice w rozmieszczeniu pierwiastków stopowych. W odlewach krzem tworzy wyraźniejsze i morfologicznie bardziej zwarte fazy, które przyczyniają się do zwiększenia twardości. Jest to związane z szybkim chłodzeniem, które sprzyja formowaniu eutektyki krzemowej w postaci ostrych igieł lub płytek. Wlewki, w których odprowadzanie ciepła jest wolniejsze, charakteryzują się występowaniem długich, iglastych wydzieleni krzemowych. Kolejną różnicą jest rozmieszczenie pierwiastków takich jak żelazo i chrom. W odlewach

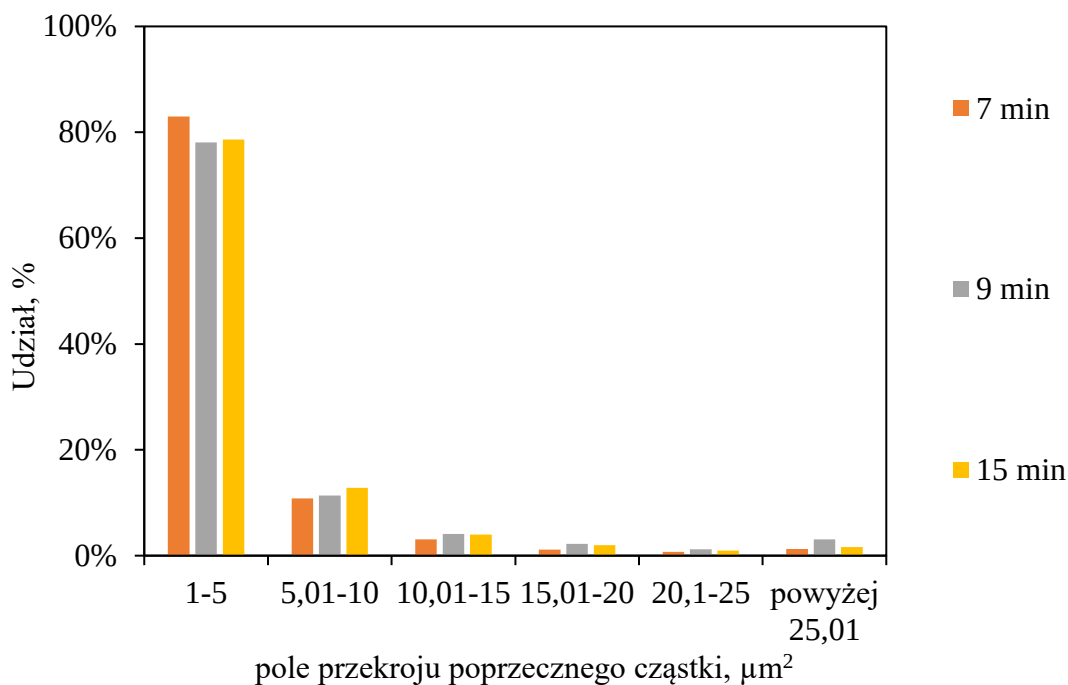
ciśnieniowych, wydzielania bogate w te pierwiastki są większe, mają też inną morfologię. We wlewkach fazy te mają tendencję do przyjmowania bardziej wydłużonych, nieregularnych kształtów, co negatywnie wpływa na plastyczność i odporność odlewów na pękanie natomiast w odlewach, z powodu wolniejszego chłodzenia, fazy te mają bardziej zwarty i regularny kształt, co korzystnie wpływa na wytrzymałość mechaniczną i odporność na korozję oraz pękanie [2, 77].

W mikrostrukturze badanego stopu AlSi12 obecna jest iglasta eutektyka (α +Si) oraz owalne komórki roztworu stałego α . Struktura pierwotna występująca w stopie charakteryzuje się kryształkami krzemu wychodzącymi z centrum krystalizacji. Ponadto w obszarze występowania eutektyki obecne są również wydzielania bogate w żelazo, na zdjęciach SEM widoczne w jasnym kontraście. Wydzielania te w swoim składzie zawierają również Cu, Cr i Mn (rys.4.27-4.28). Przeprowadzone badania mikrostruktury stopu przed i po procesie rafinacji dowodzą, że kształt wydzielen krzemowych nie uległ zmianie, pozostają one nadal iglaste, jednak ich rozmiar nieznacznie zmniejsza się wraz z wydłużeniem czasu procesu rafinacji. Nie stwierdzono również wpływu procesu rafinacji na kształt wydzielen bogatych w Fe. Wydzielania te częściowo występują w formie eutektyk, a częściowo w formie wydłużonej.

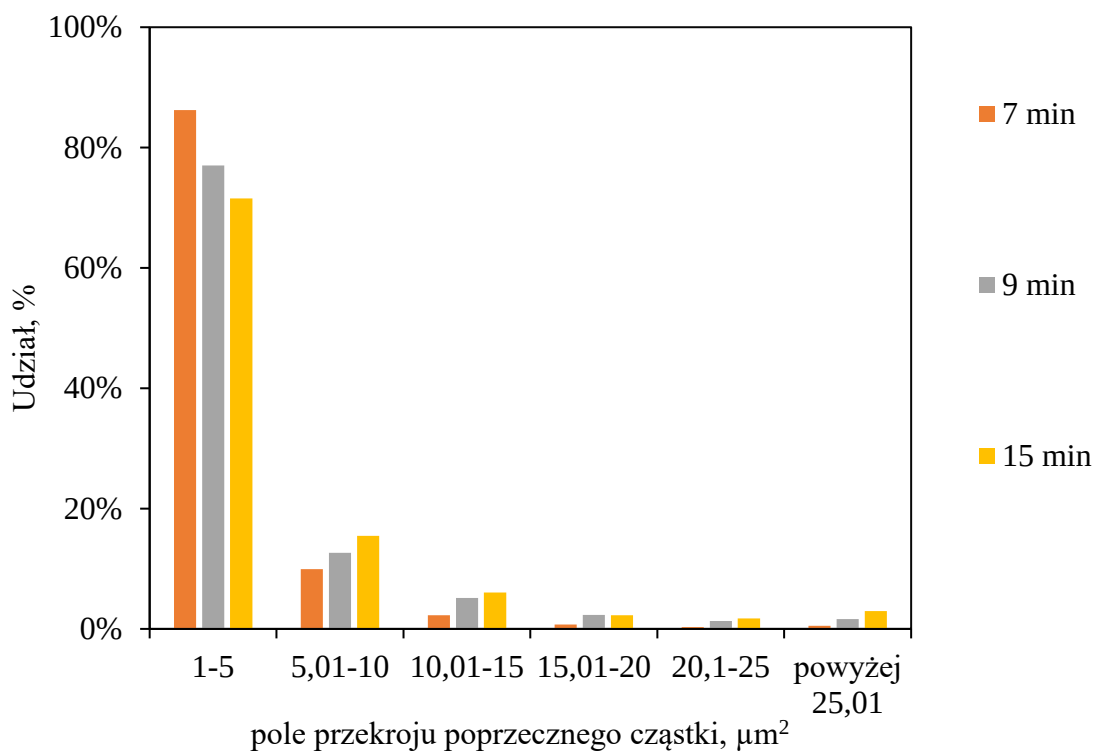
Na rys. 4.29-4.40, zamieszczono wyniki analizy statystycznej wydzielen obecnych w mikrostrukturze wlewków (rys. 4.29-4.34) i odlewów ciśnieniowych (rys. 4.35-4.40). Wykonano analizę wielkości wydzielen krzemowych oraz faz bogatych w żelazo. Uzyskane wyniki dowiodły, że proces rafinacji barbotażowej w niewielkim stopniu wpływa na rozdrobnienie mikrostruktury, jednak znacząco redukuje porowatość.



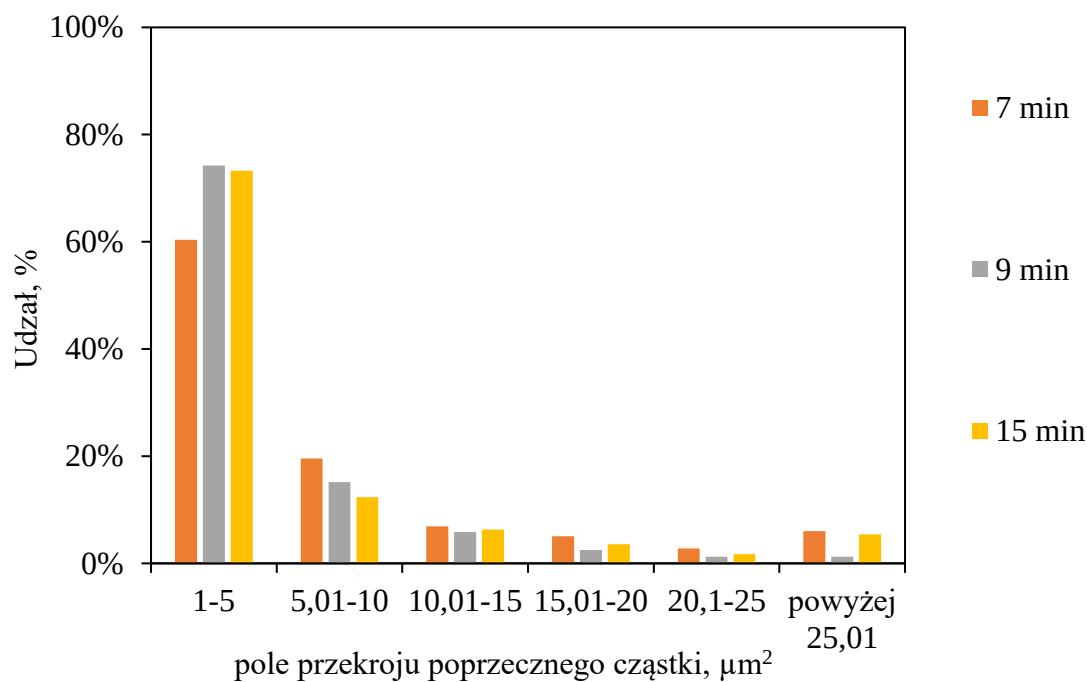
Rys. 4.29 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi12; próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



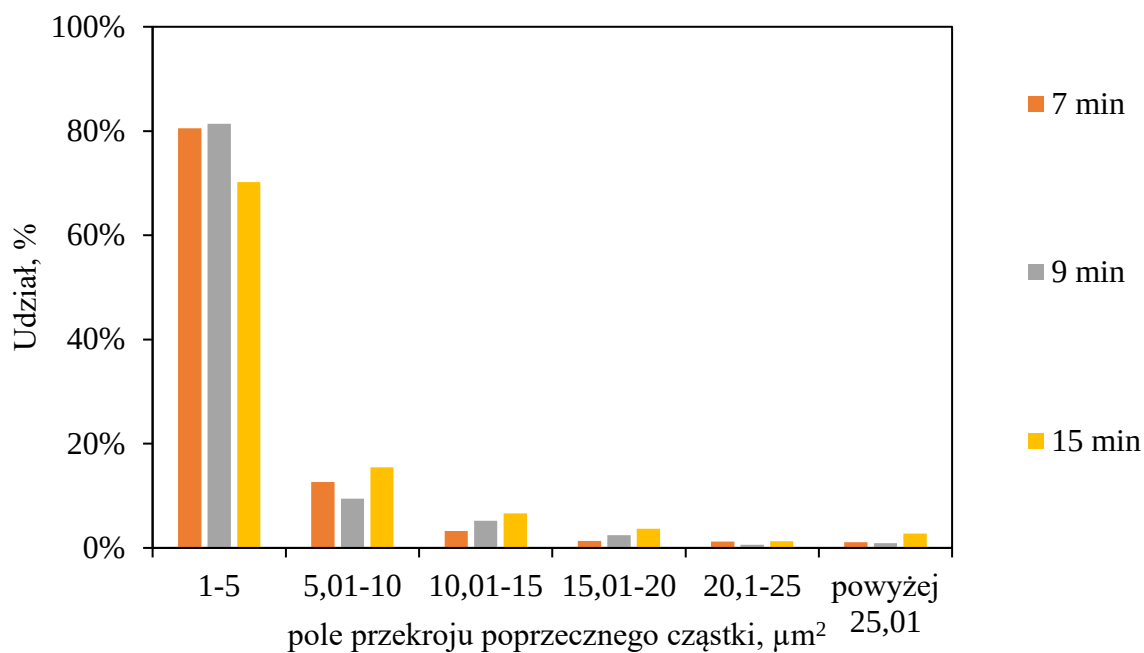
Rys. 4.30 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi12; próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



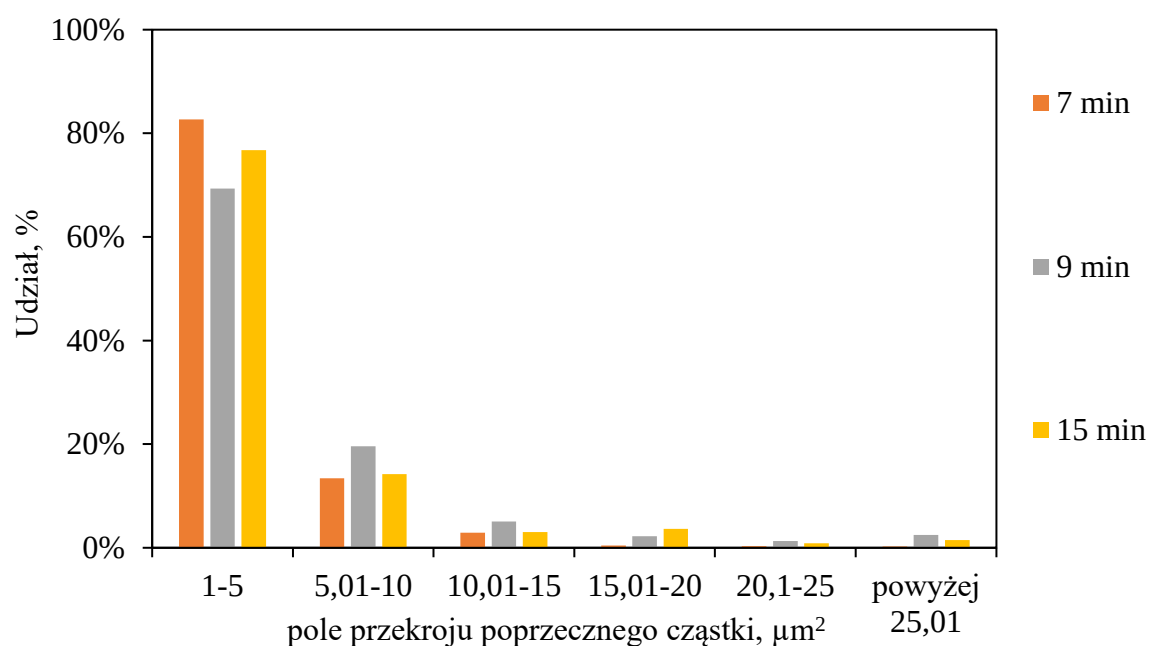
Rys. 4.31 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi12, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego



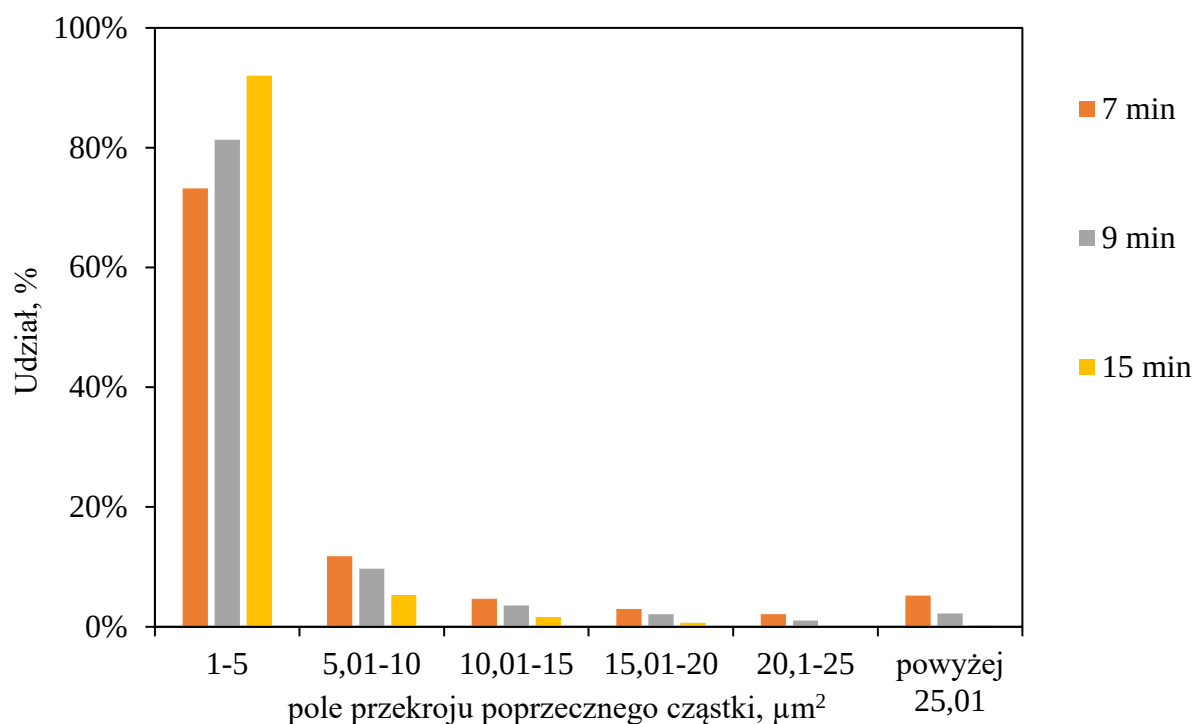
Rys. 4.32 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



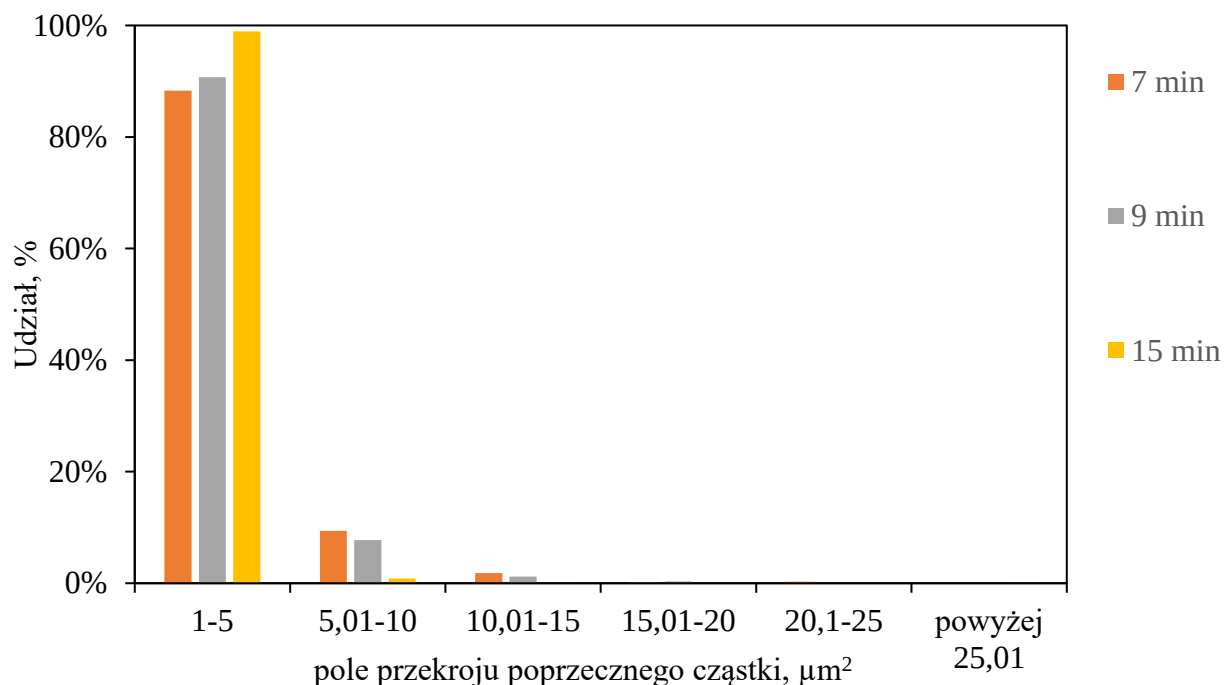
Rys. 4.33 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



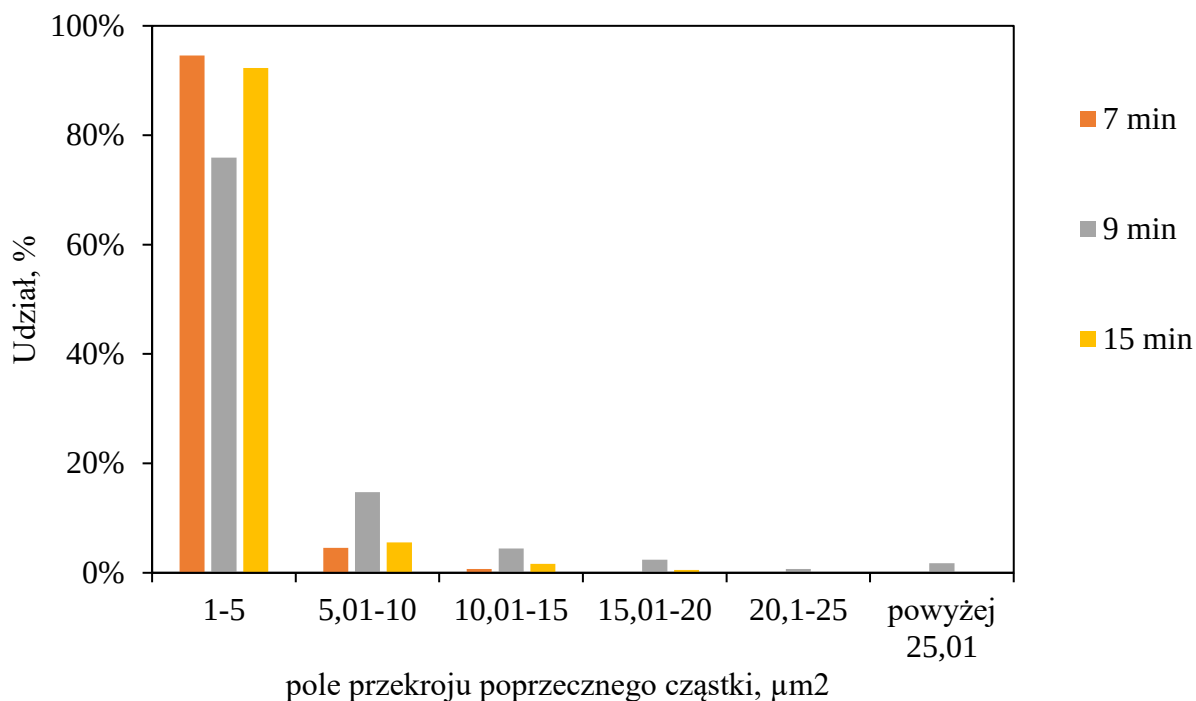
Rys. 4.34 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi12, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego



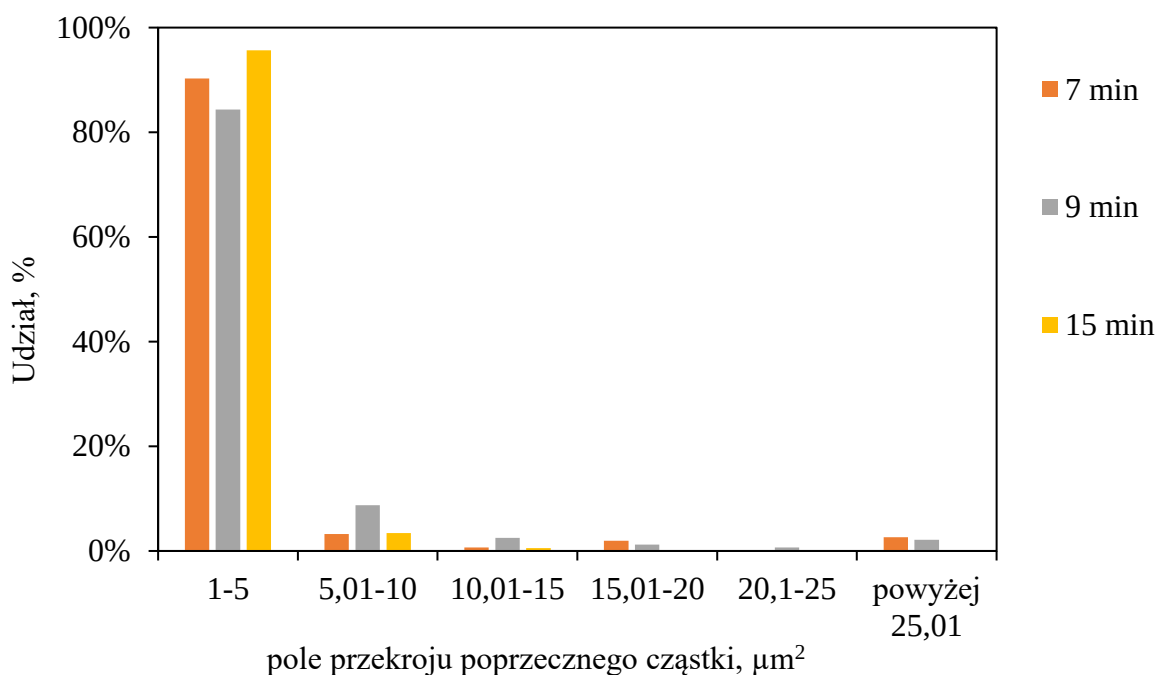
Rys. 4.35 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



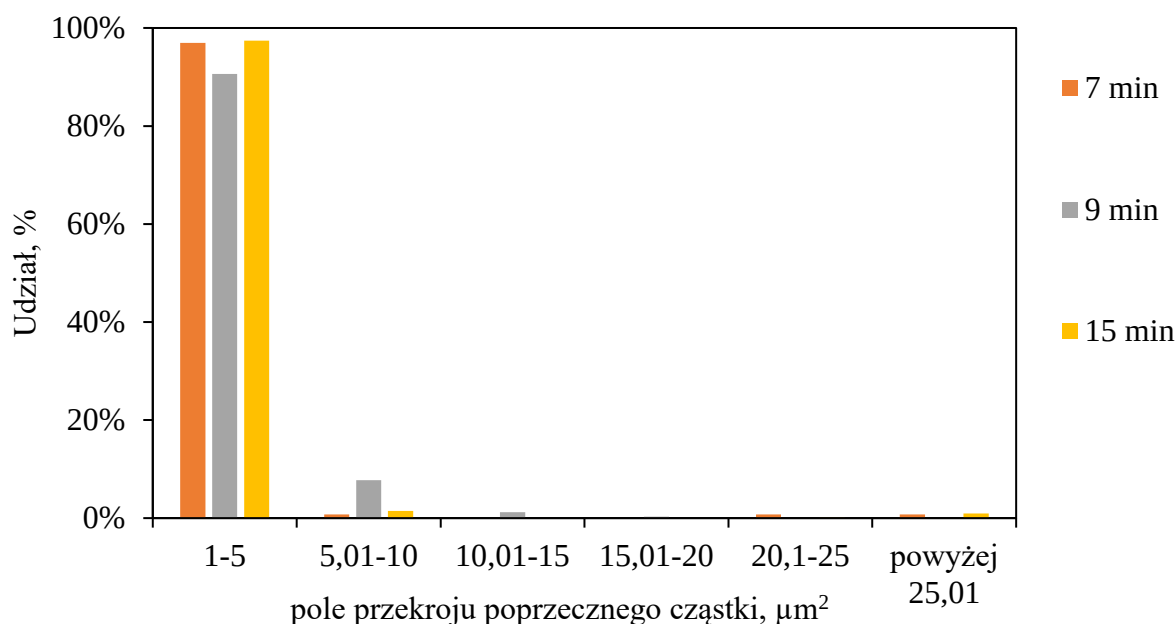
Rys. 4.36 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



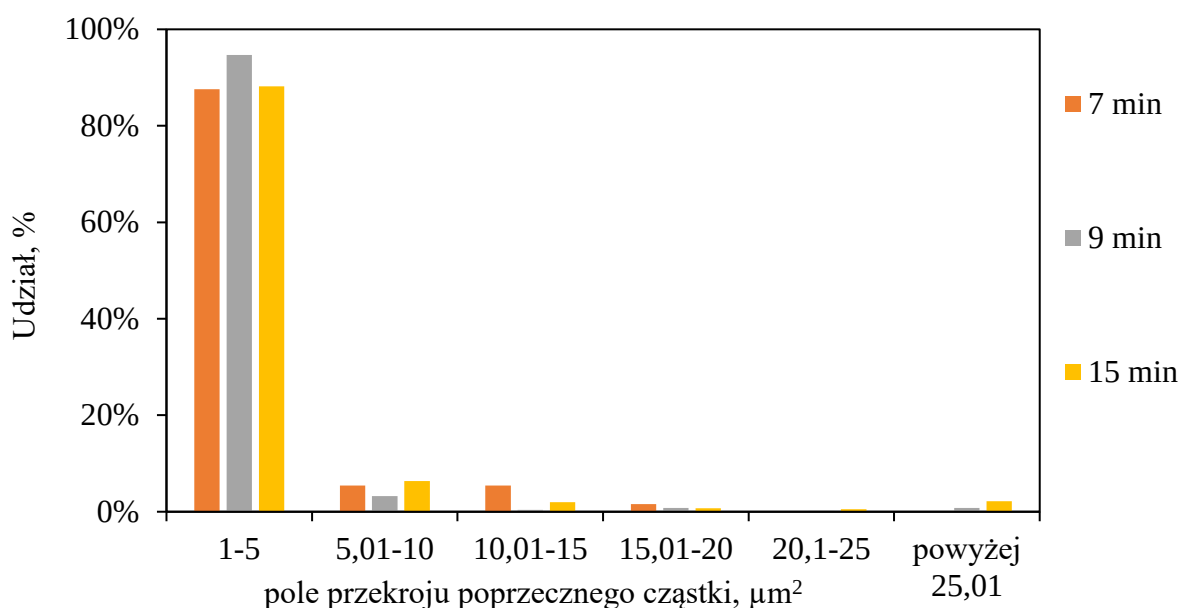
Rys. 4.37 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego



Rys. 4.38 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



Rys. 4.39 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



Rys. 4.40 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego

Wlewki rafinowane najkrócej (7 min) charakteryzują się obecnością nieregularnych wydzielen o większych rozmiarach, zwłaszcza w próbkach z większą zawartością złomu obiegowego (rys. 4.32). Szczególnie wlewki zawierające 80% złomu obiegowego wykazują najwięcej nieregularnych wydzielen. W miarę wydłużania czasu rafinacji do 9 min,

mikrostruktura stopu staje się bardziej jednorodna, co skutkuje mniejszymi i bardziej równomiernie rozłożonymi wydzieleniami. Na przykład na wykresach przedstawionych rys.4.36 i 4.38 widać redukcję rozmiaru wydzieleni w porównaniu z krótszym czasem rafinacji. Po rafinacji trwającej 15 minut wlewki charakteryzują się najbardziej jednorodną mikrostrukturą, co można zaobserwować na rysunkach 4.32 i 4.35, gdzie rozmiar wydzieleni jest mniejszy w porównaniu do krótszych czasów rafinacji.

Odlewy poddane rafinacji przez 7 minut, podobnie jak wlewki, zawierają większą liczbę wydzieleni, są one również większe. W odlewach z 80% zawartości złomu obiegowego (rys. 4.35, rys. 4.40) wydzielenia są najbardziej nieregularne, jest ich także najwięcej. Wraz z wydłużeniem czasu rafinacji do 9 min, wydzielenia stają się bardziej jednorodne, szczególnie w odlewach z 70% i 80% zawartości złomu obiegowego. Po 15 minutach rafinacji odlewy charakteryzują się najdrobniejszymi wydzieleniami, mikrostruktura jest także ujednoliconą (rys. 4.35-4.40).

Zarówno w przypadku wlewków, jak i odlewów, wydłużenie czasu rafinacji prowadzi do znacznego zmniejszenia wielkości wydzieleni. Najbardziej jednorodne mikrostruktury zaobserwowano po 15 minutach rafinacji oraz przy wyższej zawartości złomu obiegowego (70% i 80%). W wynikach należy jednak uwzględnić możliwość zakłóceń pomiarowych, takich jak "szum" czy artefakty, które mogły wpłynąć na pomiary najmniejszych cząstek.

4.1.2. Wyniki pomiarów liczby gazowej wlewków

Ze względu na specyfikę procesu, badania stopnia zagazowania stopu AlSi12 wykonano tylko dla wlewków. Wyniki pomiarów stopnia zagazowania wlewków, przeprowadzonych za pomocą wagi MK 3000, zostały zestawione w tabelach 4.1-4.3. Podczas pomiarów starannie kontrolowano temperaturę przetopu, utrzymując ją w określonym zakresie, aby uniknąć nadmiernego rozpuszczania gazów w ciekłym metalu, co mogłoby prowadzić do jego utleniania i zafałszować wyniki. Temperatura procesu przetopu mieściła się w zakresie 710 – 730 °C.

Przedstawione tabele uwzględniają czas rafinacji oraz zawartość złomu obiegowego.

Tabela 4.1 Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 80% złomu obiegowego

Czas rafinacji, min.	Temp. przed pomiarem, °C	Średni stopień zagazowania, %
0	727	19,71
7	727	4,95
9	721	3,39
15	730	1,32

Tabela 4.2 Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 70% złomu obiegowego

Czas rafinacji, min.	Temp. przed pomiarem, °C	Średni stopień zagazowania, %
0	720	16,23
7	718	4,83
9	702	3,73
15	733	1,64

Tabela 4.3 Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 60% złomu obiegowego

Czas rafinacji, min.	Temp. przed pomiarem, °C	Średni stopień zagazowania, %
0	729	13,28
7	712	1,5
9	711	1,83
15	715	0,78

Najwyższy poziom zagazowania wykazano w próbkach metalu, które nie zostały poddane rafinacji, niezależnie od zawartości złomu obiegowego we wsadzie. Wartości te wahały się pomiędzy 13 a 19%. Natomiast w próbkach poddawanych rafinacji poziom zagazowania nie przekraczał 5%. Wraz z wydłużeniem czasu trwania procesu rafinacji barbotażowej zaobserwowano spadek wartości liczby gazowej, co wskazuje na efektywne usuwanie gazów z metalu. Wyjątek stanowiły próbki zawierające 60% złomu obiegowego (Tabela

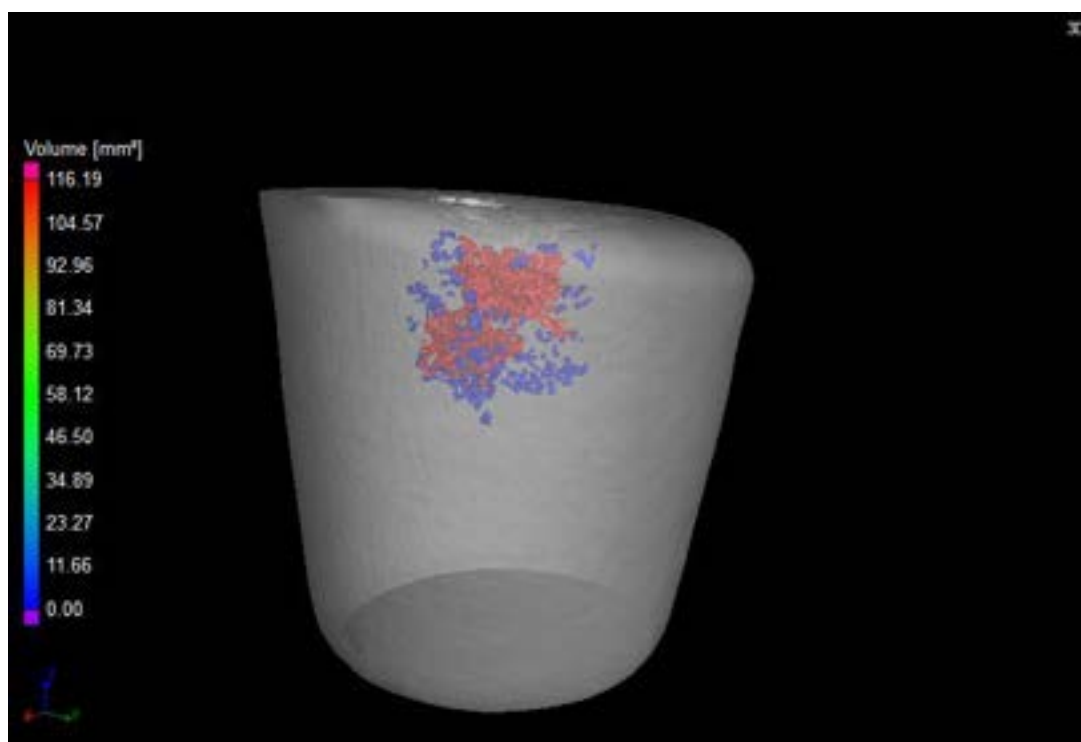
4.3), w których w przypadku próbek rafinowanych przez 7 i 9 minut stwierdzono odwrotną tendencję – wartości liczby gazowej wzrastały, jednakże różnice te nie były duże. Widoczna jest tendencja, że większa zawartość złomu obiegowego prowadzi do większego stopnia zagazowania, szczególnie w próbkach nierafinowanych. Dotyczy to zarówno stopów poddawanych rafinacji, jaki i tych, sprzed etapu rafinacji barbotażowej. Na przykład, dla stopu o 80% zawartością złomu obiegowego, początkowy poziom zagazowania wynosił 19,71%, a po 15 minutach rafinacji obniżył się do 1,32% (Tabela 4.1). W przypadku stopu z 70% złomem (Tabela 4.2), poziom zagazowania zmniejszył się z 16,23% do 1,64% po 15 minutach. Natomiast dla stopu o 60% zawartości złomu, początkowy poziom 13,28% spadł do zaledwie 0,78% po 15 minutach rafinacji (Tabela 4.3). Uzyskane wyniki dowodzą, że dłuższy czas rafinacji znacząco redukuje zagazowanie, choć stopień redukcji zależy również od procentowej zawartości złomu w stopie [142].

4.1.3. Wyniki badań tomograficznych

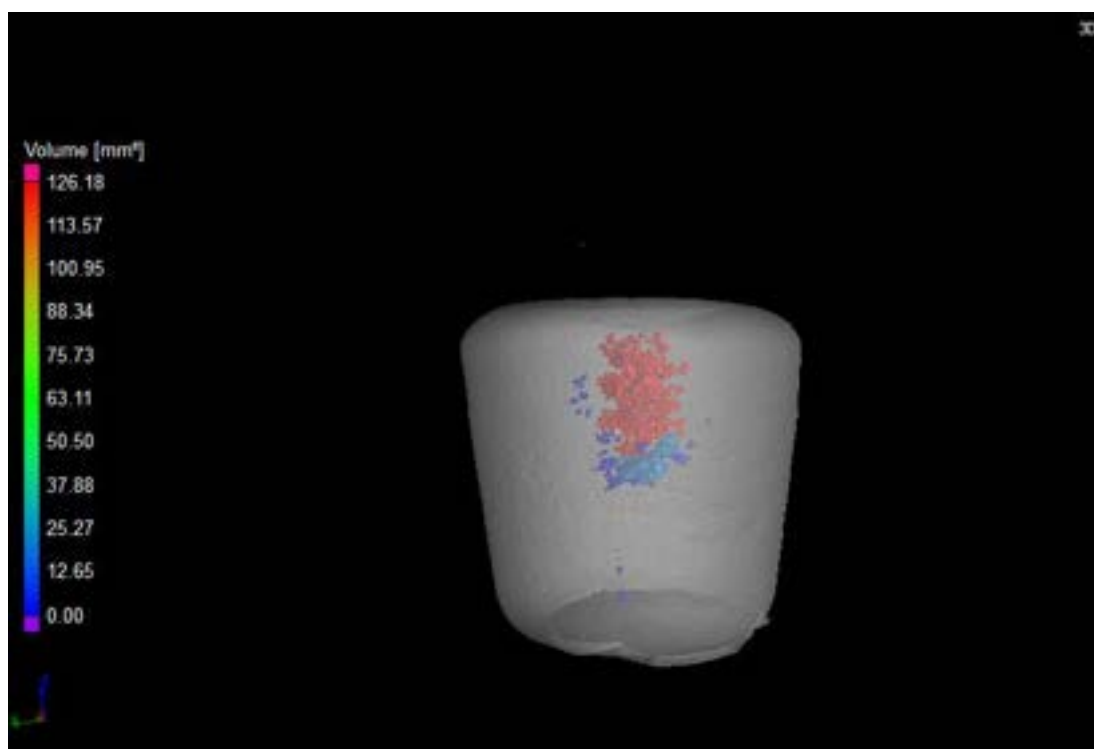
Poniżej przedstawiono wyniki badań tomograficznych. Uzyskane dane zestawiono w formie tabelarycznej (Tabela. 4.4 i 4.5) oraz na zdjęciach X-ray CT (rys. 4.41- 4.58). Wyniki pomiarów porowatości i stopnia zagazowania dla wlewków ze stopu AlSi12 zaprezentowano w tabeli 4.4. Z kolei wyniki pomiarów porowatości odlewów z tego stopu przedstawiono w tabeli 4.5. Na rysunkach 4.41-4.49, zamieszczono wyniki uzyskane dla wlewków, z kolei na rysunkach 4.50-4.58 dla odlewów ciśnieniowych.

Tabela 4.4 Wyniki pomiarów porowatości i stopnia zagazowania wlewków ze stopu AlSi12 w zależności od zawartości złomu obiegowego oraz czasu rafinacji barbotażowej

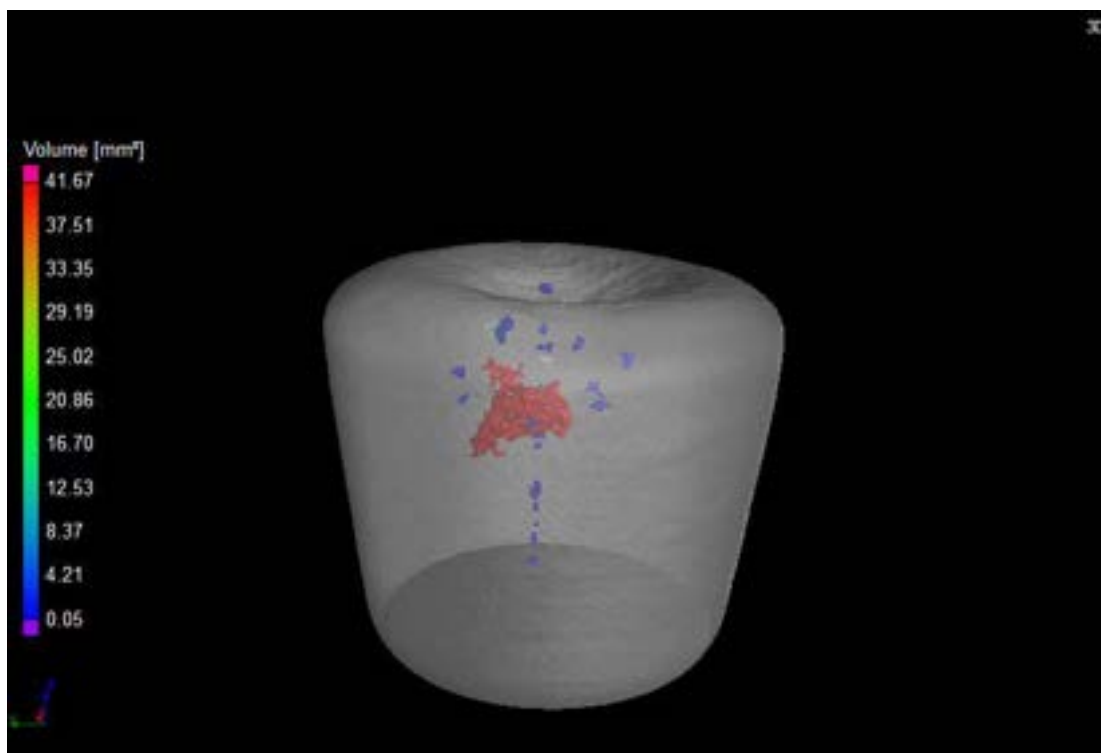
Wlewki ze stopu AlSi12						
Zawartość złomu obiegowego	80 %		70 %		60 %	
Czas rafinacji barbotażowej (min)	Poziom zagazowania, %	Objętość największej porowatości (mm ³)	Poziom zagazowania, %	Objętość największej porowatości (mm ³)	Poziom zagazowania, %	Objętość największej porowatości (mm ³)
7	4,71	41,67	4,83	126,18	1,5	116,19
9	3,47	718,73	3,73	297,15	1,83	107,179
15	1,30	401,68	1,64	195,29	0,78	303,35



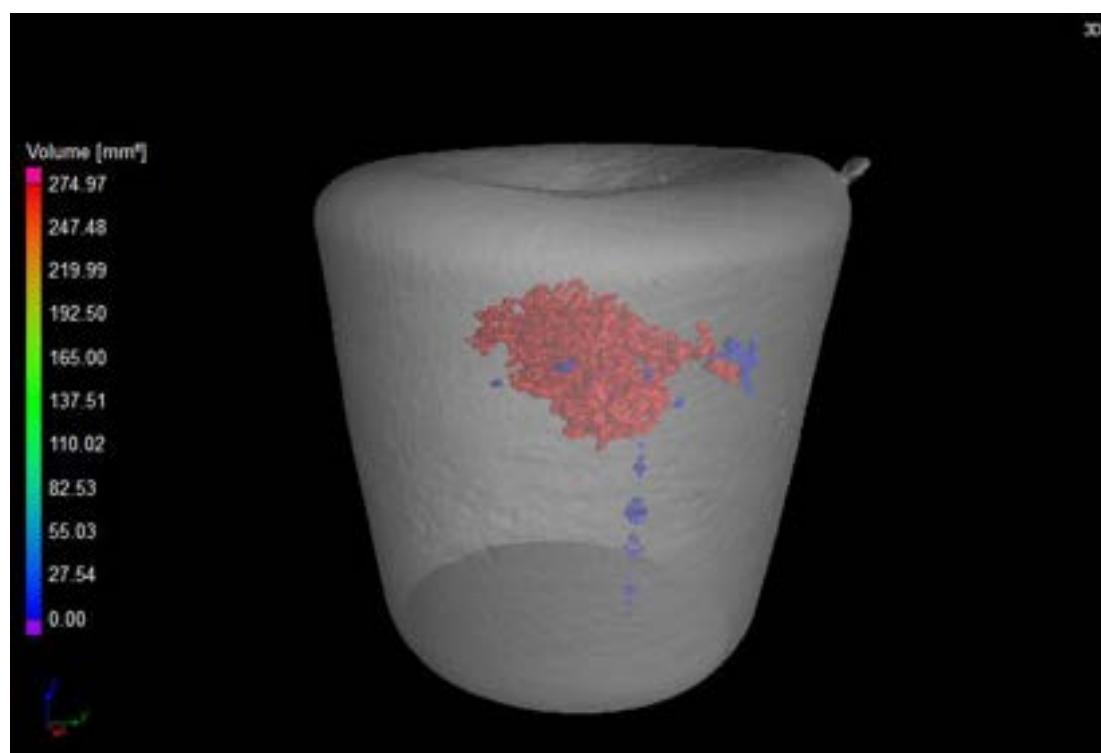
Rys. 4.41 Wlewek ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



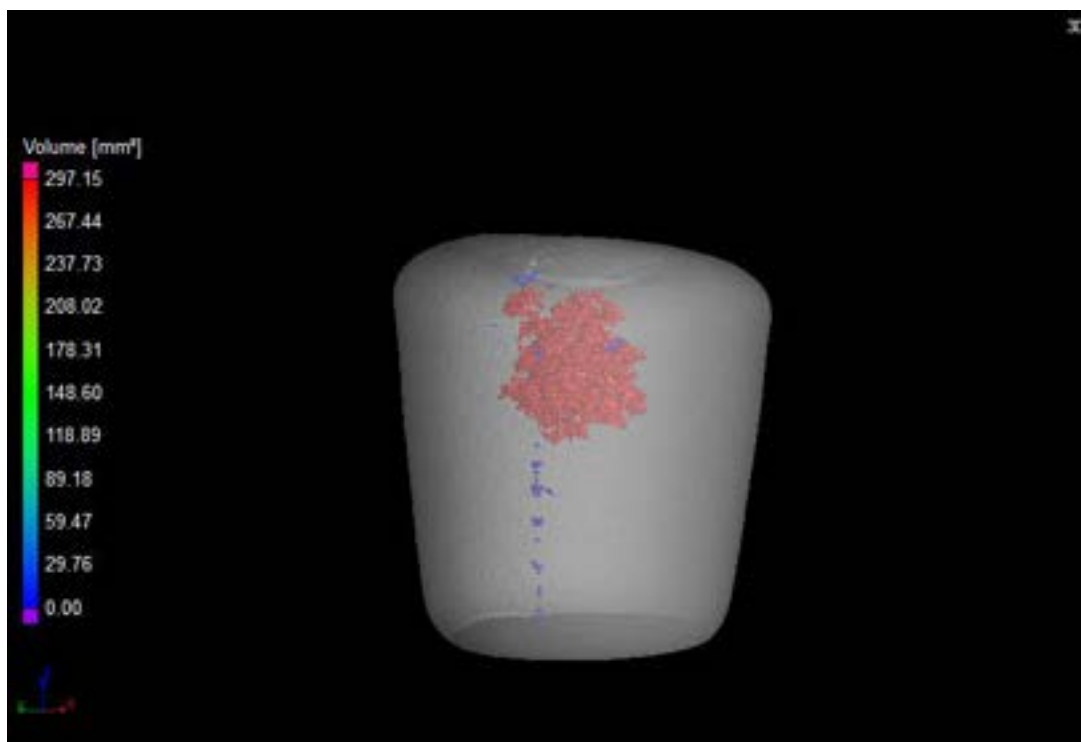
Rys. 4.42 Wlewek ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



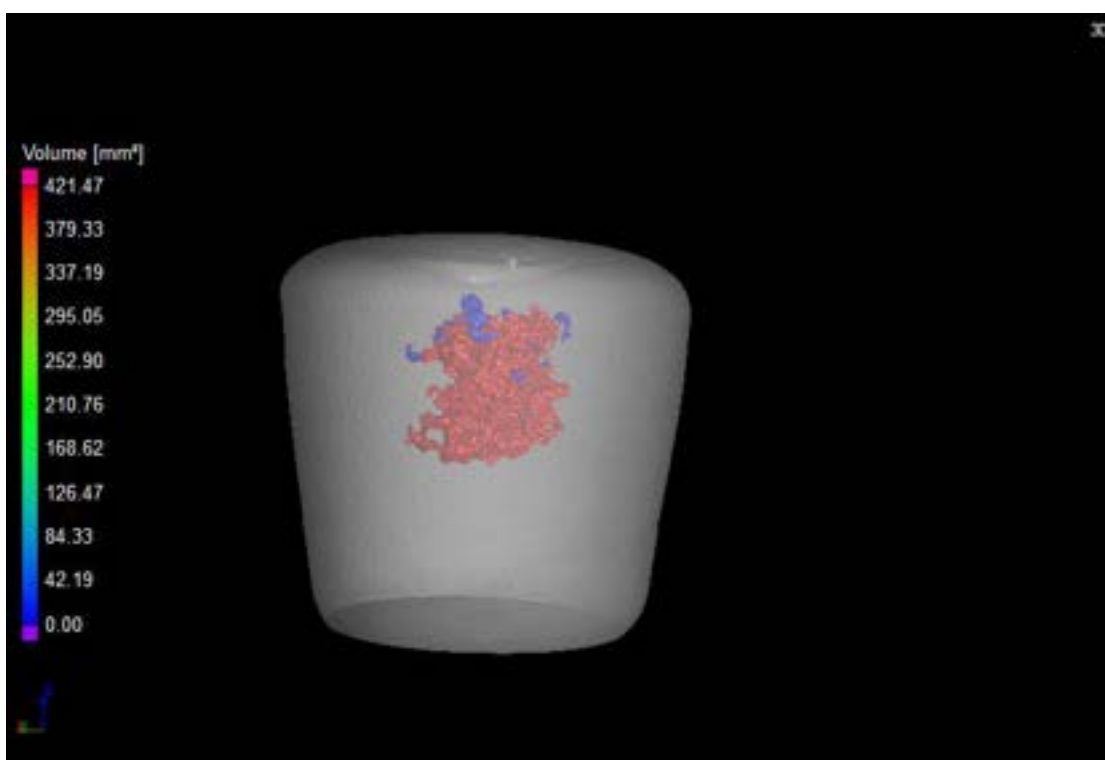
Rys. 4.43 Wlewek ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



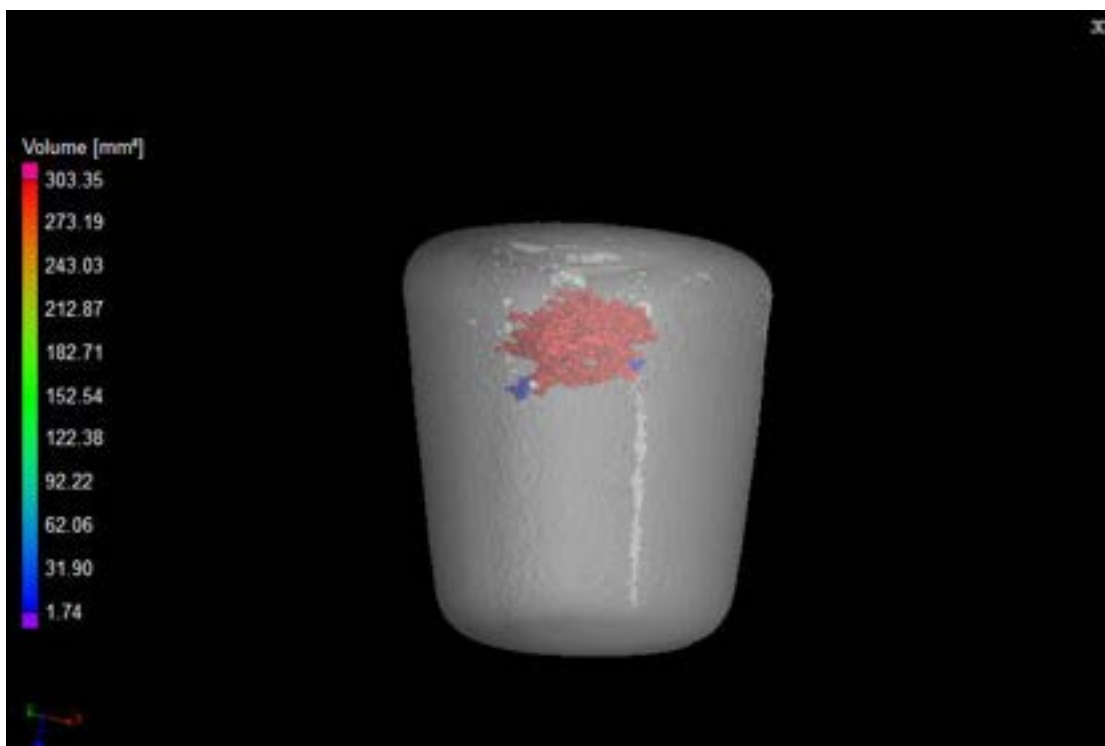
Rys. 4.44 Wlewek ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



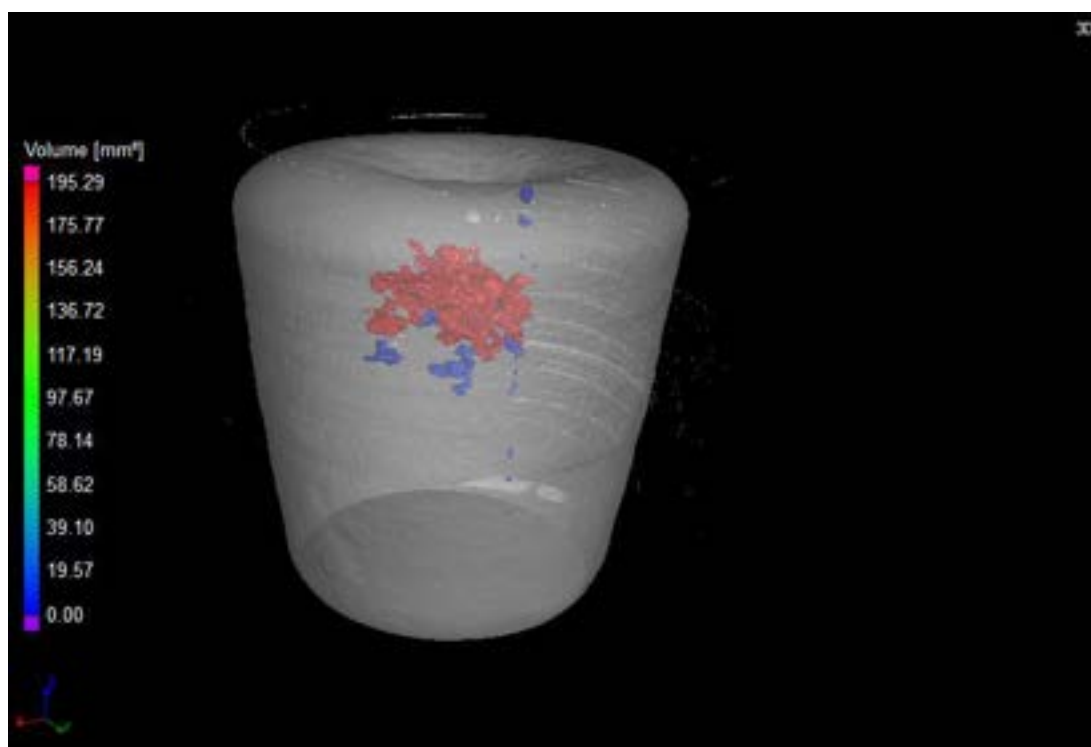
Rys. 4.45 Wlewek ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



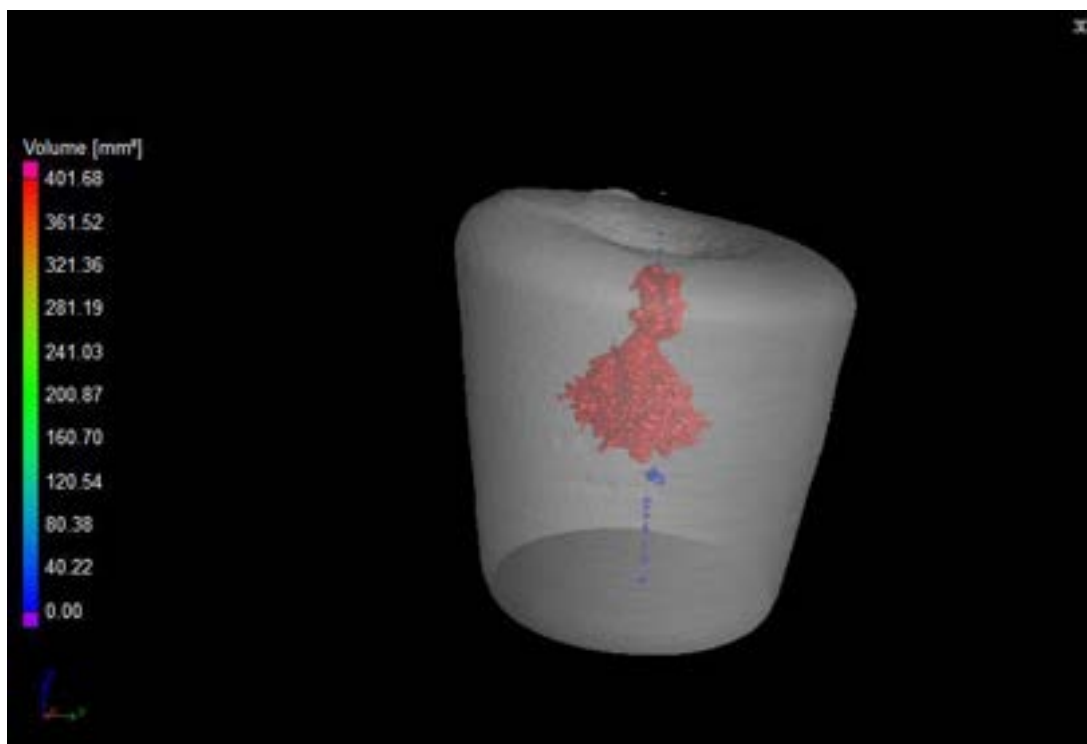
Rys. 4.46 Wlewek ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4.47 Wlewek ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



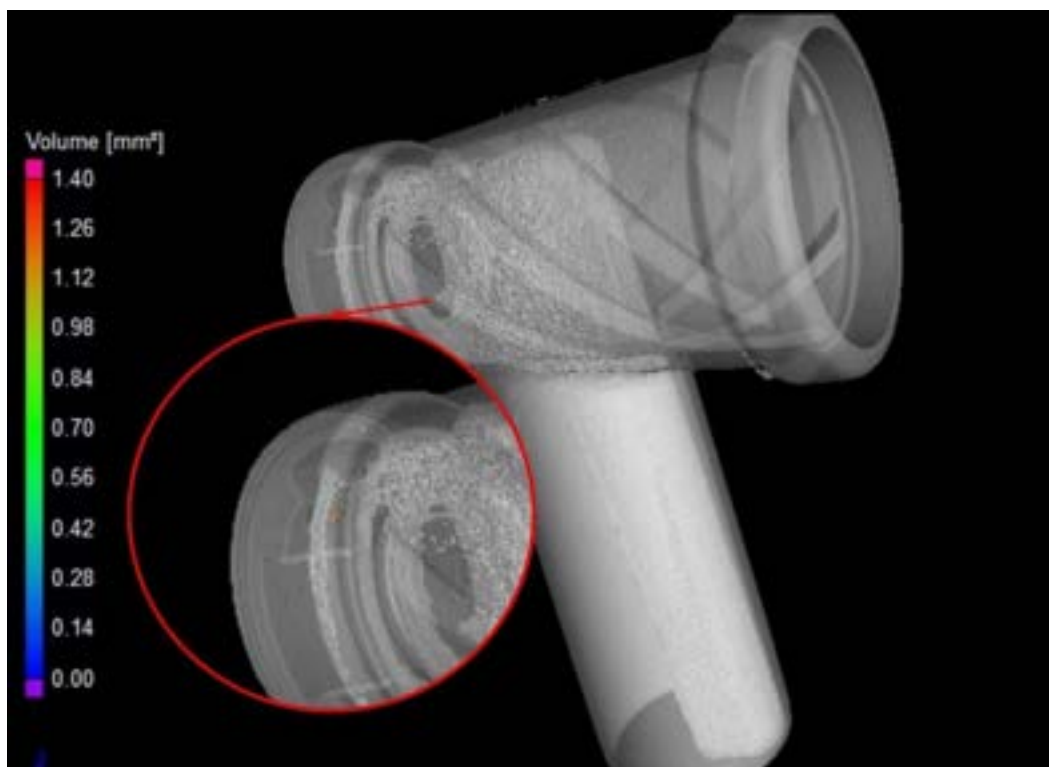
Rys. 4.48 Wlewek ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



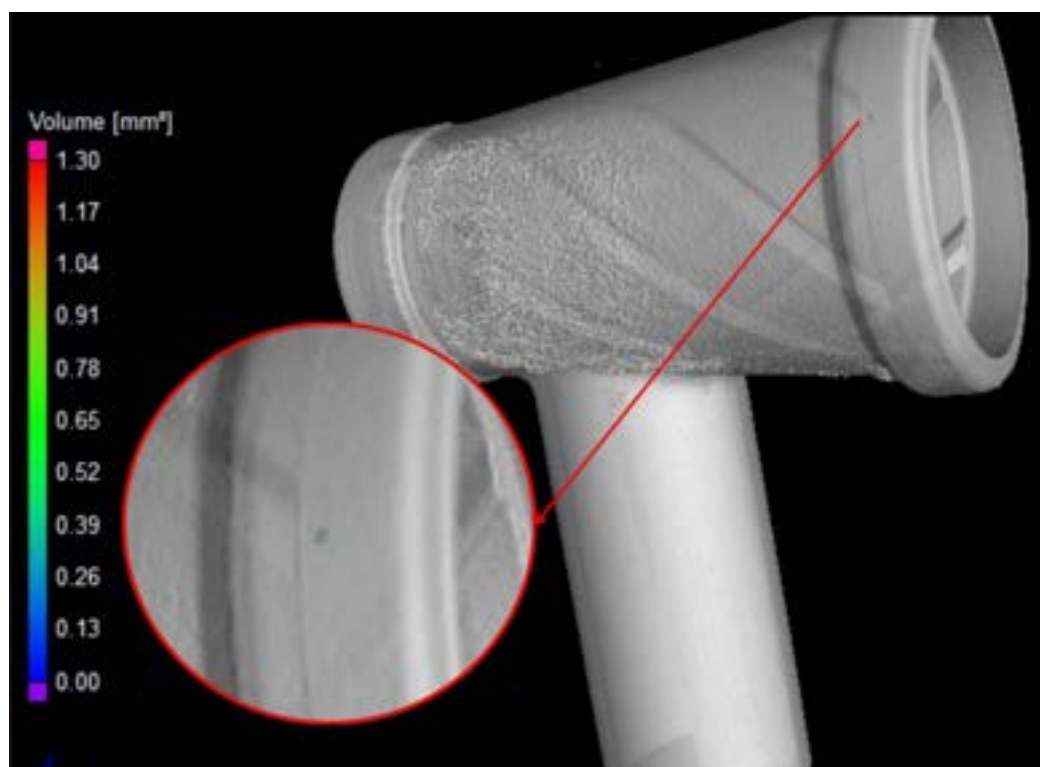
Rys. 4.49 Wlewek ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego

Tabela 4.5 Wyniki pomiarów porowatości dla odlewów ze stopu AlSi12

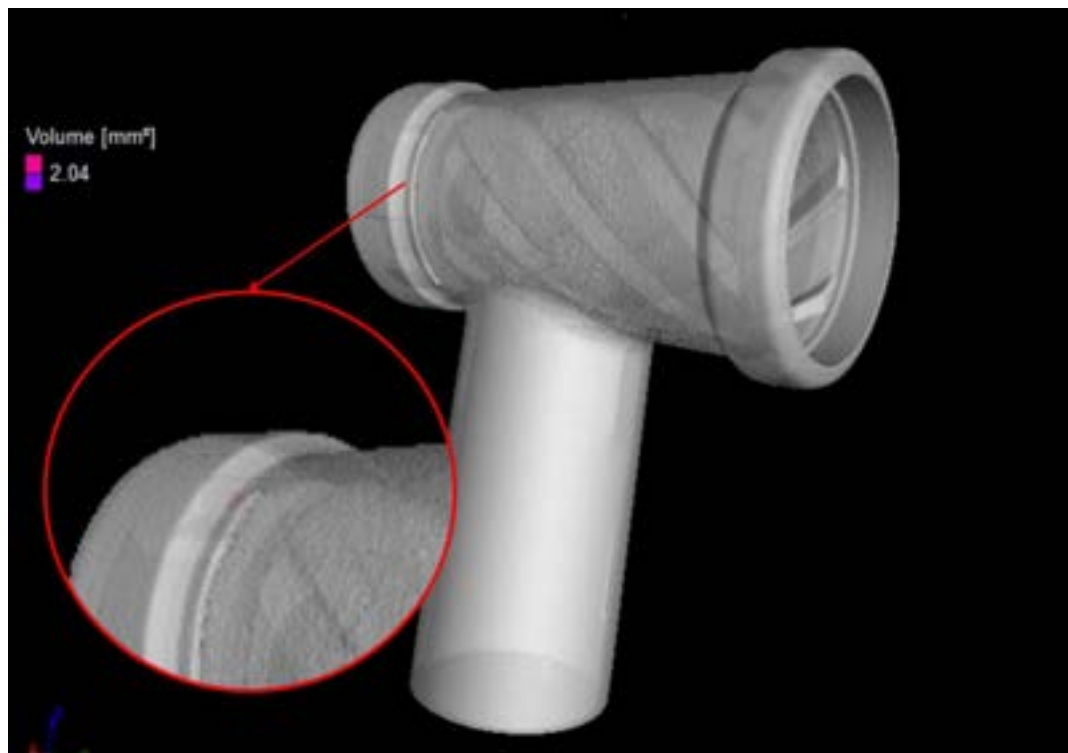
Odlewy AlSi12			
Zawartość złomu obiegowego	80%	70%	60%
Czas rafinacji (min)	Objętość największej porowatości (mm ³)	Objętość największej porowatości (mm ³)	Objętość największej porowatości (mm ³)
7	2,04	1,30	1,40
9	0,74	0,90	0,50
15	0,38	2,20	1,20



Rys. 4.50 Odlew ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



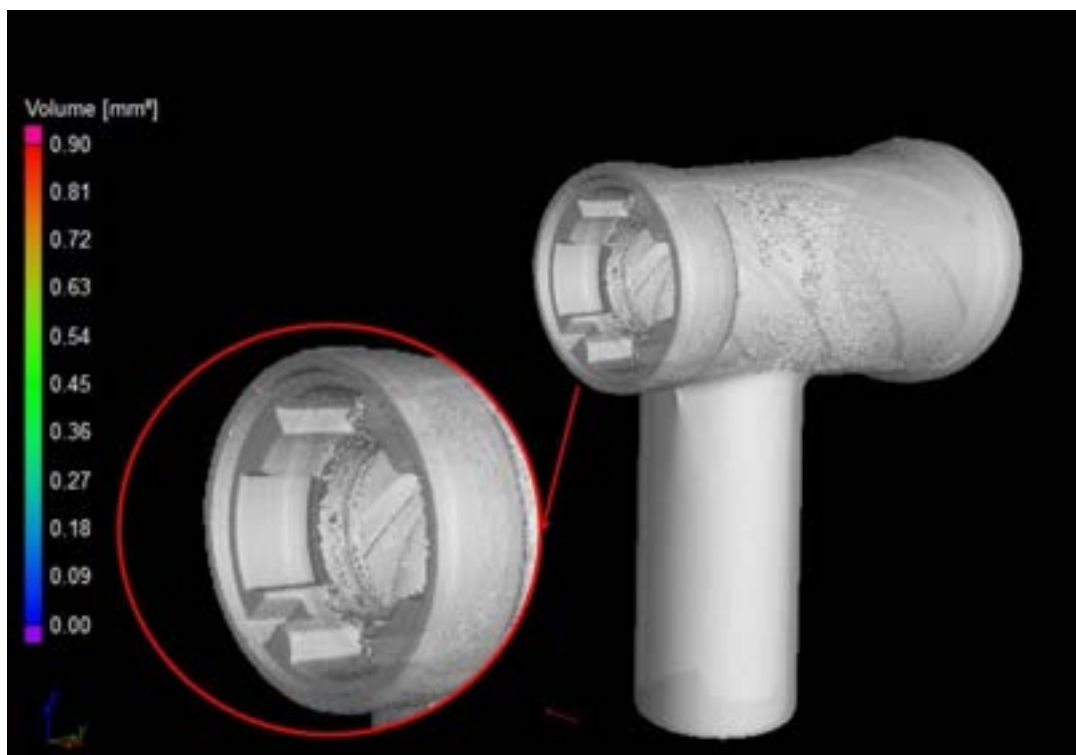
Rys. 4.51 Odlew ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



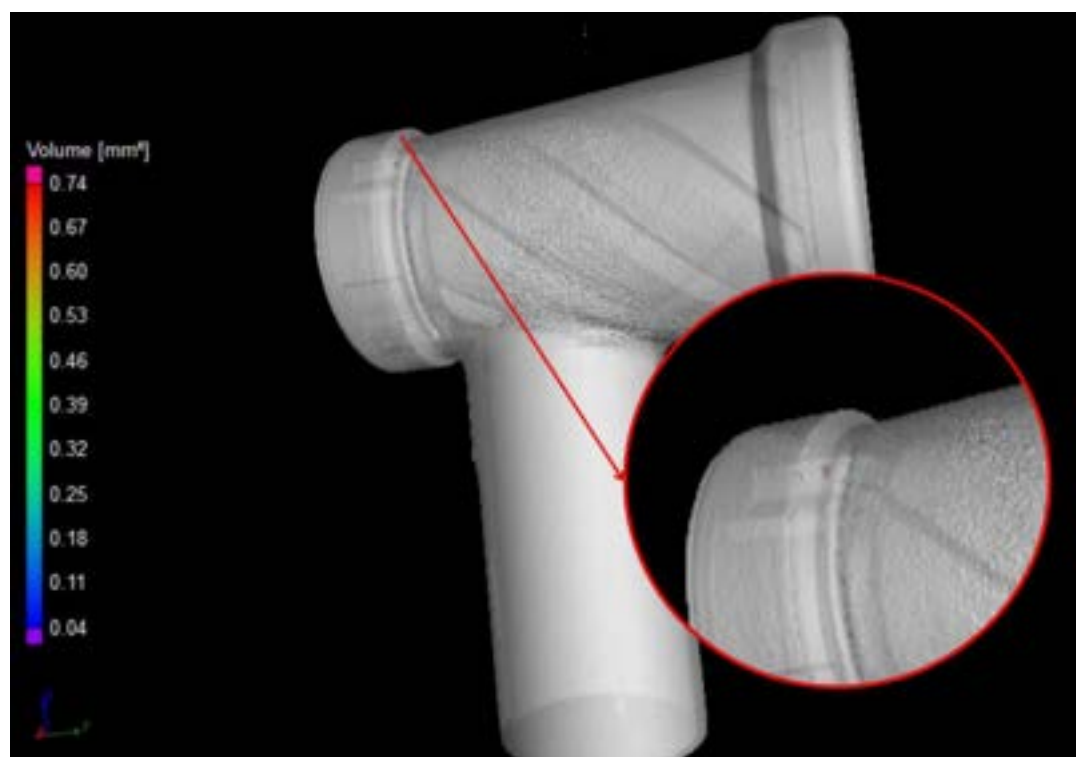
Rys. 4.52 Odlew ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4.53 Odlew ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



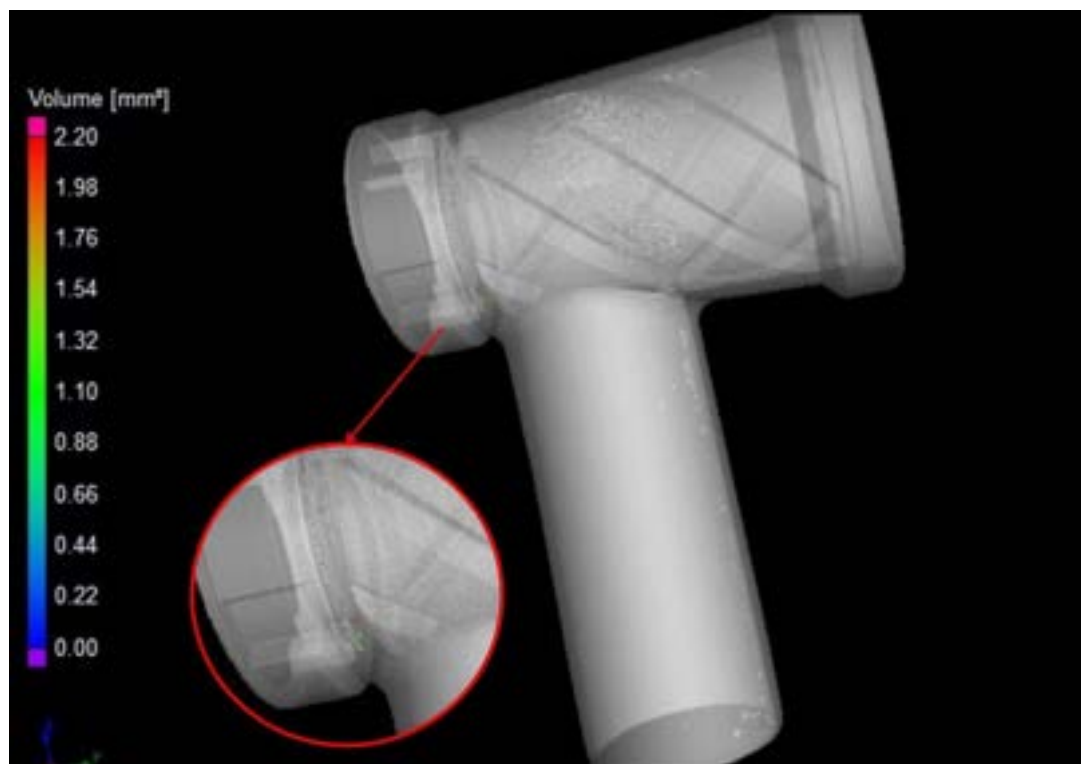
Rys. 4.54 Odlew ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



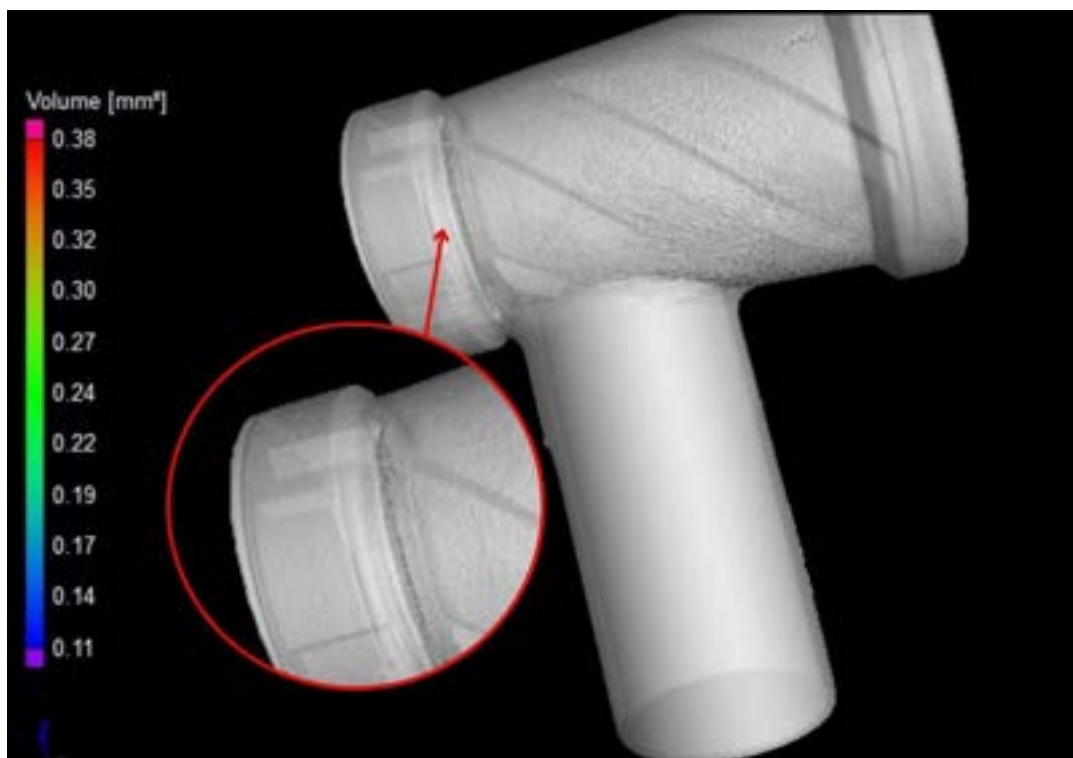
Rys. 4.55 Odlew ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4.56 Odlew ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4.57 Odlew ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4.58 Odlew ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego

Analizując zdjęcia wykonane techniką tomografii komputerowej (CT) dla wlewków i odlewów ze stopu AlSi12 przedstawione na rys. 4.41-4.58, można zauważyć znaczące różnice w rozkładzie porowatości i w stopniu zagazowania między tymi dwoma rodzajami próbek. Wlewki stopu AlSi12, poddane różnym czasom rafinacji barbotażowej i zawierające różne ilości złomu obiegowego, posiadają wyraźne różnice w objętości największej porowatości. Dla wlewków o 60% zawartości złomu obiegowego i rafinowanego przez 7 minut, objętość największej porowatości wynosiła 116,19 mm³, a stopień zagazowania 1,5% (Tabela 4.4). Dla porównania, we wlewkach o tej samej zawartości złomu obiegowego, ale rafinowanych przez 9 minut, największa porowatość nieznacznie się zmniejszyła do 107,179 mm³, a stopień zagazowania wzrósł do 1,83% (Tabela 4.4). Widać zatem, że dłuższy czas rafinacji wpływa na zmniejszenie objętości porowatości.

W odlewach ciśnieniowych obserwowano mniejsze porowatości w porównaniu do wlewków. Na przykład, dla odlewów z 60% zawartością złomu obiegowego i rafinowanych przez 9 minut, objętość największej porowatości wynosiła zaledwie 0,50 mm³ (Tabela 4.5). Porównanie to pokazuje, że odlewy ciśnieniowe charakteryzują się znacznie mniejszą porowatością w stosunku do wlewków, co wynika z lepszej kontroli procesu chłodzenia i krystalizacji w przypadku odlewania ciśnieniowego.

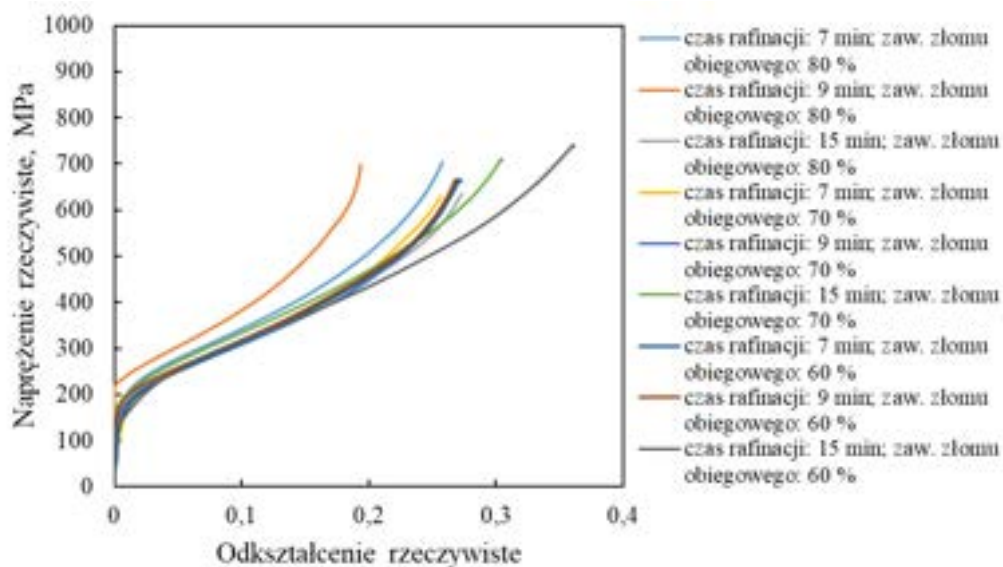
Porowatość w odlewach i wlewkach jest bezpośrednio związana z procesem krzepnięcia. We wlewkach, ze względu na wolniejsze krzepnięcie i większe rozmiary, dochodzi do intensywniejszego tworzenia się porowatości skurczowej, która lokuje się głównie w obszarach najbardziej oddalonych od powierzchni, gdzie przepływ ciepła jest najwolniejszy (rys. 4.48). Jest to związane z tym, że podczas krzepnięcia dochodzi do skurczu metalu, co może prowadzić do powstawania pustek (porowatości) w miejscach, gdzie ciecz nie zostanie dostarczona w odpowiednim tempie do zrekompensowania tego skurczu. W odlewach ciśnieniowych, dzięki szybszemu i bardziej kontrolowanemu krzepnięciu, a także mniejszym gabarytom, te efekty są znacznie mniej wyraźne (rys. 4.40).

Podsumowując, wlewki wykazują większą porowatość i stopień zagazowania, co wynika z procesu krzepnięcia oraz większych rozmiarów próbki i ich kształtu, podczas gdy odlewy ciśnieniowe, ze względu na kontrolowany proces chłodzenia i krystalizacji, mają lepsze właściwości mechaniczne oraz mniejszą porowatość.

4.1.4. Wyniki badań własności mechanicznych

4.1.4.1. Wyniki uzyskane w jednoosiowej próbie ściskania

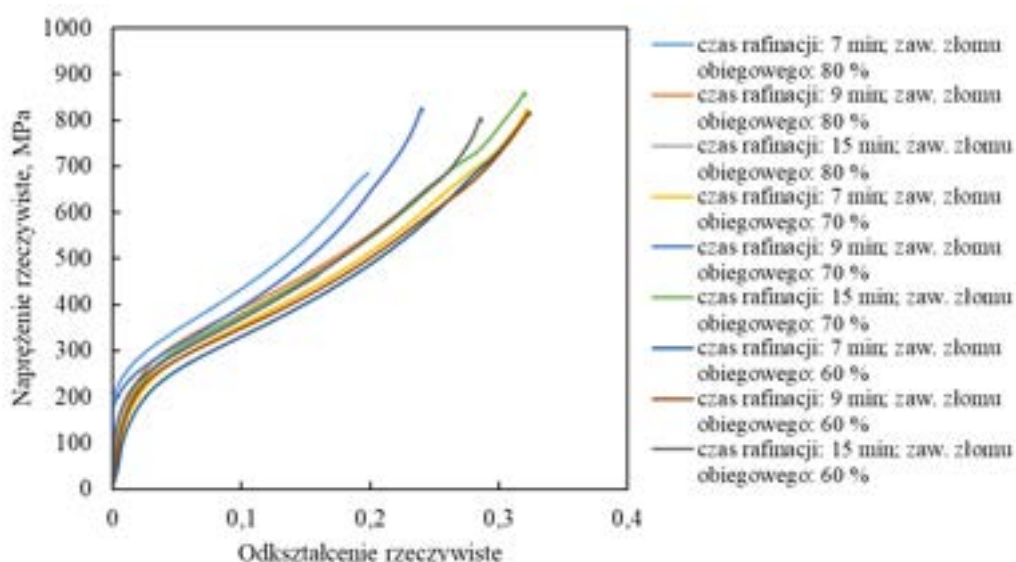
Próba jednoosiowego ściskania została przeprowadzona zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 3.7.1 Proces przerwano po osiągnięciu trwałego odkształcenia na poziomie 45 %. Analiza danych uzyskanych w ramach przeprowadzonej próby polegała na zestawieniu krzywych ściskania w układzie naprężenie rzeczywiste – odkształcenie rzeczywiste. Wyniki badań statycznej próby ściskania w zależności od czasu rafinacji i zawartości złomu obiegowego przedstawiono na rys. 4.59 oraz 4.60. Na przedstawionych wykresach badań odporności na ściskanie, widoczny jest wzrost naprężenia wraz ze wzrostem odkształcenia dla wszystkich badanych próbek. Najwyższą wytrzymałością charakteryzuje się próbka rafinowana przez 9 minut i zawierająca 80 % złomu obiegowego, z kolei najniższą, stop o zawartości 60 % złomu obiegowego rafinowany przez 15 minut.



Rys. 4.59 Charakterystyka ściskania dla wlewków ze stopu AlSi12

Analizując wyniki dla wlewków można zauważyć, że próbki z mniejszą zawartością złomu obiegowego (60%) charakteryzują się wyższym maksymalnym naprężeniem rzeczywistym oraz większą zdolnością do odkształceń. Próbki te wykazują również lepszą plastyczność, co jest widoczne w wyższym poziomie odkształcenia przy maksymalnych naprężeniach, szczególnie przy dłuższym czasie rafinacji. Próbka z 60% zawartością złomu po 15 minutach rafinacji osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 750 MPa przy odkształceniu rzeczywistym wynoszącym 0,35. Dla porównania, próbka z 80% zawartością złomu obiegowego po takim samym czasie rafinacji osiągnęła naprężenie maksymalne wynoszące około 700 MPa przy odkształceniu 0,25. To wskazuje, że zmniejszona zawartość złomu, a co za tym idzie prawdopodobnie niższa zawartość żelaza, prowadzi do większej plastyczności oraz mniejszych defektów mikrostrukturalnych. Zwiększenie zawartości złomu obiegowego ma więc negatywny wpływ na własności plastyczne materiału, co jest szczególnie widoczne dla próbki o 80% zawartości złomu obiegowego. Wydłużenie czasu rafinacji prowadzi do poprawy właściwości mechanicznych stopu, co można zaobserwować w przypadku wszystkich zawartości złomu. Próbki poddane dłuższemu czasowi rafinacji, niezależnie od zawartości złomu obiegowego, osiągają wyższe wartości naprężenia maksymalnego oraz wykazują wyższy poziom odkształceń plastycznych. Na przykład, próbka z 60% zawartością złomu, po 15 minutach rafinacji (czarna linia), osiąga naprężenie rzeczywiste około 750 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,35. Tymczasem próbka o tej samej zawartości złomu, ale po 7 minutach rafinacji (ciemnoniebieska linia), osiąga wartość

około 700 MPa przy odkształceniu 0,30. Próbkę z 80% złomu obiegowego, szczególnie po krótszym czasie rafinacji (7 minut), wykazują mniejszą zdolność do odkształceń i niższe wartości naprężenia maksymalnego. Dla przykładu, próbka z 80% złomu po 7 minutach rafinacji osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 700 MPa przy odkształceniu około 0,2, co jest znacząco niższą wartością w porównaniu do próbek z mniejszą zawartością złomu. Zauważalne różnice w rozkładzie naprężeń i odkształceń wyraźnie wpływają na lokalną wytrzymałość materiału. Próbkę o niższych wartościach naprężenia rzeczywistego, takie jak te po 15 minutach rafinacji i przy 80% zawartości złomu obiegowego, po 7 minutach rafinacji i przy 70% zawartości złomu obiegowego oraz po 7 minutach rafinacji przy 60% zawartości złomu obiegowego, mogą wykazywać obecność większych skupisk fazy krzemowej. Takie skupiska mogą działać jako zarodki pęknięcia, co skutkuje obniżeniem odporności na ściskanie. Z kolei próbki o wyższych wartościach wytrzymałości, takie jak te po 7 minutach rafinacji i przy 80% zawartości złomu obiegowego, po 9 minutach rafinacji i przy 80% zawartości złomu obiegowego, po 9 minutach rafinacji i przy 70% zawartości złomu obiegowego oraz po 15 minutach rafinacji i przy 70% zawartości złomu obiegowego, charakteryzują się bardziej równomiernym rozłożeniem cząstek krzemu w osnowie aluminiowej. Taka mikrostruktura sprzyja wyższej odporności na deformację. Najwyższe naprężenie, wynoszące niemal 750 MPa przy odkształceniu rzeczywistym 0,35, zaobserwowano w próbce po 15 minutach rafinacji i przy 60% zawartości złomu obiegowego, co sugeruje optymalną mikrostrukturę minimalizującą lokalne koncentracje naprężeń. Z kolei najniższa wytrzymałość próbki po 7 minutach rafinacji i przy 70% zawartości złomu obiegowego może wskazywać na obecność defektów strukturalnych lub niekorzystną dystrybucję faz, co obniża jej właściwości mechaniczne.



Rys. 4.60 Charakterystyka ściskania dla odlewów ze stopu AlSi12

W przypadku odlewów, próbki z mniejszą zawartością złomu obiegowego wykazują większe wartości odkształcenia rzeczywistego, co sugeruje ich wyższą plastyczność. Przykładowo, próbka rafinowana przez 15 minut, zawierająca 60% złomu obiegowego, osiągnęła maksymalne naprężenie rzeczywiste na poziomie około 875 MPa przy odkształceniu rzeczywistym wynoszącym 0,35. Dla porównania, próbka rafinowana przez 15 minut i zawierająca 80% złomu osiągnęła maksymalne naprężenie na poziomie 850 MPa przy odkształceniu 0,3. Zwiększona zawartość złomu obiegowego ma negatywny wpływ na właściwości plastyczne materiału, co szczególnie widać w próbce rafinowanej przez 7 minut, zawierającej 80% złomu, która osiągnęła naprężenie maksymalne około 775 MPa. Wydłużenie czasu rafinacji poprawia właściwości mechaniczne stopu, niezależnie od zawartości złomu. Próbki poddane dłuższej rafinacji osiągają wyższe wartości naprężenia maksymalnego i odkształcenia. Przykładowo, próbka rafinowana przez 15 minut, zawierająca 60% złomu, osiąga naprężenie na poziomie około 875 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,35, natomiast próbka rafinowana przez 7 minut, zawierająca 60% złomu, osiąga około 800 MPa przy odkształceniu 0,3. Próbki rafinowane przez 7 minut, zawierające 80% złomu, wykazują mniejszą zdolność do odkształceń i niższe wartości naprężenia maksymalnego. Na przykład, próbka rafinowana przez 7 minut, zawierająca 80% złomu, osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 775 MPa przy odkształceniu 0,25, co jest niższą wartością w porównaniu do próbek z mniejszą zawartością złomu.

Z wykresu wynika, że próbki z mniejszą zawartością złomu, takie jak te rafinowane przez 15 minut, zawierające 60% złomu, osiągają wyższe naprężenia maksymalne i większe odkształcenia, wykazując lepszą plastyczność. Próbki rafinowane przez 9 minut, zawierające 80% złomu, osiągają maksymalne naprężenie wcześniej, przy mniejszym odkształceniu, co wskazuje na ich niższą wytrzymałość na ściskanie. Różnice w rozkładzie naprężeń i odkształceń wpływają na lokalną wytrzymałość materiału. Próbki o niższych wartościach naprężenia, takie jak te rafinowane przez 15 minut, zawierające 80% złomu, rafinowane przez 7 minut, zawierające 70% złomu oraz rafinowane przez 7 minut, zawierające 60% złomu, mogą wykazywać większe skupiska fazy krzemowej, które jak już wspomniano wcześniej działają jako zarodki pękania, zmniejszając odporność na ściskanie. Próbki o wyższych wartościach wytrzymałości, takie jak te rafinowane przez 7 minut, zawierające 80% złomu, rafinowane przez 9 minut, zawierające 80% złomu, rafinowane przez 9 minut, zawierające 70% złomu oraz rafinowane przez 15 minut, zawierające 70% złomu, charakteryzują się bardziej równomiernym rozłożeniem cząstek krzemu w osnowie aluminiowej, co sprzyja wyższej odporności na deformację. Najwyższe naprężenie, osiągnięte na poziomie niemal 875 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,35, zaobserwowano w próbce rafinowanej przez 15 minut, zawierającej 60% złomu, co sugeruje optymalną mikrostrukturę minimalizującą lokalne koncentracje naprężeń. Najniższa wytrzymałość, zarejestrowana w próbce rafinowanej przez 7 minut, zawierającej 70% złomu, może wskazywać na obecność defektów strukturalnych lub niekorzystną dystrybucję faz, co obniża jej właściwości mechaniczne.

W Tabeli 4.6 przedstawiono zestawienie wartości naprężeń rzeczywistych wyznaczonych dla wszystkich rozpatrywanych wariantów wlewków oraz odlewów, jakie odpowiadają odkształceniu rzeczywistemu wynoszącemu 0,05 oraz 0,1. Odlew rafinowany przez 7 minut i zawierający 80% złomu obiegowego charakteryzował się najwyższą wytrzymałością na ściskanie zarówno przy odkształceniu 0,05 (346 MPa), jak i 0,1 (435 MPa). Dla porównania, próbka rafinowana przez 9 minut i zawierająca także 80% złomu obiegowego posiadała nieco niższą wytrzymałość: 316 MPa przy odkształceniu 0,05 oraz 391 MPa przy odkształceniu 0,1. Nadal jednak zachowuje dobre właściwości, co może sugerować korzystną mikrostrukturę. Próbki rafinowane przez 7 minut o zawartości złomu obiegowego 70% oraz 60% wykazały najniższe wartości wytrzymałości: odpowiednio 281 MPa i 258 MPa przy odkształceniu 0,05 oraz 355 MPa i 331 MPa przy odkształceniu 0,1. Może to sugerować gorszą jednorodność mikrostruktury w tych odlewach, mimo że nadal zachowują

one względnie dobre właściwości. Próbka rafinowana przez 15 minut o zawartości złomu obiegowego 80% osiągnęła wytrzymałość 297 MPa przy odkształceniu 0,05 oraz rafinowanej przez 7 minut i tej samej zawartości złomu obiegowego, ale wyższe w porównaniu z próbkami rafinowanymi przez 7 minut o zawartości złomu obiegowego 70% oraz 60%.

Tabela 4.6 Zestawienie zbiorcze wartości naprężeń dla wlewków oraz odlewów

Wariant	Wlewki		Odlewy	
	σ , MPa dla $\varepsilon=0.05$	σ , MPa dla $\varepsilon=0.1$	σ , MPa dla $\varepsilon=0.05$	σ , MPa dla $\varepsilon=0.1$
7-80	278	342	346	435
9-80	304	382	316	391
15-80	256	317	297	374
7-70	250	311	281	355
9-70	250	309	312	395
15-70	272	341	302	380
7-60	251	315	258	331
9-60	259	319	281	349
15-60	253	316	295	369

Odlewy ciśnieniowe charakteryzują się wyższą wytrzymałością na ściskanie w porównaniu do wlewków. Dowodzi to ich bardziej jednorodnej mikrostruktury, z mniejszą ilością wad, co potwierdzają wyniki badania mikrostruktury. Najwyższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie, zarówno w przypadku wlewków, jak i odlewów charakteryzują się te rafinowane przez 7 i 9 minut oraz zawierające 80 % złomu obiegowego. Najniższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie charakteryzują się z kolei próbki zawierające 60 % złomu obiegowego i również rafinowane przez 7 i 9 minut (odlewy i wlewki) (Tabela 4.6).

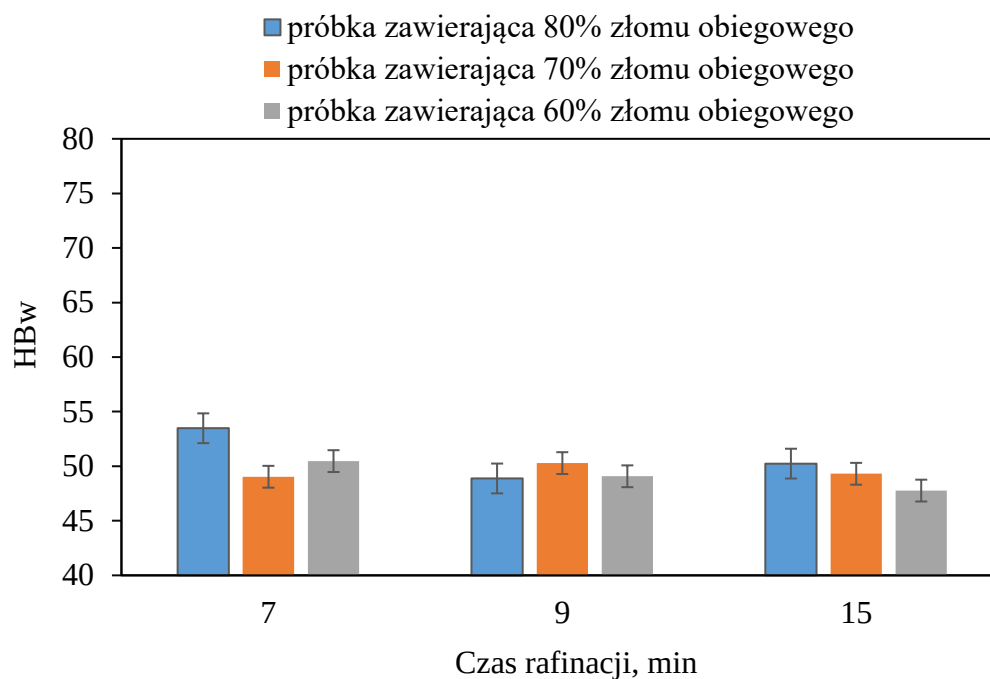
4.1.4.2. Wyniki pomiarów twardości metodą Brinella

Pomiary twardości metodą Brinella zostały przeprowadzone zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 3.7.2, zarówno dla wlewków jak i odlewów, wyniki przedstawiono na rys. 4.61 oraz rys. 4.62.

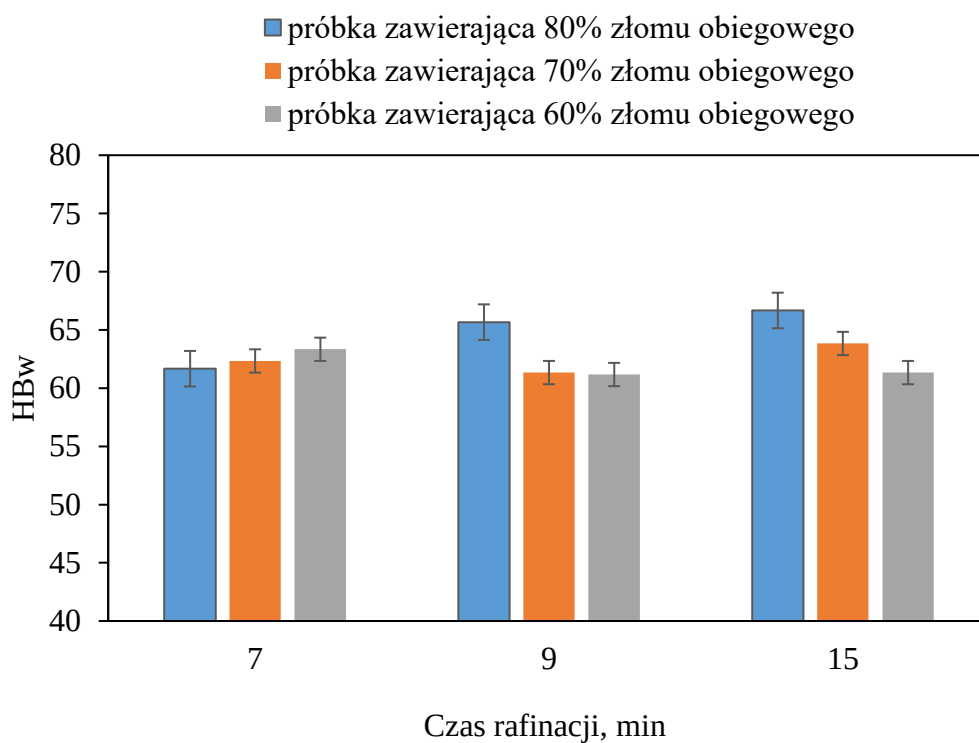
Analiza wyników pomiarów twardości wlewków metodą Brinella (rys. 4.61) dla próbek zawierających 80% złomu obiegowego wykazała, że przy czasie rafinacji wynoszącym 7 minut osiągnięto najwyższą twardość na poziomie 53 HBW. Wraz z wydłużeniem czasu rafinacji do 9 i 15 minut, twardość zmniejszyła się do około 47 HBW, co wskazuje na potencjalny negatywny wpływ dłuższej rafinacji na mikrostrukturę materiału.

Próbki zawierające w swoim składzie 70% złomu obiegowego charakteryzowały się niższą twardością w porównaniu do próbek z 80% zawartością złomu obiegowego. Po 7 minutach rafinacji twardość wyniosła około 49 HBW, dla pozostałych czasów rafinacji, twardość utrzymywała się na podobnym poziomie. Wyniki te sugerują, że niższa zawartość złomu obiegowego skutkuje niewielkim obniżeniem twardości stopu, a dalsze wydłużenie czasu rafinacji ma jedynie marginalny wpływ na jej zmianę.

Najniższą twardość posiadały próbki zawierające w swoim składzie 60% złomu obiegowego. Po rafinacji przez 7 minut twardość wyniosła około 50 HBW, a dla czasów 9 i 15 minut utrzymywała się na zbliżonym poziomie, wynoszącym około 48 HBW. Wyniki wskazują, że w przypadku stopu o najniższej zawartości złomu obiegowego zarówno czas rafinacji, jak i sama zawartość złomu obiegowego mają mniejszy wpływ na zmiany twardości, w porównaniu do stopów o wyższej zawartości złomu (rys. 4.61). Największe różnice obserwowane są w próbkach rafinowanych przez 7 minut, gdzie twardość jest wyższa w porównaniu do próbek rafinowanych przez 9 i 15 minut. Ogólny trend wskazuje na spadek twardości w miarę wydłużania czasu rafinacji, jednak zmiany te są stosunkowo niewielkie.



Rys. 4.61 Wyniki pomiarów twardości metodą wlewków wykonanych ze stopu AlSi12



Rys. 4.62 Wyniki pomiarów twardości odlewów wykonanych ze stopu AlSi12

Dla odlewów o zawartości 80% złomu obiegowego (rys. 4.62), twardość jest zauważalnie wyższa w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla wlewków. Po czasie rafinacji wynoszącym 7 minut twardość wyniosła około 60 HBW, a następnie wzrosła do około 65 HBW po 9 i 15 minutach rafinacji. Sugeruje to, że wyższa zawartość złomu obiegowego oraz dłuższy czas rafinacji korzystnie wpływają na wzrost twardości odlewów. Dla odlewów zawierających w swoim składzie 70 % złomu obiegowego twardość jest niższa w porównaniu do stopu zawierającego 80 % złomu. Twardość wyniosła około 58 HBW po 7 minutach rafinacji i nieznacznie wzrosła do około 60 HBW po 9 i 15 minutach. Z kolei stop o najmniejszej zawartości złomu obiegowego charakteryzował się najniższą twardością, zarówno w przypadku wlewków, jak i odlewów. Twardość wyniosła około 55 HBW po 7 minutach rafinacji i pozostała na tym samym poziomie po 9 i 15 minutach rafinacji, co wskazuje na mniejszy wpływ wydłużenia czasu rafinacji na twardość przy niższej zawartości złomu.

Wyniki dowodzą, że twardość odlewów ciśnieniowych wzrasta wraz z wydłużeniem czasu rafinacji, co kontrastuje z wynikami uzyskanymi dla wlewków (rys. 4.61), gdzie wydłużenie czasu rafinacji prowadziło do obniżenia twardości. Dla wszystkich badanych próbek stop zawierający w swoim składzie 80% złomu obiegowego osiąga najwyższe wartości twardości dla każdego czasu rafinacji, z wyraźnym wzrostem twardości po 9 i 15 minutach rafinacji. W obu przypadkach zwiększona zawartość złomu obiegowego (80%) skutkuje najwyższą twardością, co potwierdza wcześniejsze obserwacje, z tym że różnice są bardziej wyraźne dla odlewów.

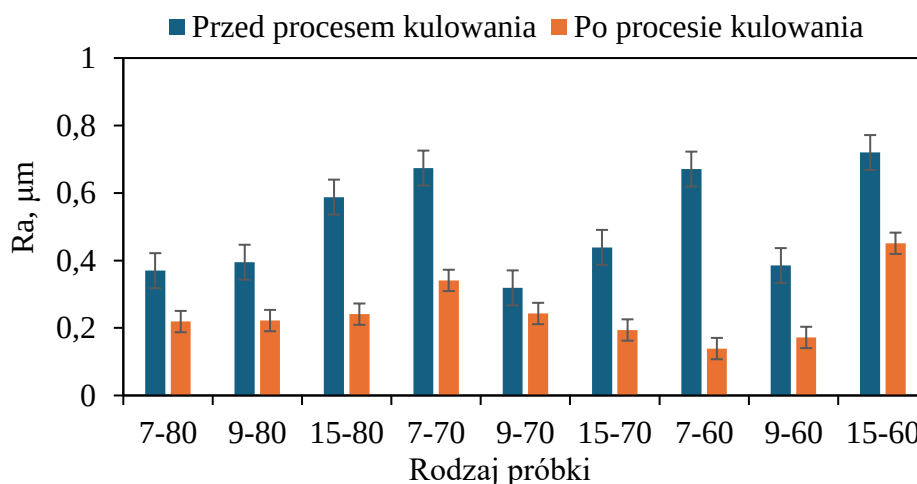
Podsumowując, zaobserwowano że dla odlewów wyższa zawartość złomu obiegowego oraz dłuższy czas rafinacji prowadzą do wzrostu twardości, podczas gdy dla wlewków dłuższy czas rafinacji wiązał się z obniżeniem twardości.

4.1.5. Wyniki pomiarów chropowatości odlewów

Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej (R_a) to jedna z najczęściej stosowanych miar chropowatości powierzchni. Określa średnią wartość bezwzględną odchylenia profilu od linii średniej na badanym odcinku. Wyższe wartości R_a wskazują na większą chropowatość powierzchni. Natomiast wskaźnik wysokości chropowatości według dziesięciu punktów profilu (R_z) mierzy różnicę między maksymalną

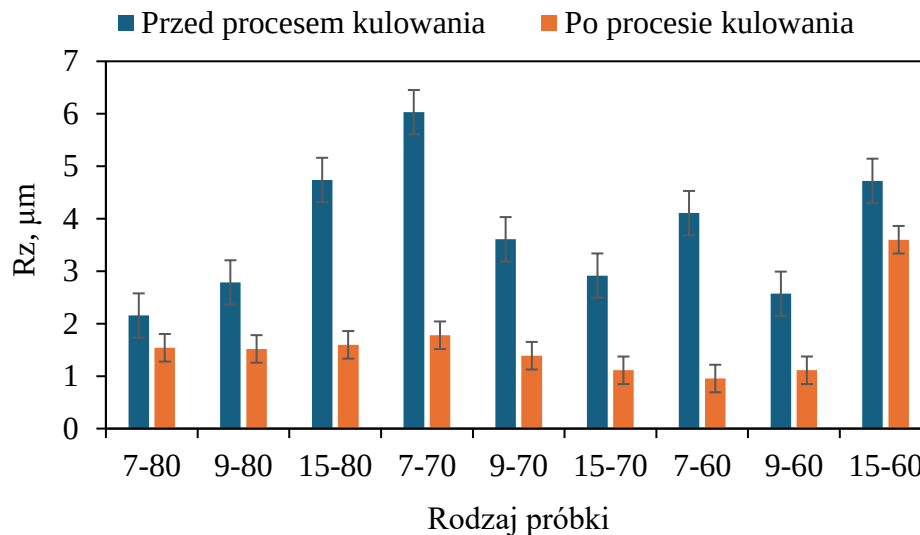
i minimalną wysokością chropowatości na badanym odcinku, co pozwala na ocenę skrajnych odchylen profilu.

Na rysunku 4.63 zamieszczono wykres przedstawiający wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości od linii średniej (R_a) dla odlewów przed i po procesie kulowania, z kolei na rys. 4.64 wartości wysokości chropowatości R_z .



Rys. 4.63 Wykres ilustrujący wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości od linii średniej (R_a) dla odlewów przed i po procesie kulowania; oś X przedstawia różne warianty procesu rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego, oś Y przedstawia wartości R_a wyrażone w mikrometrach

Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej przed kulowaniem wynosiło w zależności od wariantu: 0,73 μm (przed procesem rafinacji), 0,70 μm (dla 7 minut rafinacji), 0,75 μm (dla 9 minut rafinacji) oraz 0,66 μm (dla 15 minut rafinacji). Wartości te wskazują na umiarkowaną chropowatość powierzchni. Największą chropowatość powierzchni zaobserwowano dla odlewów rafinowanych przez 9 minut, co może być wynikiem intensywniejszego wpływu rafinacji barbotażowej w tej próbce. Z kolei po procesie kulowania wartości R_a zmalały: 0,14 μm (dla 7 minut rafinacji), 0,13 μm (dla 9 minut rafinacji) oraz 0,17 μm (dla 15 minut rafinacji), co wskazuje na znaczną poprawę gładkości powierzchni odlewów. Wyniki te potwierdzają, że kulowanie skutecznie wygładza powierzchnię odlewów, niezależnie od czasu rafinacji.



Rys. 4.64 Wysokość chropowatości odlewów według dziesięciu punktów profilu; oś X przedstawia różne warianty procesu rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego, oś Y przedstawia wartości Rz wyrażone w mikrometrach

Rysunek 4.64 przedstawia wartości Rz, które są wyraźnie wyższe od Ra, co sugeruje, że powierzchnie odlewów przed kulowaniem miały głębsze i bardziej wyraźne nierówności. Przed kulowaniem wartości Rz wynosiły: 5,61 μm (przed procesem rafinacji), 6,06 μm (dla 7 minut rafinacji), 5,04 μm (dla 9 minut rafinacji) oraz 7,26 μm (dla 15 minut rafinacji). Wartości te wskazują, że największe defekty powierzchniowe wystąpiły w odlewach rafinowanych przez 15 minut, co może być wynikiem większej liczby wad powierzchniowych spowodowanych przez przedłużony proces rafinacji. Po kulowaniu wartości te znacząco spadły: 2,74 μm (dla 7 minut rafinacji), 2,37 μm (dla 9 minut rafinacji) oraz 3,24 μm (dla 15 minut rafinacji), co wskazuje na redukcję nierówności powierzchni.

Analizując obydwa wykresy, można zauważyć, że proces kulowania w znacznym stopniu wpływa na redukcję chropowatości, co wyrażone jest zarówno przez Ra, jak i Rz. Szczególnie widoczny jest spadek Ra, co wskazuje na ogólną poprawę gładkości powierzchni. Z kolei spadek wartości Rz po kulowaniu wskazuje na zmniejszenie się najbardziej wyraźnych nierówności na powierzchni odlewów. Proces kulowania jest szczególnie efektywny dla odlewów rafinowanych przez 9 minut, gdzie zaobserwowano największą poprawę zarówno pod względem Ra, jak i Rz. W przypadku odlewów rafinowanych przez 15 minut, pomimo zauważalnej redukcji chropowatości, wartości Rz po kulowaniu były wyższe niż dla odlewów rafinowanych przez krótszy czas, co może

sugerować, że dłuższy czas rafinacji prowadzi do powstawania defektów powierzchniowych.

4.2. Wyniki badania wlewków i odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi9Cu3

W tym rozdziale zestawiono wyniki badań uzyskane dla wlewków i odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi9Cu3.

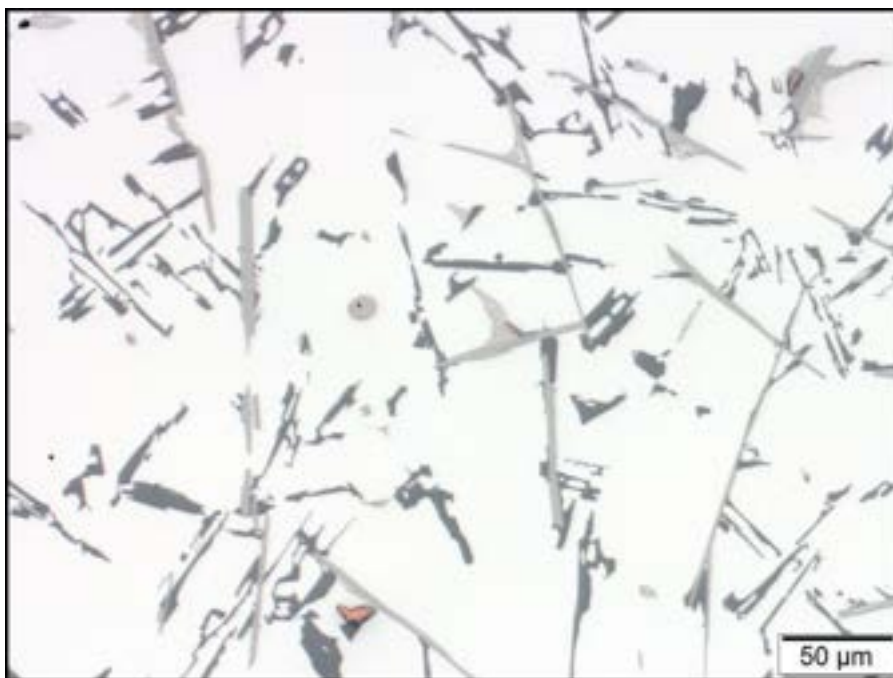
4.2.1. Wyniki badania mikrostruktury próbek

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań mikrostruktury stopu AlSi9Cu3 oraz przedstawiono wyniki mikroanalizy EDS, które umożliwiły identyfikację faz obecnych w stopie. Podobnie, jak w przypadku prowadzonych obserwacji mikrostrukturalnych dla stopu AlSi12, również dla stopu z dodatkiem miedzi, badania uzupełniono o analizę statystyczną faz obecnych w mikrostrukturze.

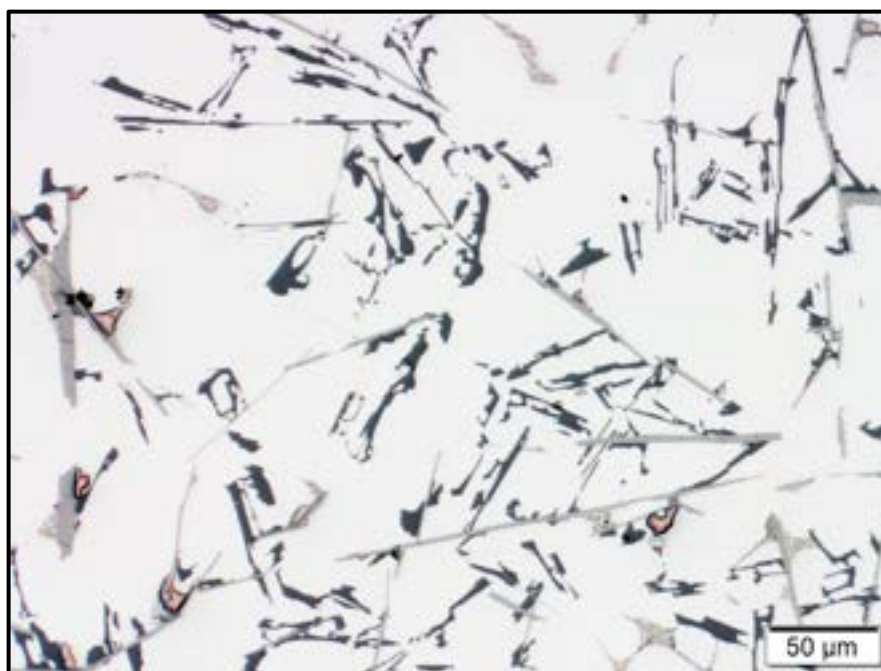
Zdjęcia mikrostruktury wlewków wykonane przy wykorzystaniu mikroskopu świetlnego przedstawiono na rysunkach 4.65-4.73, z kolei odlewów na rysunkach 4.74-4.82.



Rys. 4.65 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



Rys. 4.66 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



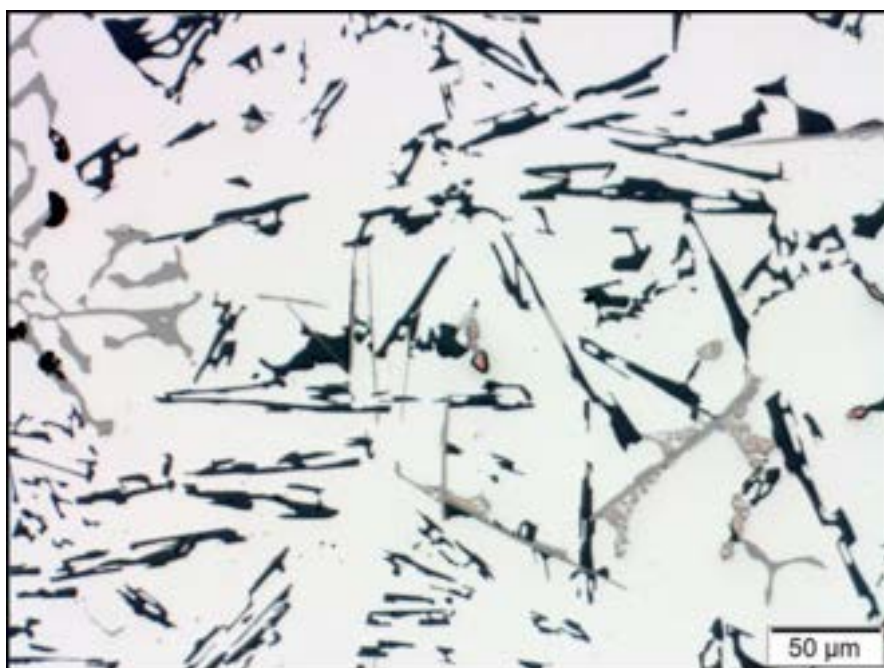
Rys. 4.67 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



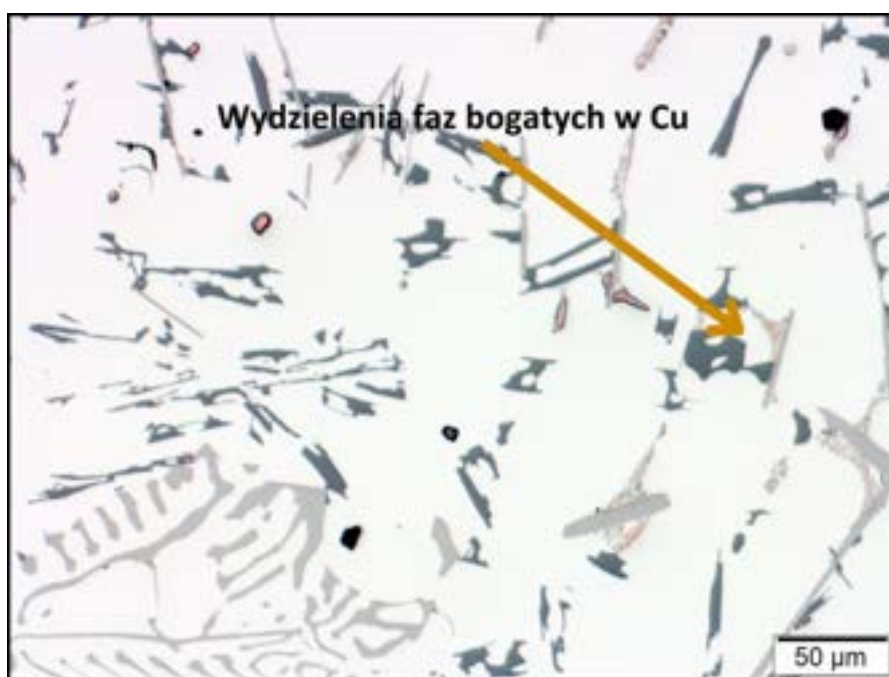
Rys. 4.68 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



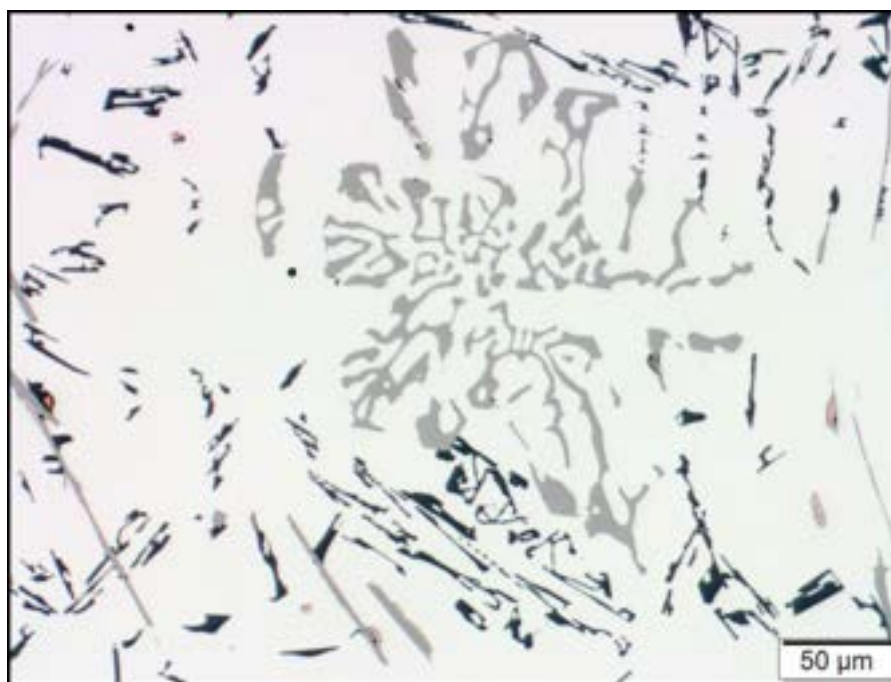
Rys. 4.69 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



Rys. 4.70 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



Rys. 4.71 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



Rys. 4.72 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%

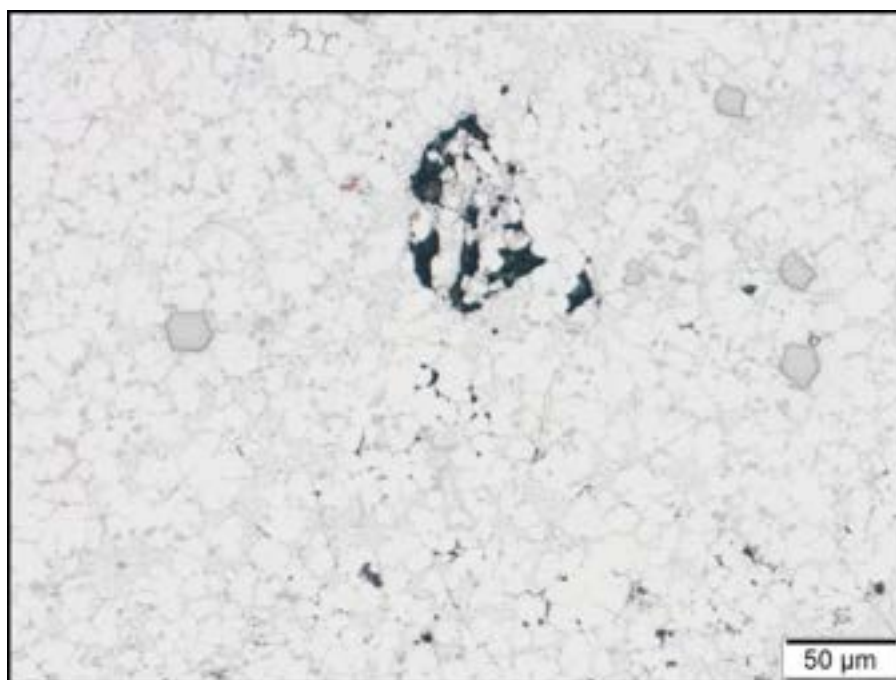


Rys. 4.73 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%

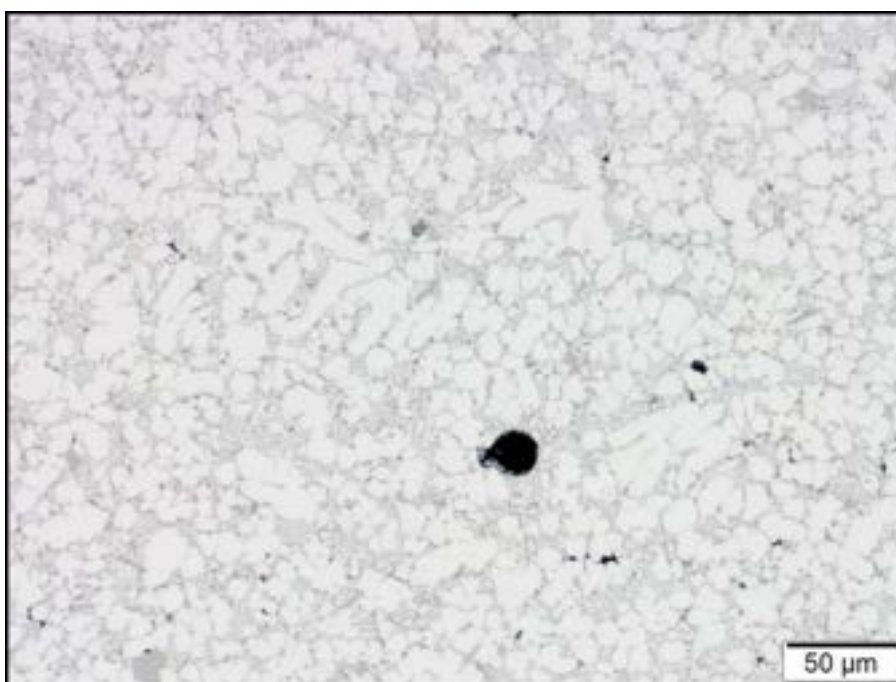
Analiza mikrostruktury koncentrowała się przede wszystkim na wpływie zawartości złomu obiegowego oraz czasu rafinacji na morfologię wydzielen krzemu oraz faz międzymetalicznych, głównie bogatych w Cu, Fe i Mn. W przypadku krótszych czasów rafinacji oraz większej zawartości złomu obiegowego (rys. 4.66, 4.67), w mikrostrukturze obecna jest większa ilość wydzielen krzemu o kształcie iglastym oraz nieregularne wydzielania faz bogatych w Fe, a także faz bogatych w Cu. W miarę wydłużania czasu rafinacji, mikrostruktura staje się bardziej jednorodna, co ilustrują rysunki 4.70–4.73, gdzie widoczne są mniejsze i bardziej równomiernie rozmieszczone wydzielania fazy krzemowej. Dodatek miedzi w stopie AlSi9Cu3 znacząco wpływa na kształt i rozmiar wydzielen oraz obecność dodatkowych faz międzymetalicznych. Miedź tworzy związki międzymetaliczne z aluminium (np. fazy Al_2Cu w stopach niemodyfikowanych), które są widoczne w mikrostrukturze wlewków, szczególnie przy wyższych zawartościach złomu obiegowego i dłuższym czasie rafinacji. Na zdjęciach mikrostruktury przedstawionych na rysunkach 4.67 i 4.68 można zauważyć wydłużone wydzielania bogate w miedź, które zwiększają twardość stopu, jednocześnie obniżając jego plastyczność. Związki międzymetaliczne tworzą się głównie w regionach między dendrytami fazy α , co prowadzi do niejednorodności mechanicznej stopu. Jak opisuje Abdulsahib i wsp. [20], dodatek miedzi do stopu Al-Si powoduje istotne zmiany w mikrostrukturze, próbki z dodatkiem 1%, 2% i 3% miedzi wykazywały obecność fazy Al_2Cu , pojawiającej się między dendrytami oraz w postaci eutektyki. Podobnie jak w przypadku stopów AlSi12 , w wlewkach ze stopu AlSi9Cu3 występują również fazy bogate w żelazo (Fe), takie jak faza $\beta\text{-Fe}$ (Al_5FeSi), które przybierają formę iglastą lub płytkową (jak pokazano na rys. 4.65 i rys. 4.66). Obecność tych faz, w połączeniu z wydzieleniami zawierającymi miedź, negatywnie wpływa na plastyczność stopu, zwiększając jego kruchość. Większa zawartość złomu obiegowego sprzyja tworzeniu się większej ilości tych faz, co bardzo dobrze ilustrują zdjęcia przedstawione na rysunkach 4.71 i 4.73. Dodatek miedzi wzmacnia te efekty, powodując powstawanie twardych wydzielen międzymetalicznych, które obniżają odporność materiału na pękanie. Wydłużony czas rafinacji przyczynia się do rozdrobnienia mikrostruktury i poprawy jednorodności, co jest widoczne na rysunkach 4.69 i 4.73. Widoczne w mikrostrukturze wydzielania w kształcie „pisma chińskiego” są najbardziej charakterystyczne dla próbek z większą zawartością złomu obiegowego, co szczególnie dobrze widać na zdjęciach przedstawionych na rys. 4.70 oraz 4.73. Wydzielania te to przede

wszystkim faza Al_5FeSi oraz, w niektórych przypadkach także faza $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$, która przyjmuje morfologię przypominającą 'pismo chińskie'[68]. Faza ta powstaje w warunkach, gdy w stopie obecna jest miedź i magnez tak jak wykazuje rysunek 4.92. Wraz z wydłużeniem czasu rafinacji, następuje ujednorodnienie mikrostruktury, a wydzielania te zmieniają morfologię, ich ilość także ulega zmniejszeniu. Przykładowo, próbki zawierające 80% złomu obiegowego i rafinowane przez 7 minut posiadają w mikrostrukturze najwięcej nieregularnych wydzieleni, w tym fazy $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$, które tworzą się z uwagi na bogaty skład chemiczny i mniejszy stopień rafinacji. Z kolei przy 60% zawartości złomu i czasie rafinacji wynoszącym 15 minut, w mikrostrukturze tylko lokalnie widoczne są duże wydzielania faz Al_5FeSi oraz $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$. W wyniku procesu rafinacji nastąpiła zmiana morfologii, wielkości i ilości tych faz.

Na rysunkach 4.74–4.82 przedstawiono zdjęcia mikrostruktury odlewów ciśnieniowych, które wykazują podobną tendencję, jak w przypadku wlewków. Krótsze czasy rafinacji sprzyjają występowaniu zwiększonej ilości wydzieleni krzemowych i nieregularnych faz międzymetalicznych. Na rysunku 4.74 przedstawiono próbkę z 60% zawartością złomu obiegowego, gdzie fazy krzemowe są wyraźnie widoczne i mniej równomiernie rozmieszczone. W miarę wydłużania czasu rafinacji do 9 i 15 minut (rys. 4.77–4.82), mikrostruktura staje się bardziej jednorodna, co wpływa pozytywnie na właściwości mechaniczne odlewów. Podobnie jak w przypadku wlewków ze stopu AlSi9Cu3 , w mikrostrukturze odlewów ciśnieniowych obecne są fazy bogate w żelazo, głównie $\beta\text{-Fe}$ (Al_5FeSi), które występują w formie wydłużonych lub płytkowych wydzieleni. Jak już wspomniano, fazy te mogą negatywnie wpływać na plastyczność stopu, szczególnie przy wyższych zawartościach złomu obiegowego (rys. 4.76, 4.77) gdzie obecne są wydzielania faz międzymetalicznych, głównie bogatych w żelazo (Fe). W szczególności faza $\beta\text{-Fe}$ (Al_5FeSi) występuje w postaci wydłużonych lub płytkowych form. Wspomniane fazy międzymetaliczne są szczególnie liczne w próbkach o wyższej zawartości złomu obiegowego i krótszym czasie rafinacji, co pogarsza jednorodność mikrostruktury. Wydłużenie czasu rafinacji redukuje ilość tych faz, co ilustrują wyniki pokazane na rysunkach 4.80–4.82 [15, 16].



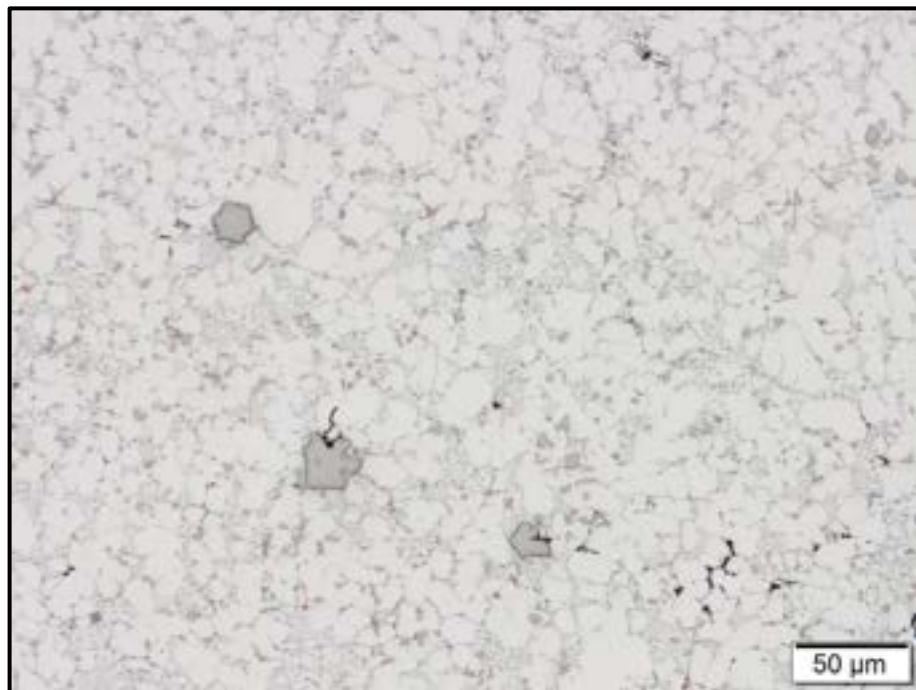
Rys. 4.74 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



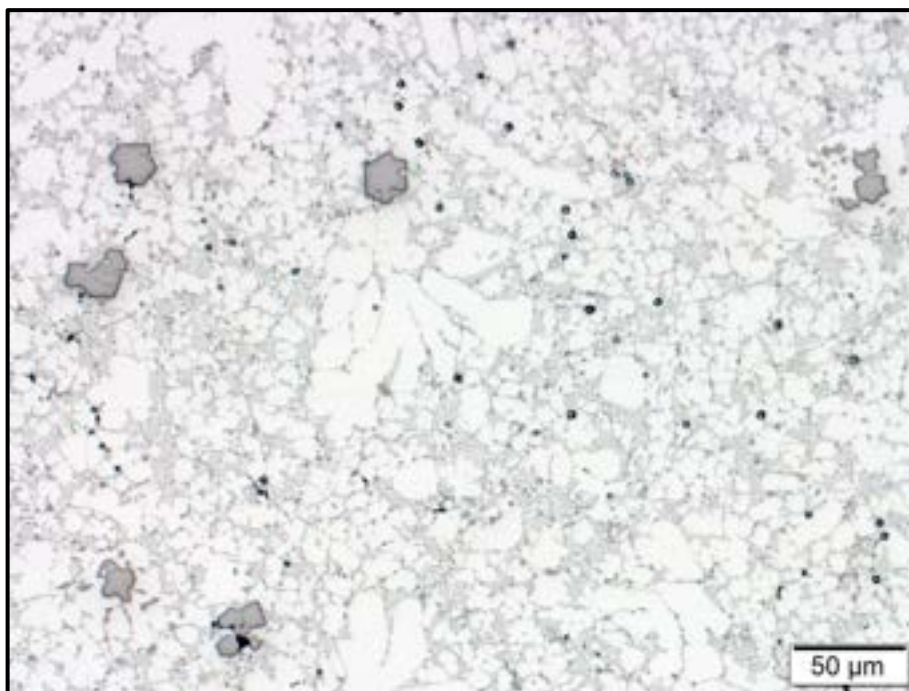
Rys. 4.75 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



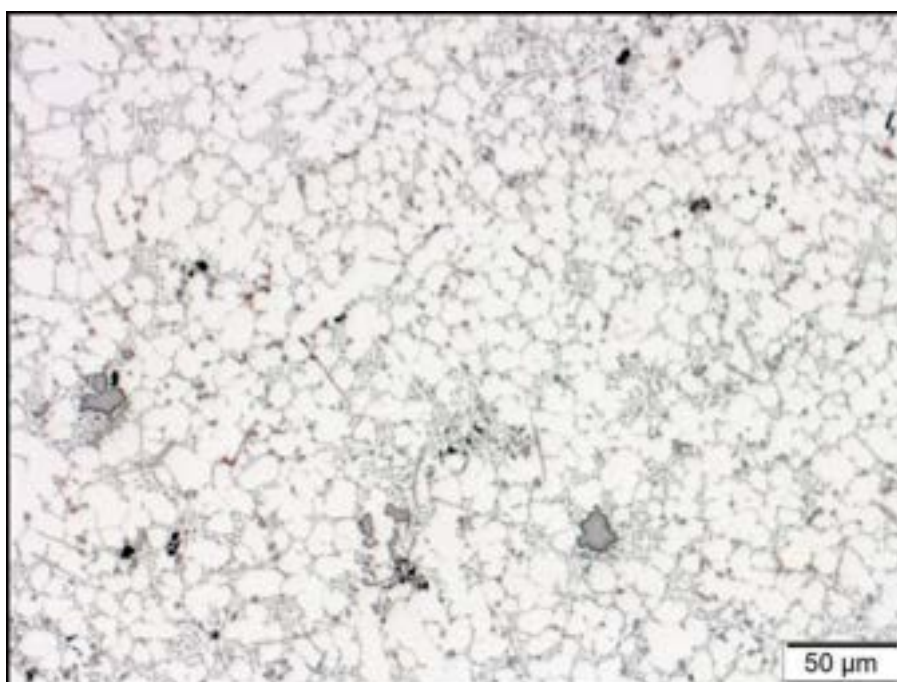
Rys. 4.76 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



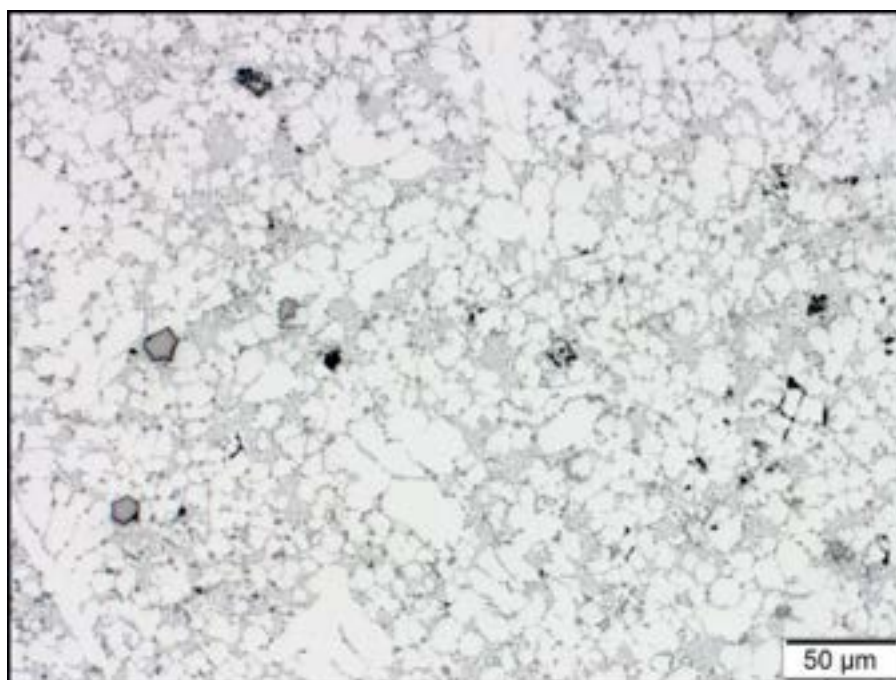
Rys. 4.77 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



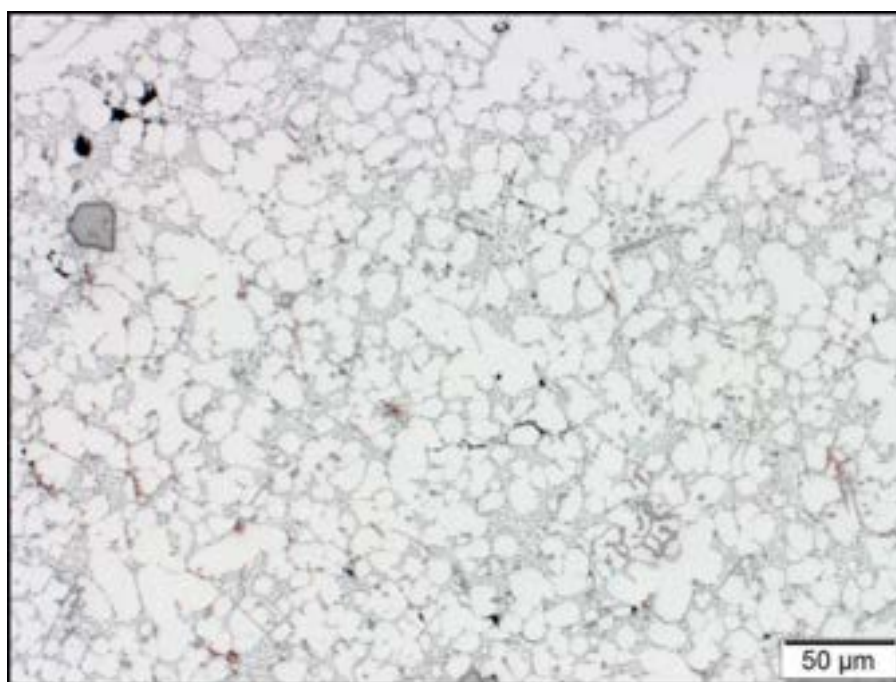
Rys. 4.78 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



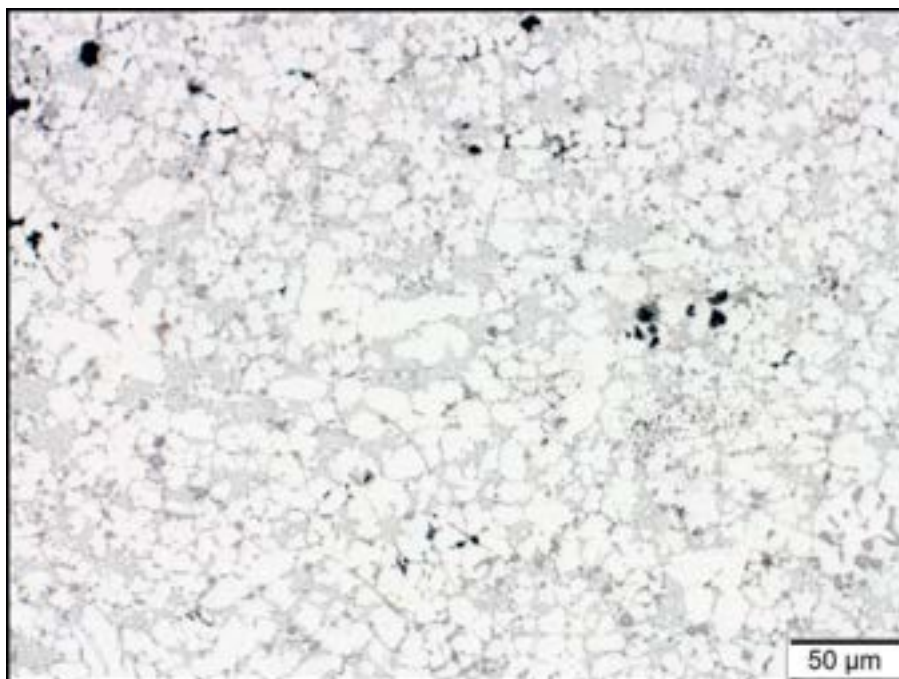
Rys. 4.79 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%



Rys. 4.80 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%



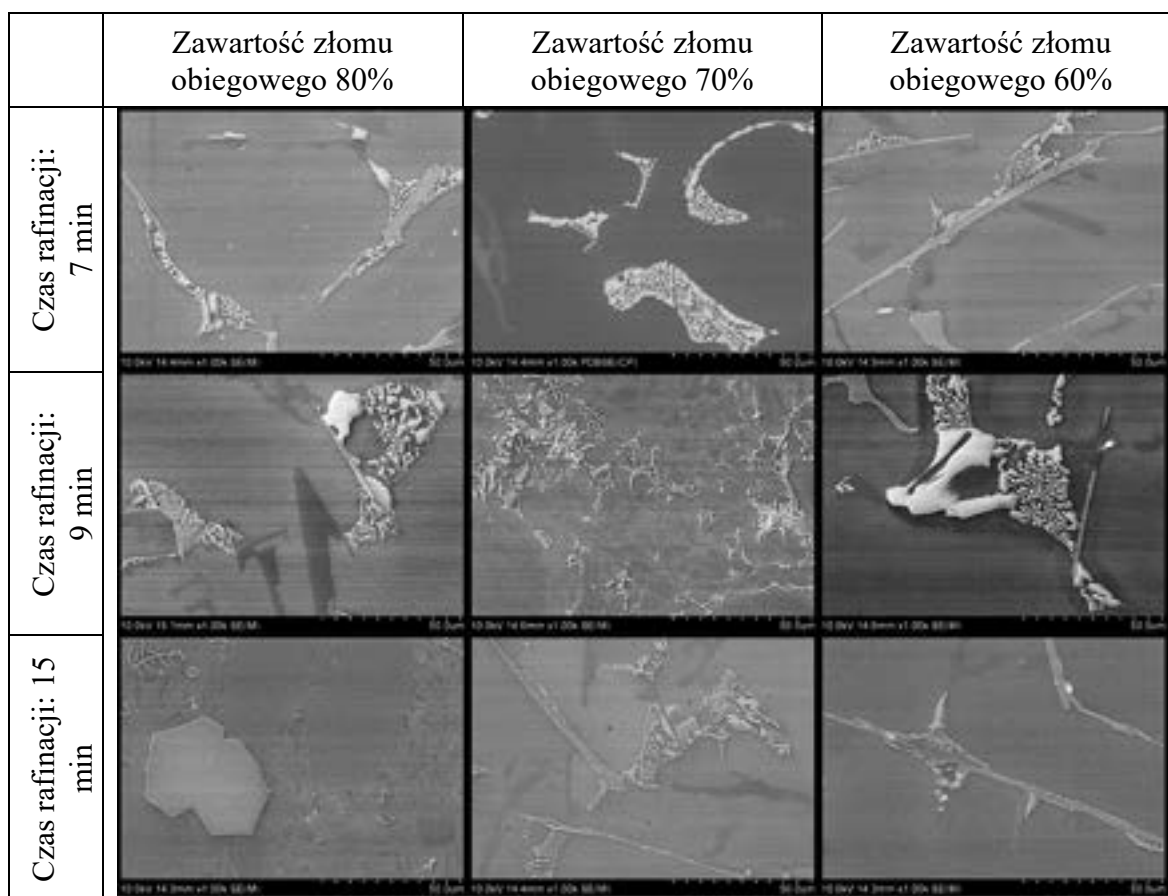
Rys. 4.81 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



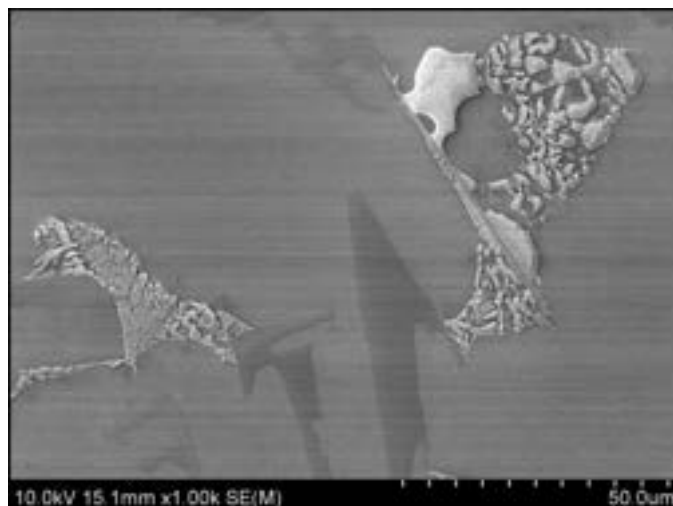
Rys. 4.82 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%

W odlewach ze stopu AlSi9Cu3 eutektyka jest drobnoziarnista, a ziarna roztworu stałego α przyjmują globularną formę. Wydzielenia bogate w żelazo charakteryzują się odmienną morfologią w porównaniu do stopu AlSi12 – mają one regularny kształt i rozmiar w przedziale od 1 do 10 μm . Wydzielenia bogate w miedź są częściowo zbliżone do globularnych, częściowo mają wydłużony kształt, są rozmieszczone w miarę równomiernie w mikrostrukturze stopów. Lokalnie w mikrostrukturze widoczne są także drobne pory. Mikrostruktura w odlewach jest bardziej rozdrobniona niż we wlewkach, a także bardziej rozdrobniona niż w przypadku stopu AlSi12.

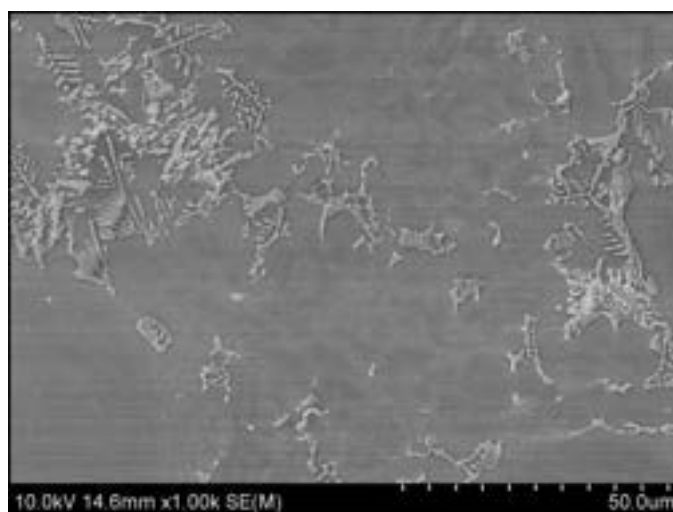
Na rysunkach 4.83 - 4.92 zaprezentowano charakterystyczne obrazy mikrostruktury uzyskane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, odpowiednio dla wlewków i odlewów wykonanych ze stopu AlSi9Cu3. Zdjęcia mikrostruktury wlewków zamieszczono na rysunkach 4.83-4.86, z kolei odlewów na rysunkach 4.87-4.90. W celu szczegółowej analizy mikrostruktury i określenia składu chemicznego wydzieleni i osnowy, wykonano mapy rozkładu pierwiastków w wybranych charakterystycznych obszarach mikrostruktury, które dla wybranych wariantów przedstawiono na rys. 4.91 oraz rys. 4.92.



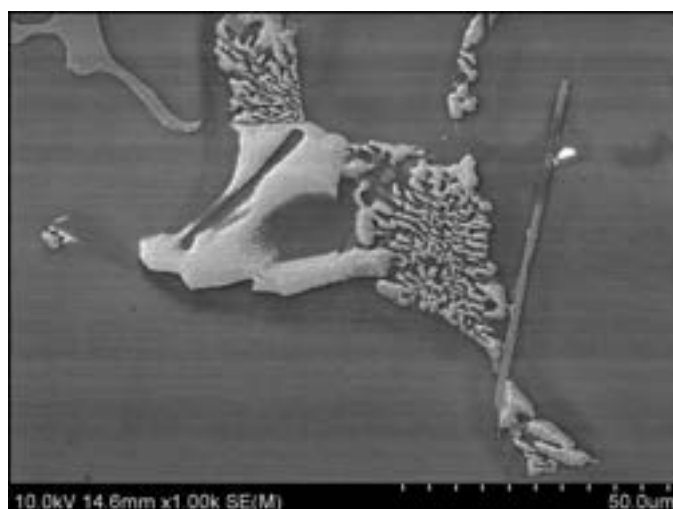
Rys. 4.83 Zestawienie zdjęć mikrostruktury wlewków ze stopu AlSi9Cu3 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM



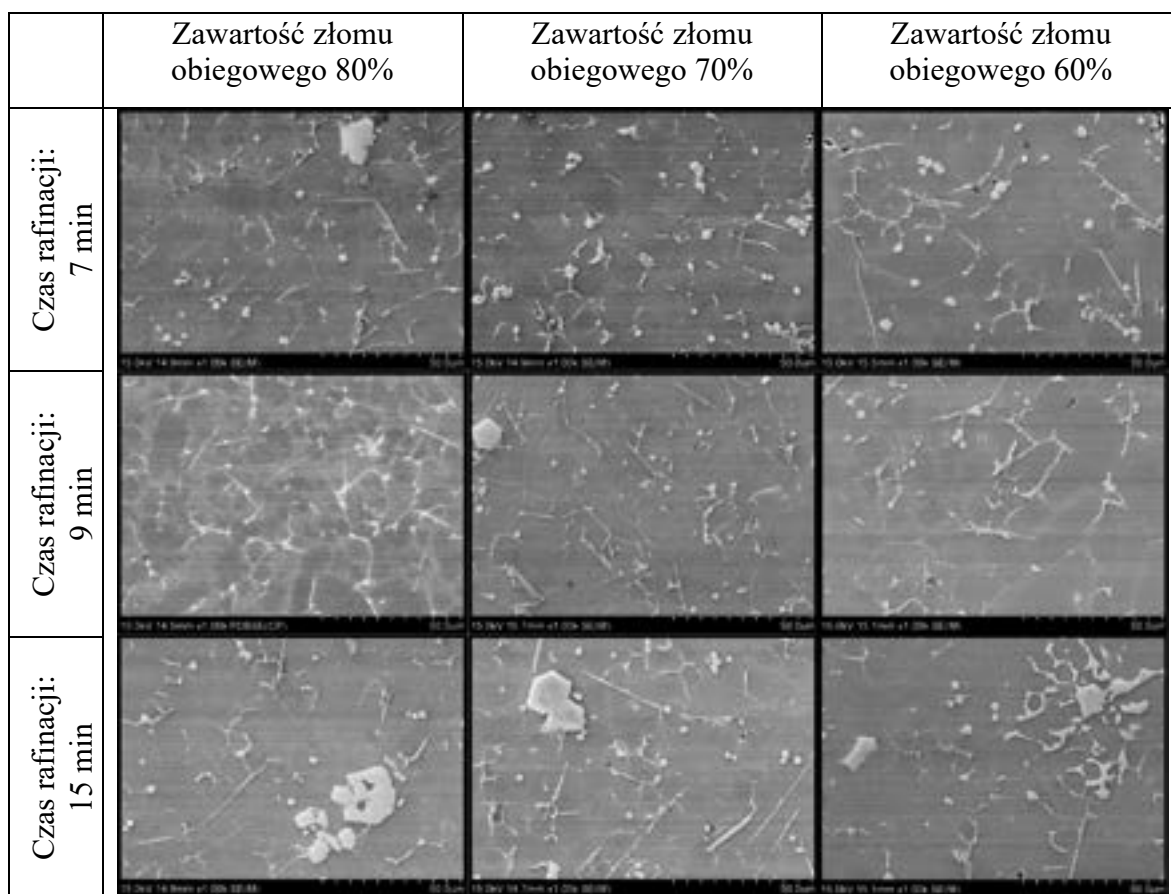
Rys. 4.84 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



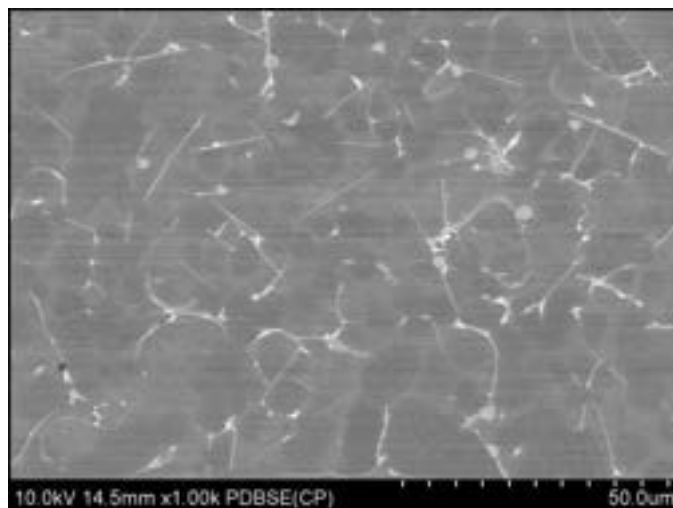
Rys. 4.85 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



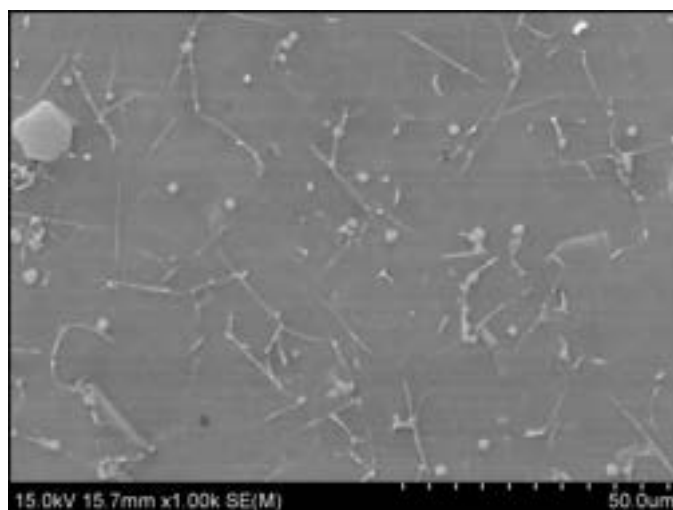
Rys. 4.86 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



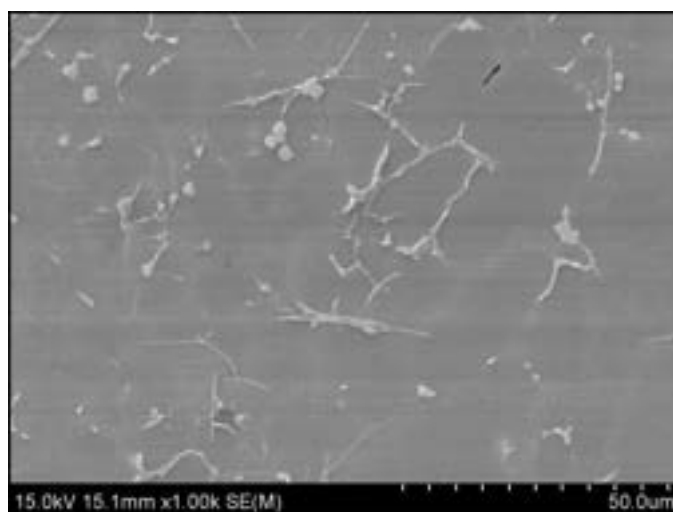
Rys. 4.87 Zestawienie zdjęć mikrostruktury odlewów ze stopu AlSi9Cu3 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM



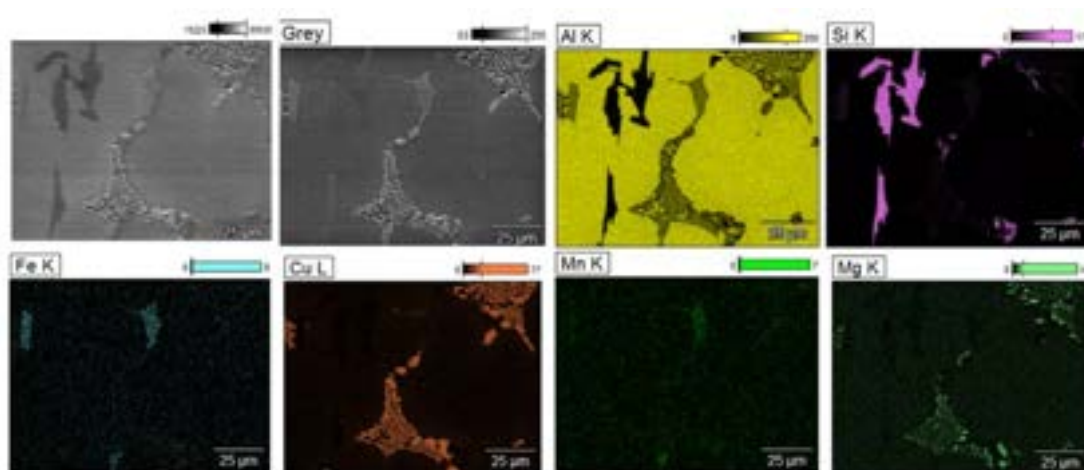
Rys. 4.88 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



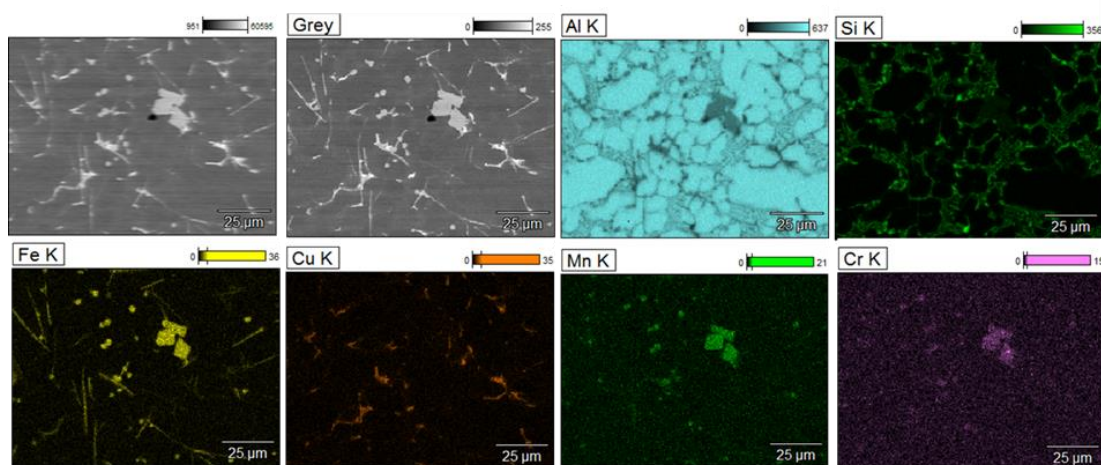
Rys. 4.89 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%



Rys. 4.90 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3 dla metalu rafinowanego przez 15 min. i zawartości złomu obiegowego 70%



Rys. 4.91 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3 rafinowanego przez 7 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cu, Mn i Mg; zawartość złomu na poziomie 60%



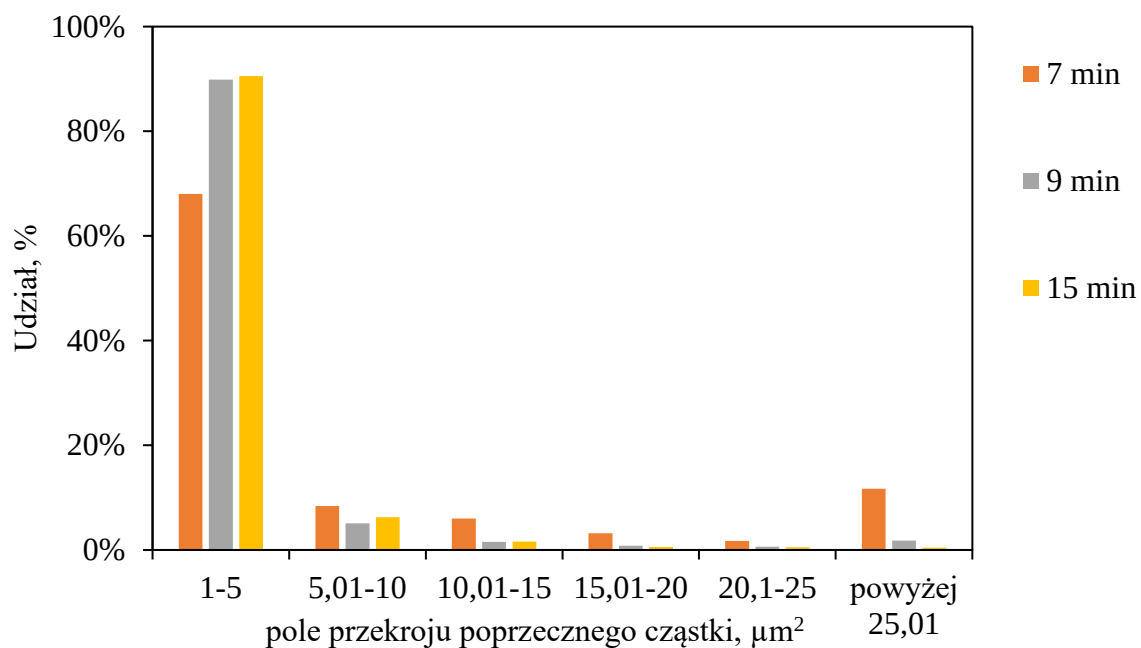
Rys. 4.92 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego ze stopu AlSi9Cu3 rafinowanego przez 15 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cu, Cr, Mn i Mg; zawartość złomu na poz. 70%

Przedstawione na rysunkach 4.83–4.86, 4.91 zdjęcia mikrostruktury wlewków ze stopu AlSi9Cu3, dowodzą występowania w mikrostrukturze licznych wydzieli o zróżnicowanym składzie chemicznym i morfologii. Głównie są to fazy krzemowe oraz międzymetaliczne, ponadto występują wydzielania eutektyczne faz bogatych w Cu i Mg. Wydzielania krzemowe we wlewkach mają ostro zakończoną, iglastą formę, która jest charakterystyczna dla struktury eutektycznej Al-Si. Iglasty kształt krzemu negatywnie wpływa na plastyczność stopu, powodując lokalne koncentracje naprężeń, co sprzyja pękaniu materiału. Dodatkowo, wydzielania międzymetaliczne bogate w żelazo, takie jak faza β -Fe (Al₃FeSi), występują w postaci wydłużonych lub płytkowych. Te fazy są zazwyczaj równoległe do krzemowych wydzieli. W miarę wydłużania czasu rafinacji,

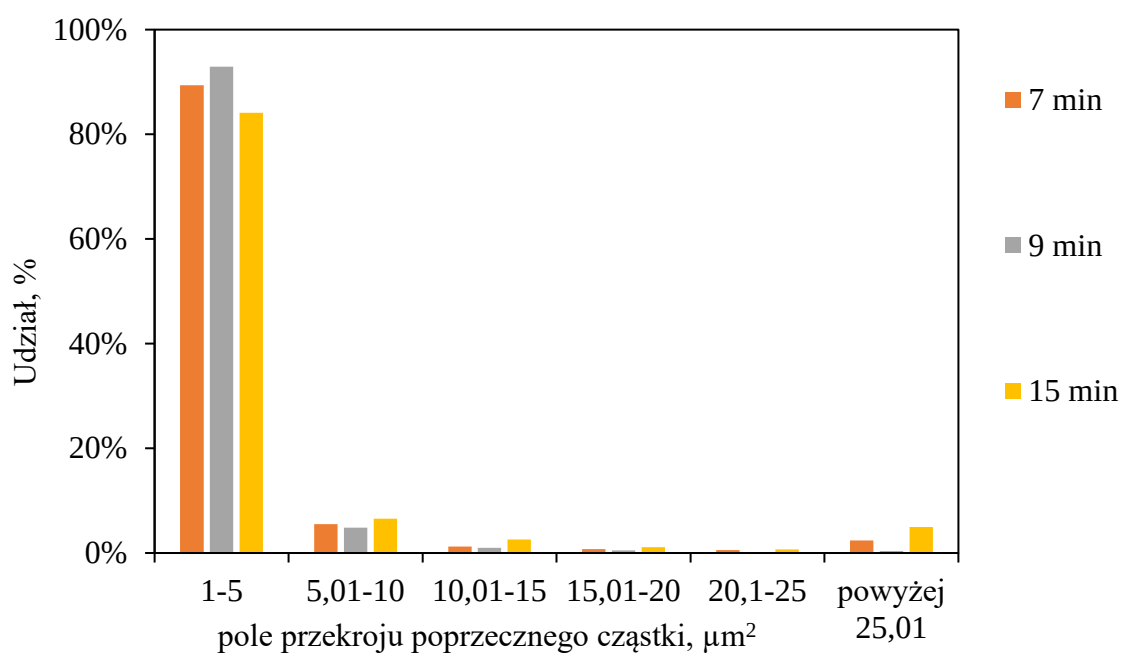
wydzielenia te stają się bardziej rozdrobnione i równomiernie rozmieszczone, co szczególnie dobrze jest widoczne na rys. 4.86, gdzie wydzielania są mniejsze, a ich rozmieszczenie bardziej jednorodne. Wpływa to korzystnie na wytrzymałość stopu, choć wydłużone fazy β -Fe nadal mogą przyczyniać się do kruchości.

W odlewach ciśnieniowych, których mikrostrukturę przedstawiono na rys. 4.86–4.90, 4.92 kształt wydzieleni różni się od tych obecnych we wlewkach. Wydzielenia krzemowe mają znacznie bardziej zaokrągloną i globularną formę, co korzystnie wpływa na plastyczność stopu i jego wytrzymałość na rozciąganie. Zaokrąglona morfologia krzemu pozwala uniknąć koncentracji naprężeń, które są typowe dla iglastych struktur krzemowych we wlewkach. Krzem, przyjmujący zaokrągloną formę, sprzyja wyższej plastyczności oraz odporności na pękanie [16, 20]. Dzięki szybkiemu chłodzeniu podczas odlewania ciśnieniowego, fazy międzymetaliczne, takie jak β -Fe, również mają bardziej zwartą formę, co zmniejsza ich negatywny wpływ na mechaniczne właściwości stopu. Ponadto wydzielania bogate w Cu i Mg nie tworzą eutektyk, są rozdrobnione i rozłożone bardziej równomiernie w mikrostrukturze, co szczególnie dobrze widoczne jest na rys. 4.92 przedstawiającym mapy rozkładu pierwiastków.

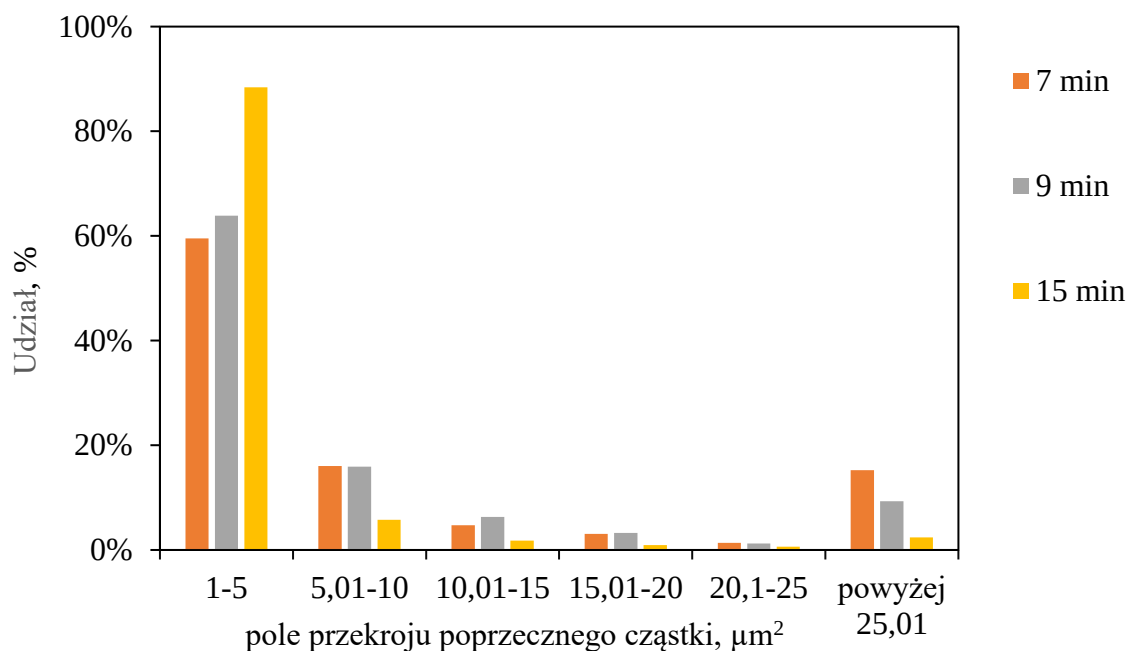
Na rysunkach 4.93-4.110 przedstawiono w formie wykresów wyniki analizy statystycznej wydzieleni obecnych w mikrostrukturze wlewków (rys.4.93 - 4.101) oraz odlewów ciśnieniowych (rys. 4.102 - 4.110).



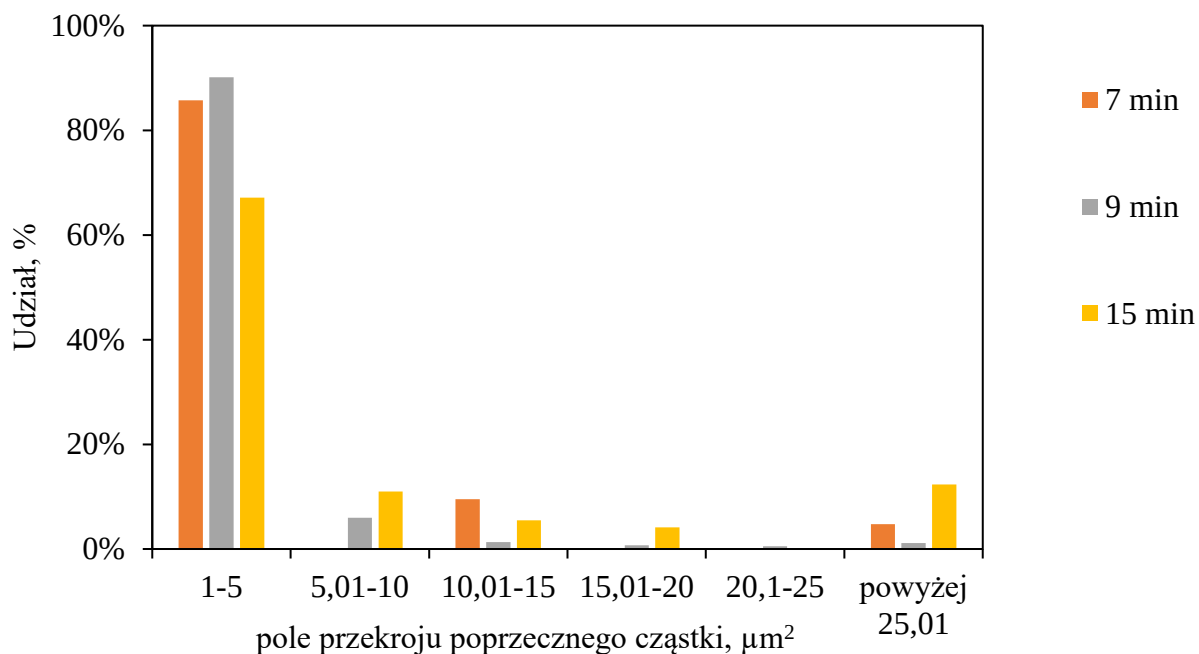
Rys. 4.93 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3 ; próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



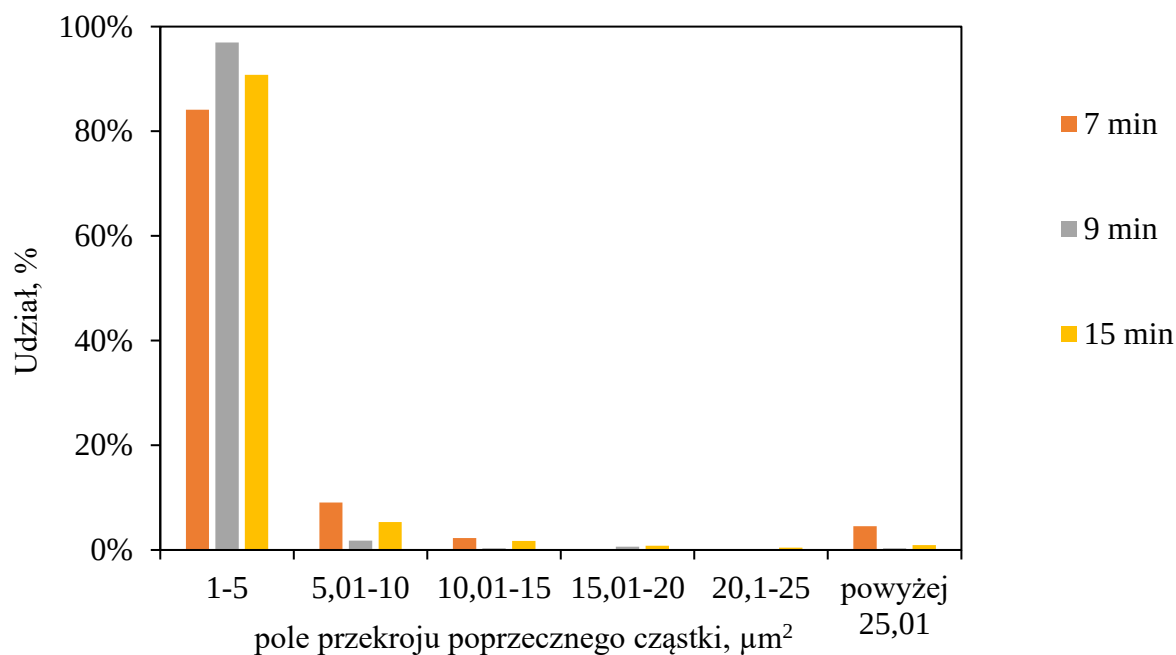
Rys. 4.94 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3 , próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



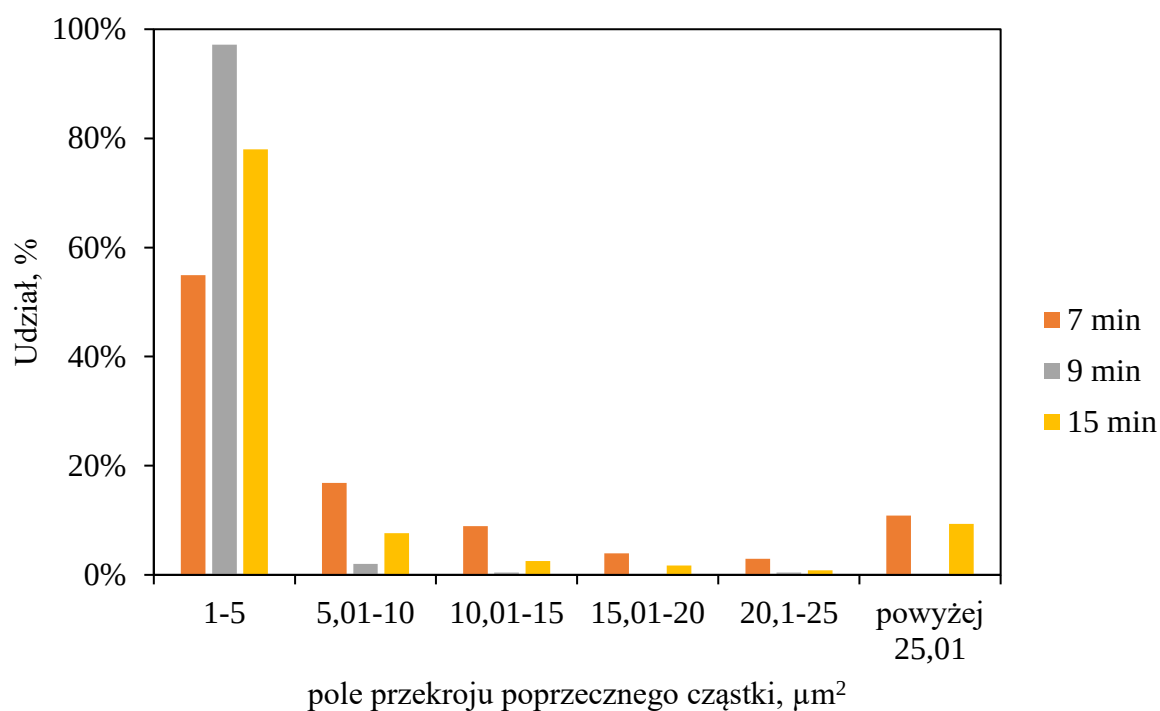
Rys. 4.95 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego



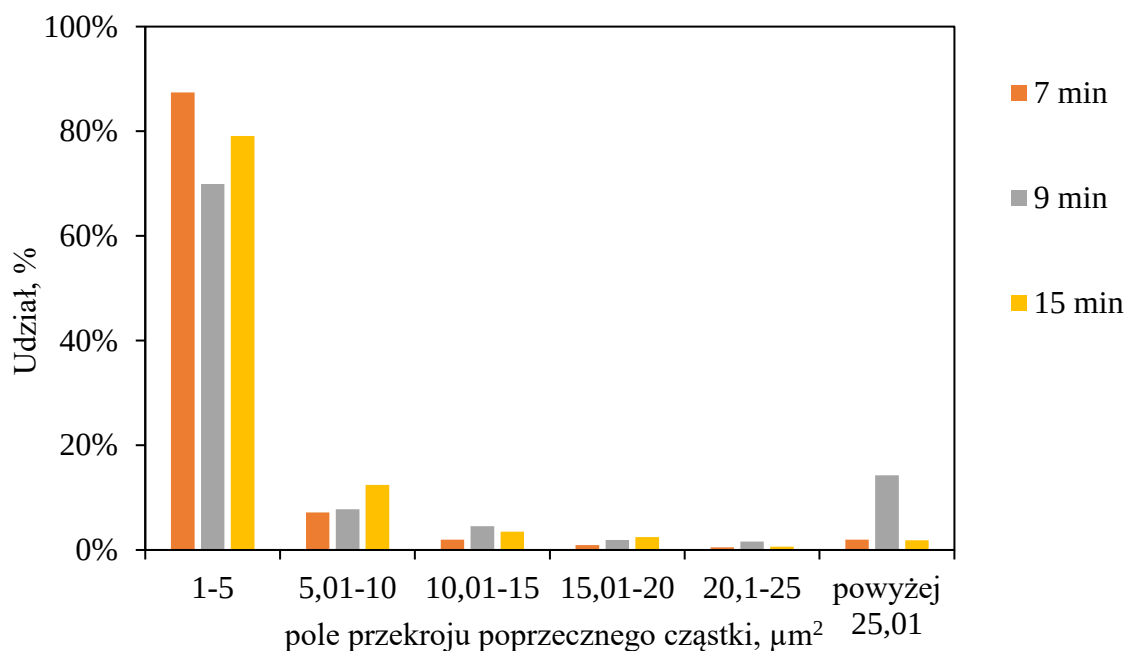
Rys. 4.96 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



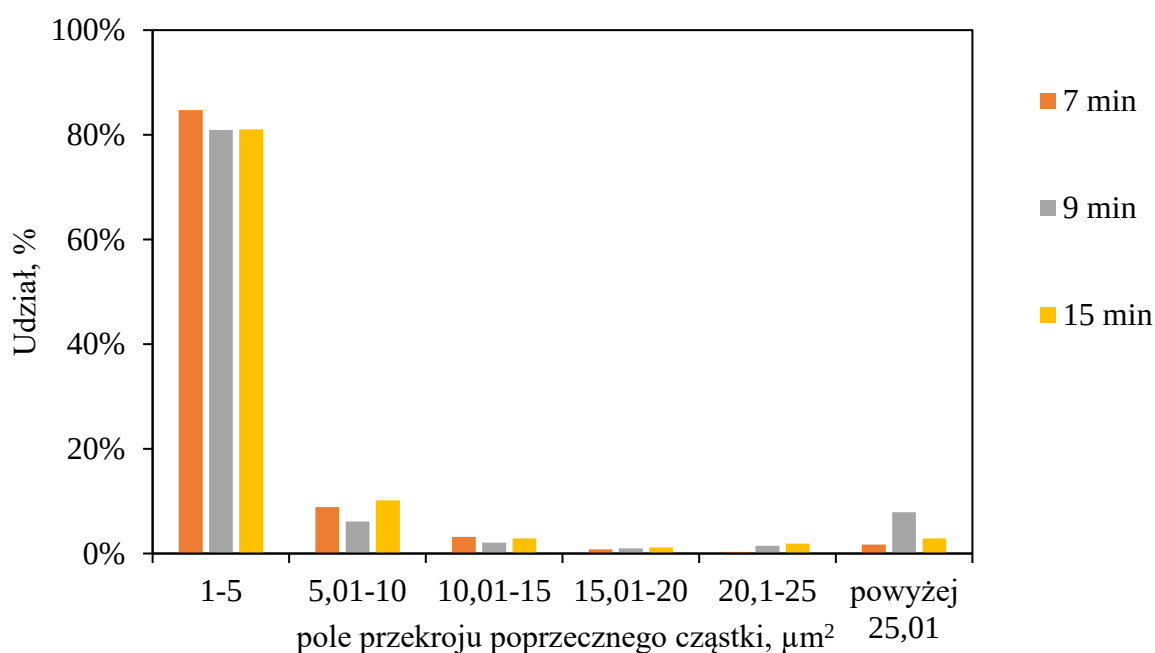
Rys. 4.97 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



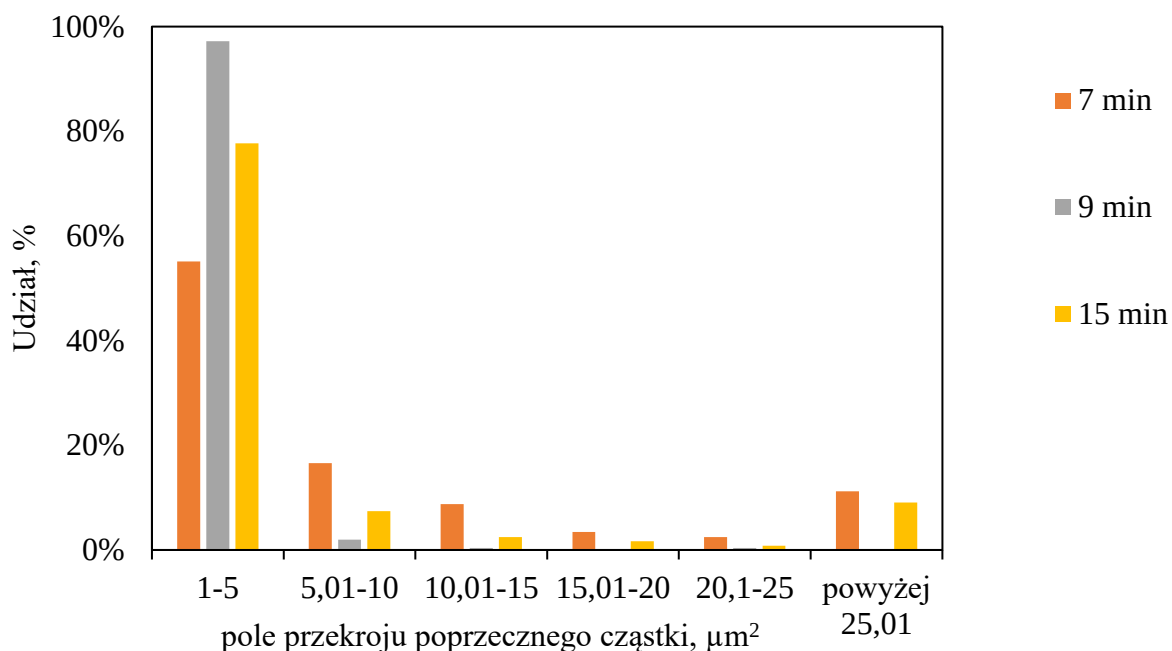
Rys. 4.98 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego



Rys. 4.99 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



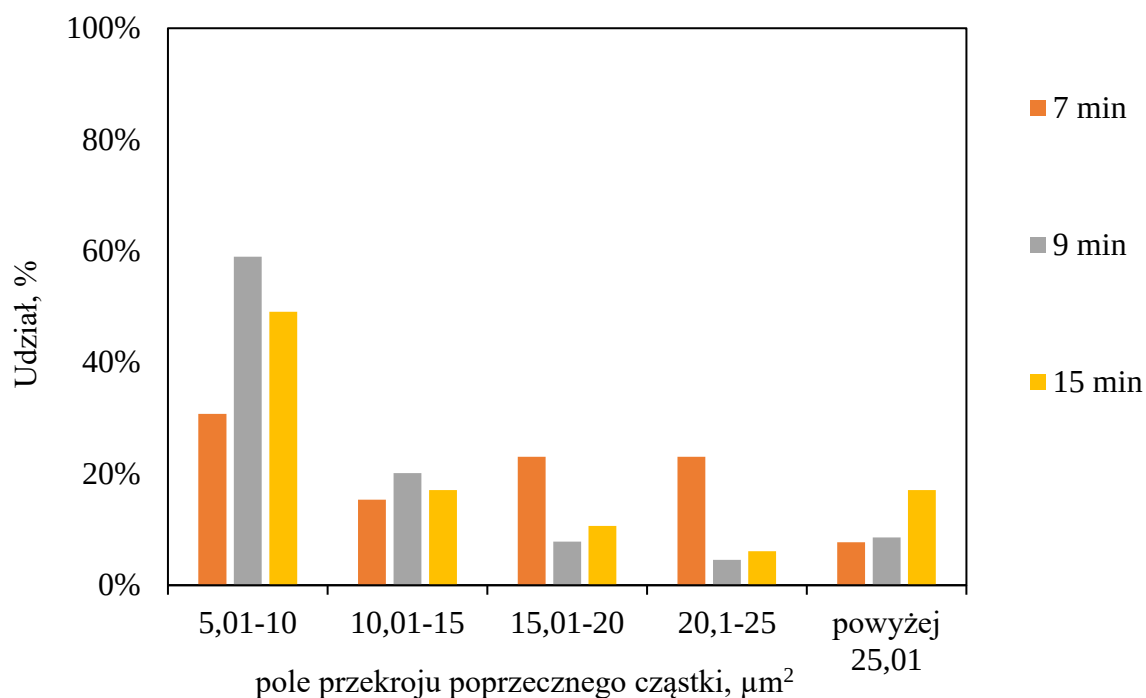
Rys. 4.100 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



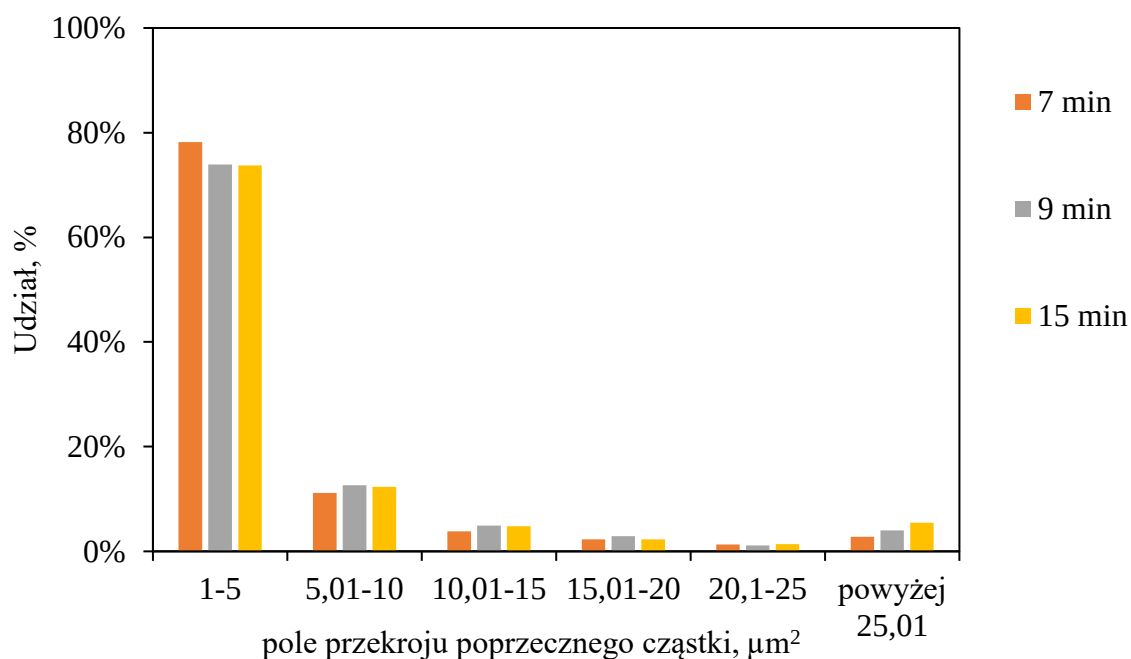
Rys. 4.101 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego

Analiza statystyczna wydzieleni krzemowych, wydzieleni bogatych w żelazo oraz zawierających miedź we wlewkach (rys. 4.93–4.101) wskazuje, że wydłużenie czasu rafinacji wpływa na zmniejszenie rozmiaru cząstek oraz ich bardziej równomierne rozmieszczenie w stopie. W przypadku wydzieleni krzemowych (rys. 4.93–4.95) zaobserwowano, że we wlewkach z 80% zawartością złomu obiegowego (rys. 4.93), wydłużenie czasu rafinacji do 15 minut prowadziło do znacznego zmniejszenia liczby cząstek o wielkości powyżej 25 μm , przy jednoczesnym wzroście liczby mniejszych cząstek, o rozmiarze do 10 μm . Podobny trend zaobserwowano w wlewkach z 70% (rys. 4.94) oraz 60% (rys. 4.95) złomu obiegowego, choć zmiany były mniej wyraźne. W przypadku cząstek bogatych w żelazo (rys. 4.96–4.98), wydłużenie czasu rafinacji prowadziło do zmniejszenia liczby cząstek o rozmiarze powyżej 20 μm oraz zwiększenia liczby mniejszych cząstek (poniżej 10 μm). Zjawisko to było szczególnie widoczne we wlewkach zawierających 80% złomu obiegowego (rys. 4.96). We wlewkach z 70% (rys. 4.97) i 60% (rys. 4.98) złomu obiegowego obserwowano podobny efekt, aczkolwiek zmiany były mniej intensywne. W przypadku wydzieleni bogatych w miedź (rys. 4.99–4.101) wydłużenie czasu rafinacji również prowadziło do zmniejszenia liczby większych cząstek. We wlewkach z 80% złomu (rys. 4.99) zaobserwowano znaczne zmniejszenie rozmiaru tych

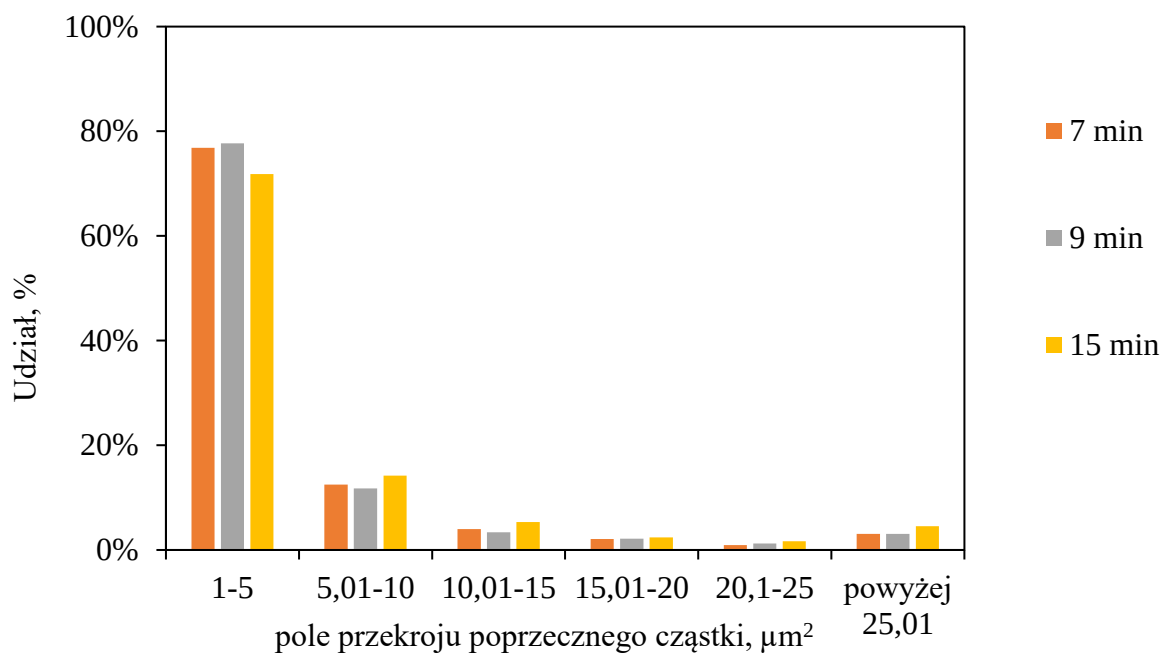
cząstek po 15 minutach rafinacji, podczas gdy w wlewkach z 70% (rys. 4.100) i 60% (rys. 4.101) zmiany te były mniej wyraźne.



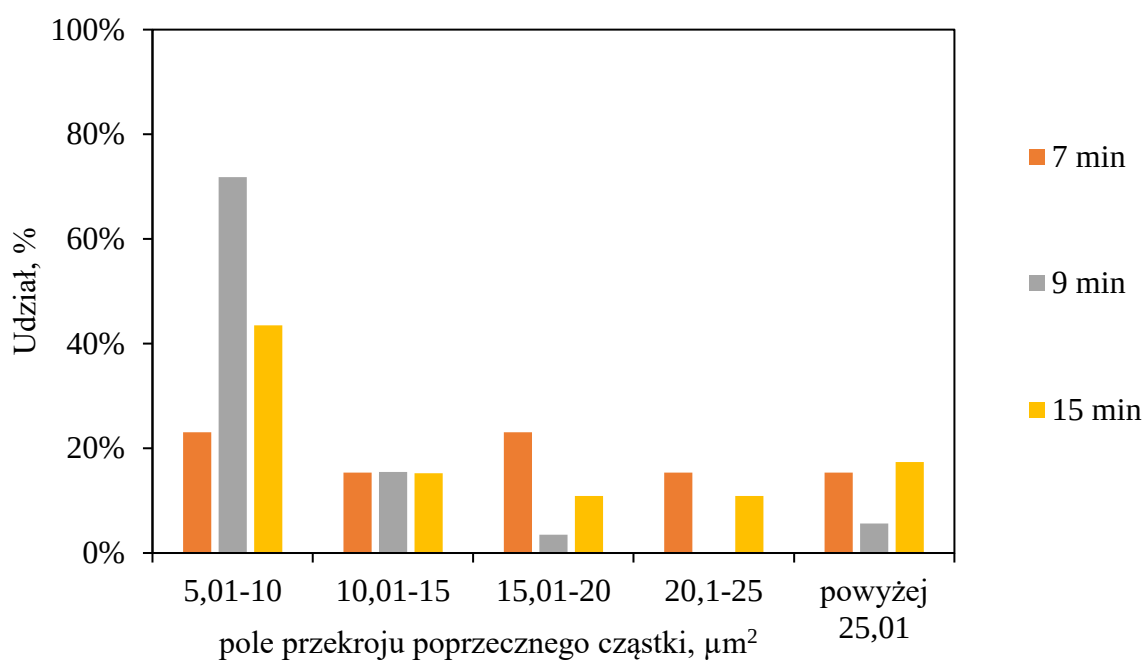
Rys. 4.102 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



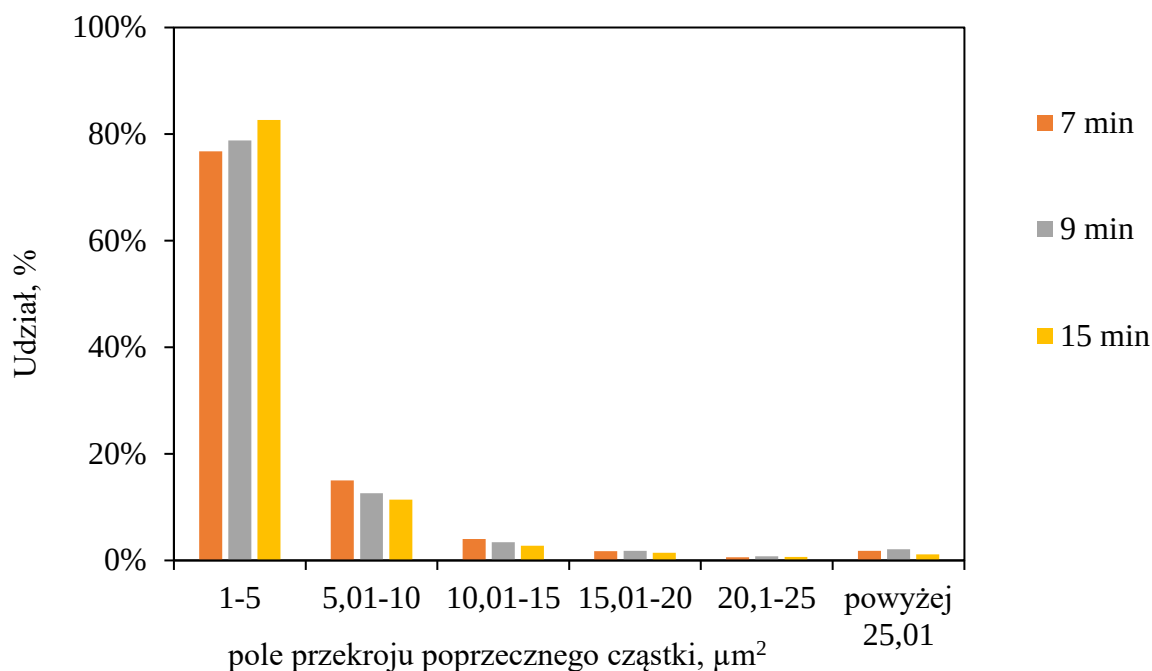
Rys. 4.103 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



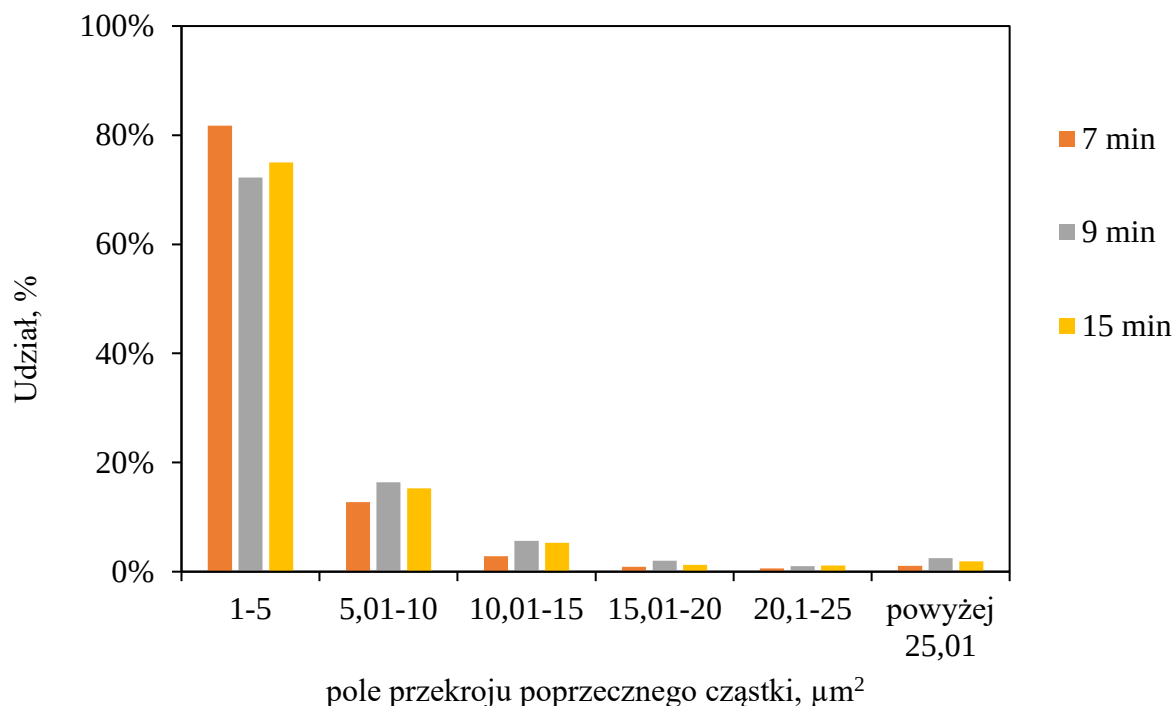
Rys. 4.104 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego



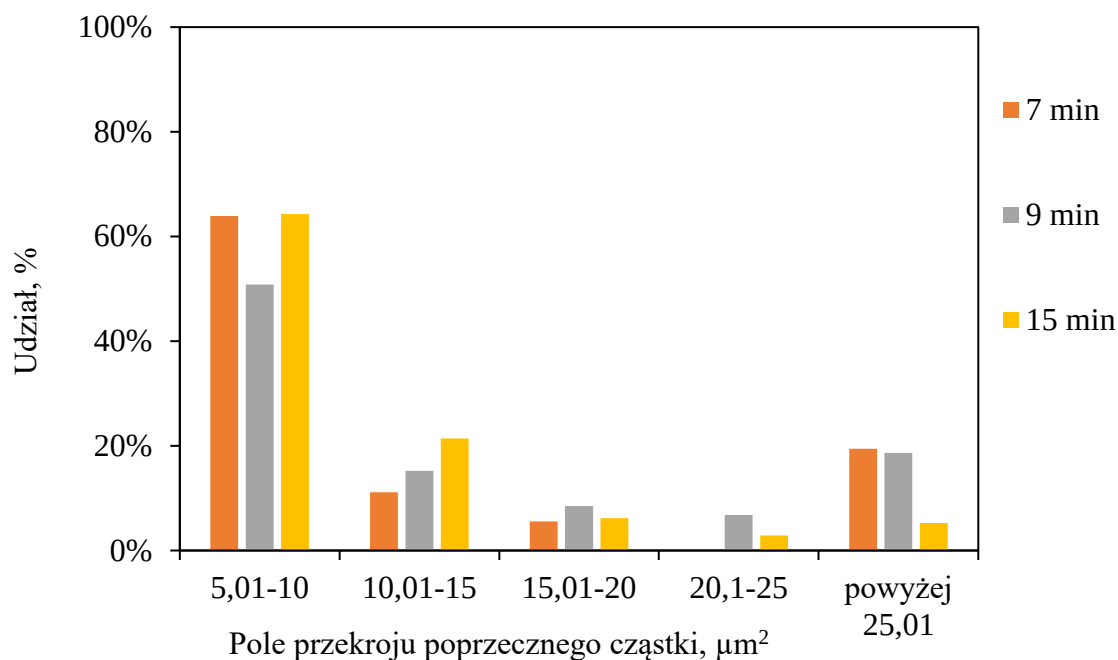
Rys. 4.105 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



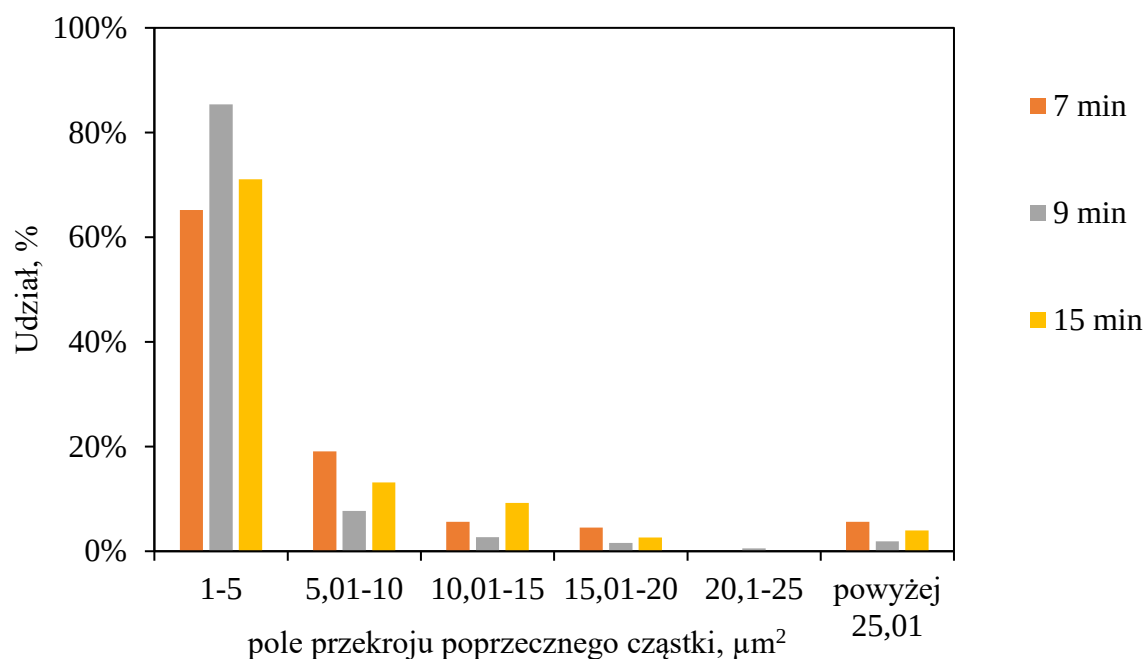
Rys. 4. 106 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



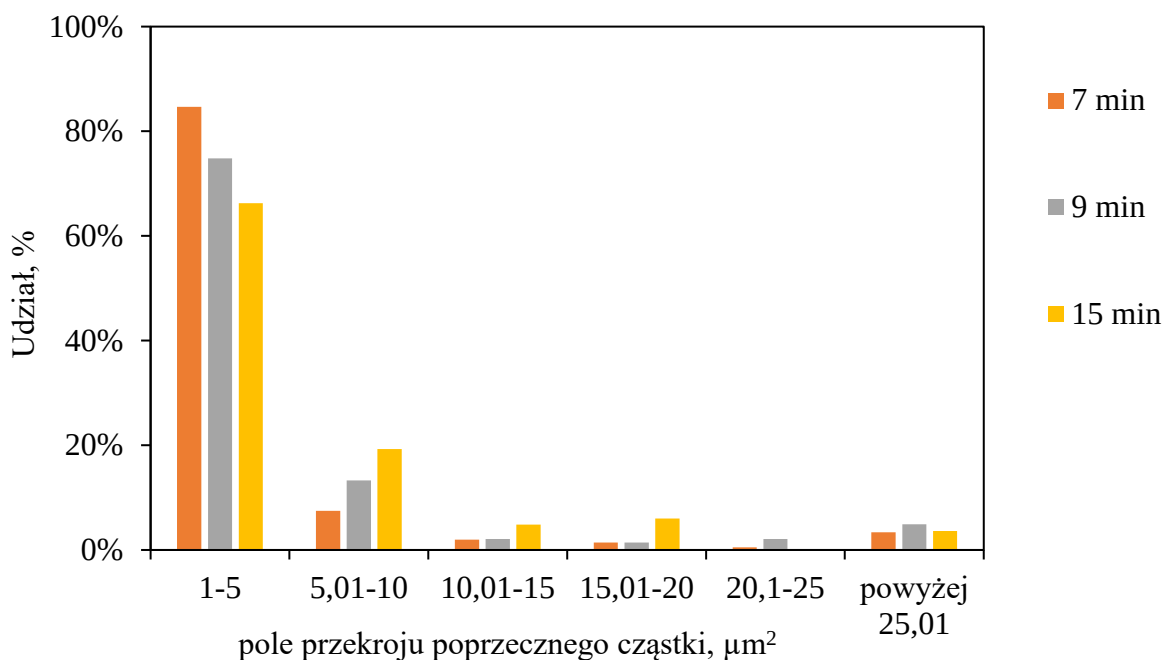
Rys. 4.107 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



Rys. 4.108 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego



Rys. 4.109 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego



Rys. 4.110 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3 , próbka zawierająca 80% złomu obiegowego

W przypadku odlewów ciśnieniowych (rys. 4.102–4.110) wydłużenie czasu rafinacji również sprzyjało zmniejszeniu rozmiaru cząstek krzemowych, a także bogatych w żelazo oraz bogatych w miedź, co przyczyniło się do ujednorodnienia mikrostruktury. W przypadku cząstek krzemowych (rys. 4.102–4.104) zaobserwowano, że wydłużenie czasu rafinacji do 15 minut w odlewach z 80% złomu obiegowego (rys. 4.102) spowodowało zmniejszenie udziału cząstek o wielkości powyżej $20\ \mu\text{m}$, a zwiększenie udziału małych cząstek (do $10\ \mu\text{m}$). Odlewy ciśnieniowe z 70% (rys. 4.103) i 60% (rys. 4.104) złomu wykazywały podobny trend, choć przy krótszych czasach rafinacji. Podobnie jak w przypadku wlewków, cząstki bogate w żelazo (rys. 4.105–4.107) również uległy zmniejszeniu w wyniku wydłużenia czasu rafinacji. W odlewach z 80% złomu (rys. 4.105), po 15 minutach rafinacji, większość cząstek żelaza miała rozmiar poniżej $10\ \mu\text{m}$. W odlewach z 70% (rys. 4.106) i 60% (rys. 4.107) złomu obiegowego efekt ten był podobny, ale mniej wyraźny. W przypadku wydzielen zawierających w swoim składzie miedź (rys. 4.108–4.110) wydłużenie czasu rafinacji również sprzyjało bardziej jednorodnemu rozmieszczeniu tych cząstek oraz zmniejszeniu ich wielkości. W odlewach z 80% złomu (rys. 4.108) zaobserwowano wyraźny spadek liczby większych cząstek po 15 minutach rafinacji, natomiast w odlewach z 70% (rys. 4.109) i 60% (rys. 4.110) zmiany były mniej znaczące.

4.2.2. Wyniki pomiarów liczby gazowej wlewków

Ze względu a specyfikę procesu, tak jak w przypadku stopu AlSi12, badania stopnia zagazowania stopu AlSi9Cu3 wykonano tylko na wlewkach. Wyniki pomiarów stopnia zagazowania wlewków, przeprowadzonych za pomocą wagi MK 3000, zostały zestawione w tabelach 4.7-4.9. Podczas pomiarów starannie kontrolowano temperaturę przetopu, utrzymując ją w określonym zakresie, aby uniknąć nadmiernego rozpuszczania gazów w ciekłym metalu, co mogłoby prowadzić do jego utleniania i zafałszować wyniki [9]. Temperatura procesu przetopu mieściła się w zakresie 719 – 746 °C.

Przedstawione tabele uwzględniają czas rafinacji oraz zawartość złomu obiegowego.

Tabela 4.7 Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 80% złomu obiegowego

Czas rafinacji, min	Temp. przed pomiarem, °C	Średni stopień zagazowania, %
0	733	17,04
7	742	5,19
9	735	3,66
15	730	1,16

Tabela 4.8 Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 70% złomu obiegowego

Czas rafinacji, min	Temp. przed pomiarem, °C	Średni stopień zagazowania, %
0	736	14,4
7	730	5,13
9	739	4,7
15	735	1,37

Tabela 4.9 Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 60% złomu obiegowego

Czas rafinacji, min	Temp. przed pomiarem, °C	Średni stopień zagazowania, %
0	719	15,63
7	728	5,06
9	746	1,93
15	730	1,43

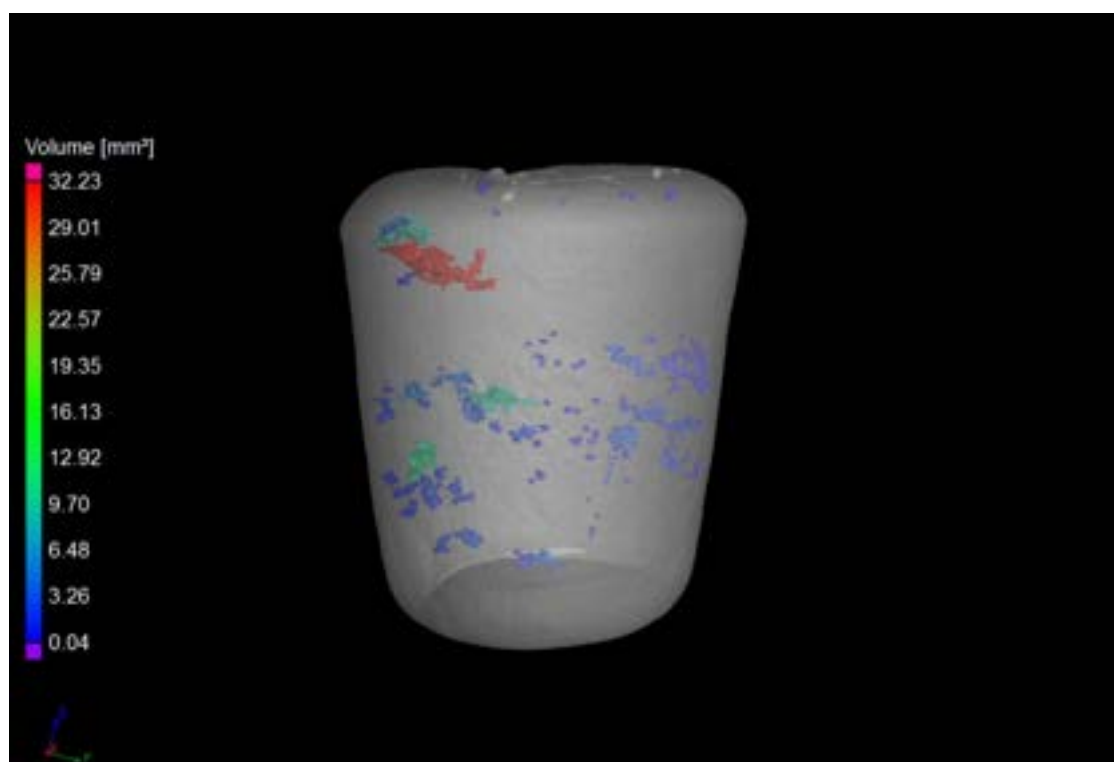
Wyniki pomiarów liczby gazowej wlewków przedstawione w Tabelach 4.7–4.9 dowodzą wyraźnego spadku stopnia zagazowania wraz z wydłużaniem czasu rafinacji barbotażowej, niezależnie od zawartości złomu obiegowego w stopie. Najwyższe wartości zagazowania występują w próbkach metalu, które nie zostały poddane rafinacji. W przypadku tych próbek poziom zagazowania wyniósł od 14,4% do 17,04%, co sugeruje znaczne nasycenie gazami stopu, gdy proces rafinacji nie został przeprowadzony. Po przeprowadzeniu rafinacji zaobserwowano istotny spadek wartości liczby gazowej. W próbkach zawierających 80% złomu obiegowego (Tabela 4.7), początkowy poziom zagazowania wynosił 17,04%, a po 15 minutach rafinacji obniżył się do 1,16%. Podobną tendencję zaobserwowano dla stopu z 70% zawartością złomu obiegowego (Tabela 4.8), gdzie poziom zagazowania spadł z 14,4% do 1,37% po 15 minutach rafinacji. Dla stopu z 60% zawartością złomu obiegowego (Tabela 4.9) wartości zmniejszyły się z 15,63% do 1,43% po 15 minutach procesu. Te wyniki wyraźnie dowodzą, że proces rafinacji barbotażowej jest efektywny w usuwaniu gazów z metalu, a wydłużenie czasu rafinacji znacząco wpływa na redukcję stopnia zagazowania, niezależnie od procentowej zawartości złomu, co potwierdzają dane literaturowe opisujące wyniki badań nad metodami rafinacji stopów aluminium. Podobne wyniki uzyskano w badaniach przeprowadzonych przez Gumienego i wsp. [143], gdzie stosowanie gazu obojętnego przez 15 minut w próbkach odgazowanych doprowadziło do zmniejszenia indeksu gęstości o około 90%. Jednakże, podobnie jak w poprzednich obserwacjach, wyższa zawartość złomu obiegowego jest związana z wyższym początkowym poziomem zagazowania, co potwierdza, że złom obiegowy może być głównym źródłem gazów w stopie.

4.2.3. Wyniki badań tomograficznych

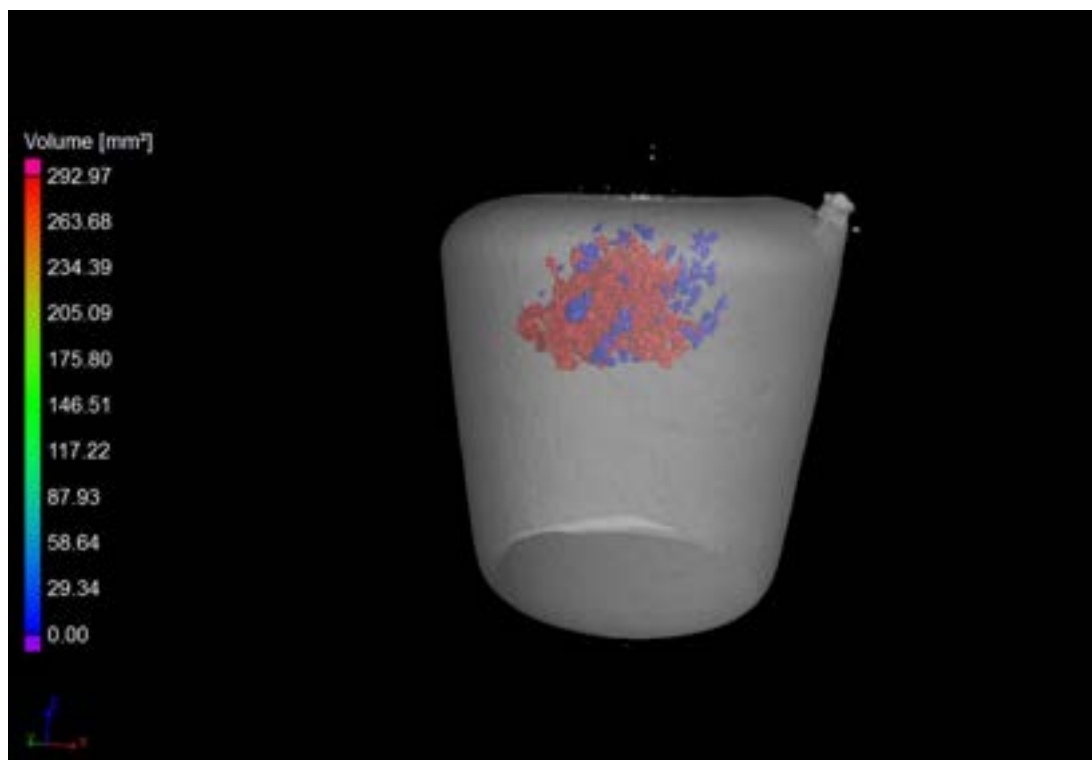
Poniżej przedstawiono wyniki badań tomograficznych. Uzyskane dane zestawiono w formie tabelarycznej (Tabela. 4.10) oraz na zdjęciach X-ray CT (rys. 4.111- 4.128). Na rysunkach 4.111-4.119, przedstawiono wyniki uzyskane dla wlewków, z kolei na rysunkach 4.120-4.128 wyniki dla odlewów ciśnieniowych.

Tabela 4.10 Wyniki pomiarów porowatości i stopnia zagazowania wlewków ze stopu AlSi9Cu3 w zależności od zawartości złomu obiegowego oraz czasu rafinacji barbotażowej

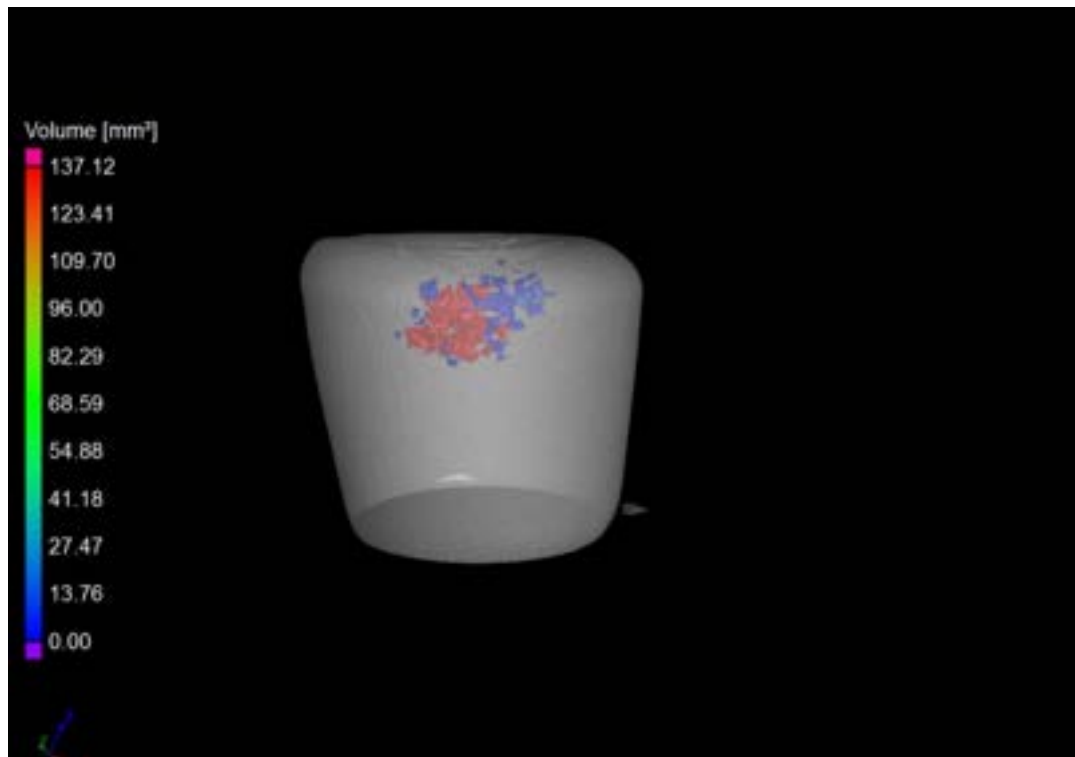
Wlewki AlSi9Cu3						
Zawartość złomu	80%		70%		60%	
Czas rafinacji (min)	Poziom zagazowania, %	Objętość największej porowatości (mm ³)	Poziom zagazowania, %	Objętość największej porowatości (mm ³)	Poziom zagazowania, %	Objętość największej porowatości (mm ³)
7	5,19	32,23	5,13	1165,01	5,06	7,35
9	3,66	292,97	4,7	1062,59	1,93	636,04
15	1,16	137,12	1,37	87,05	1,43	167,18



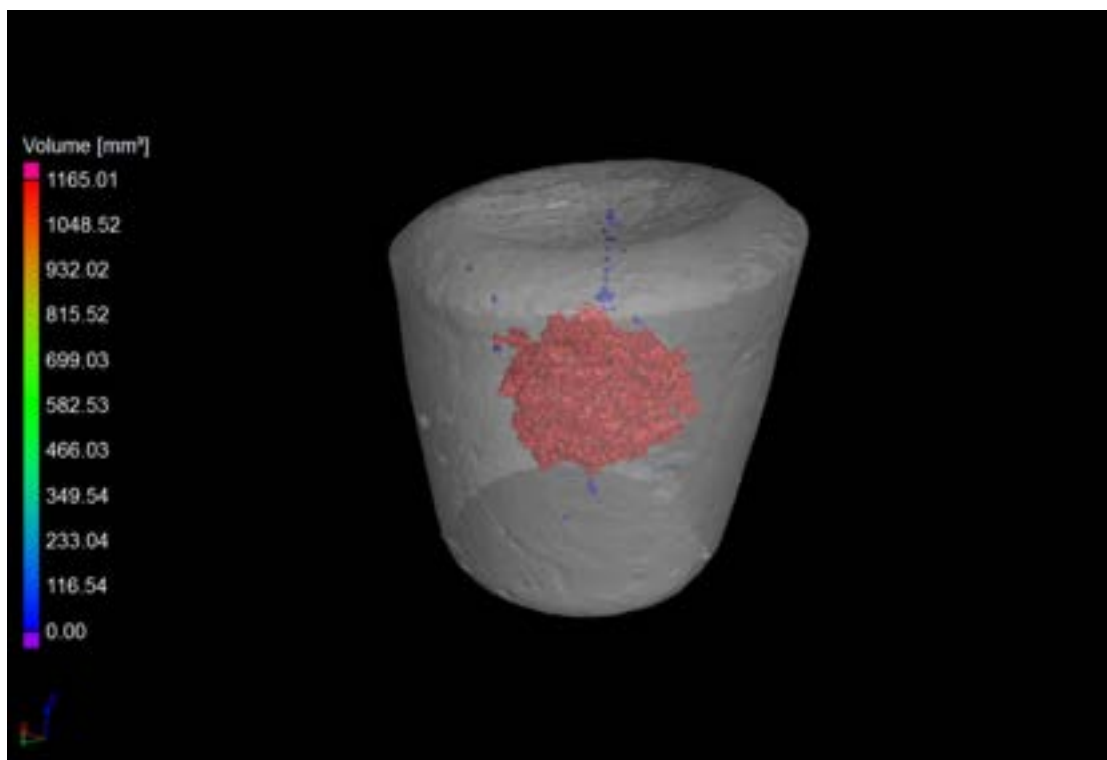
Rys. 4.111 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



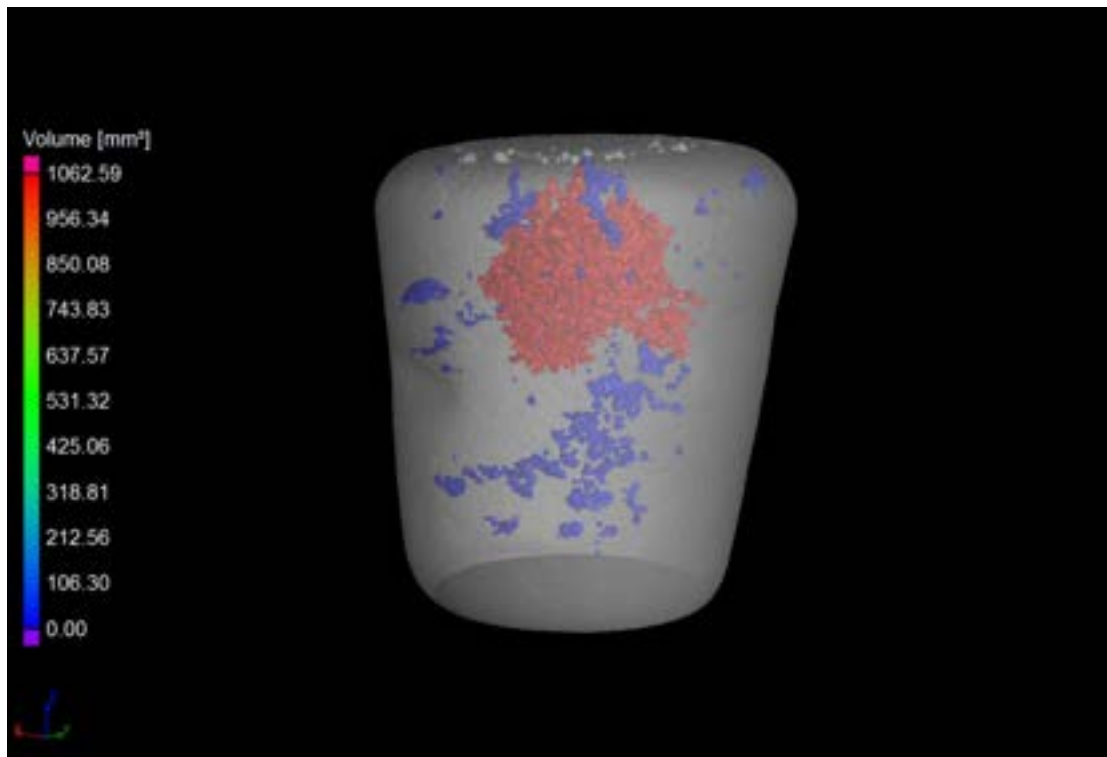
Rys. 4. 112 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4. 113 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



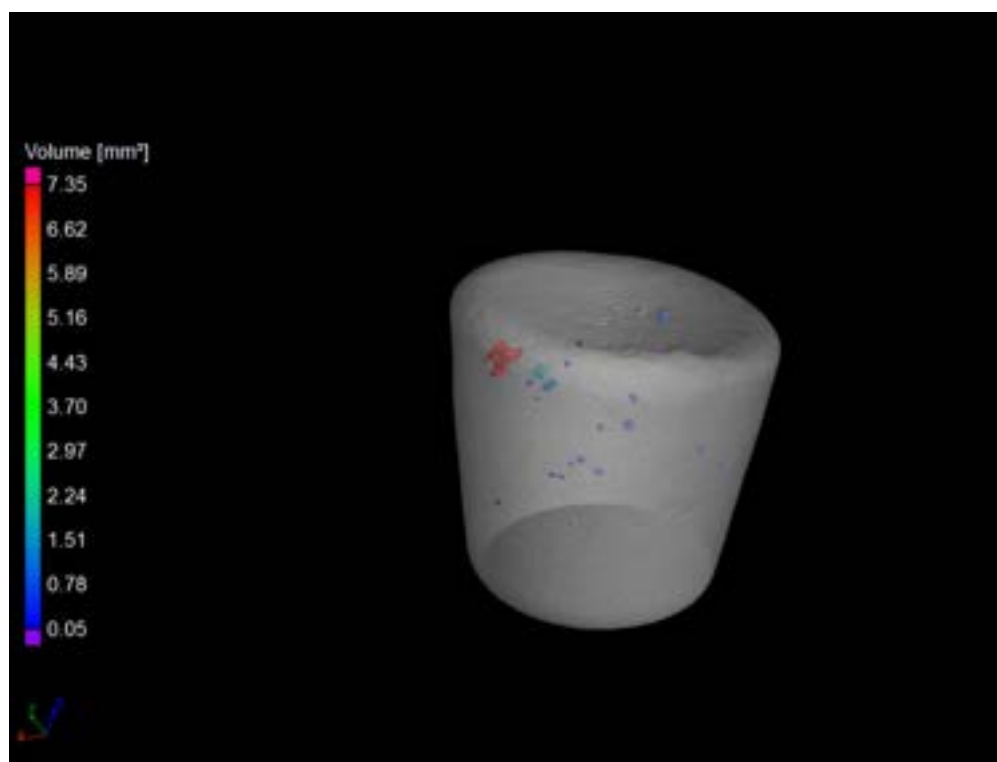
Rys. 4. 114 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



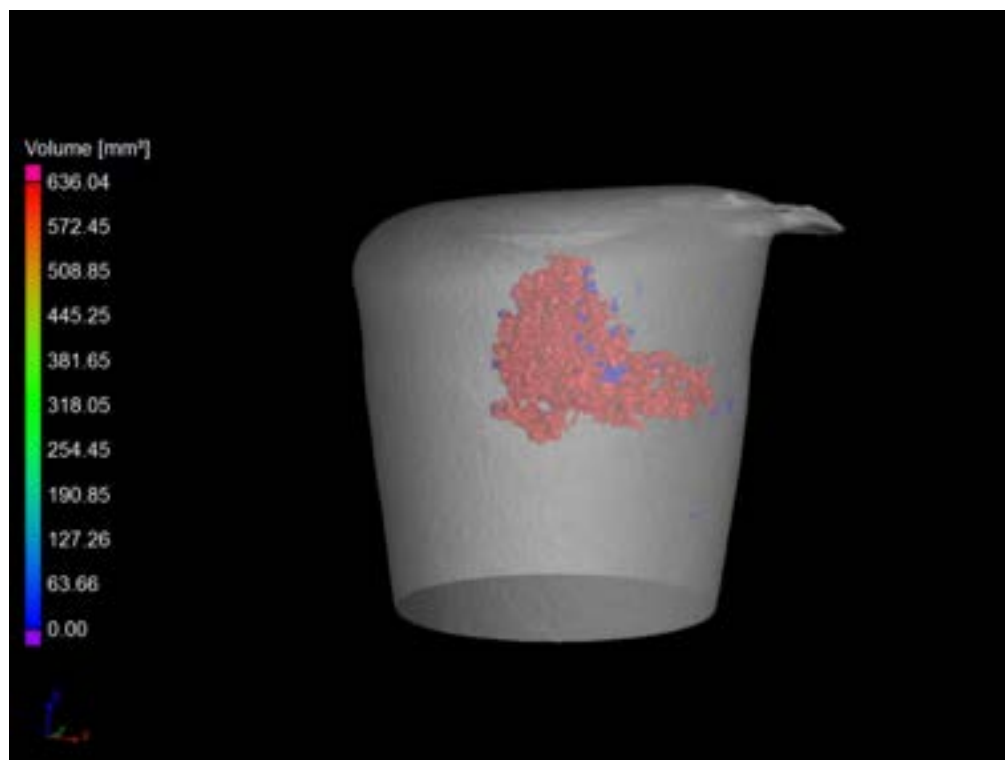
Rys. 4. 115 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



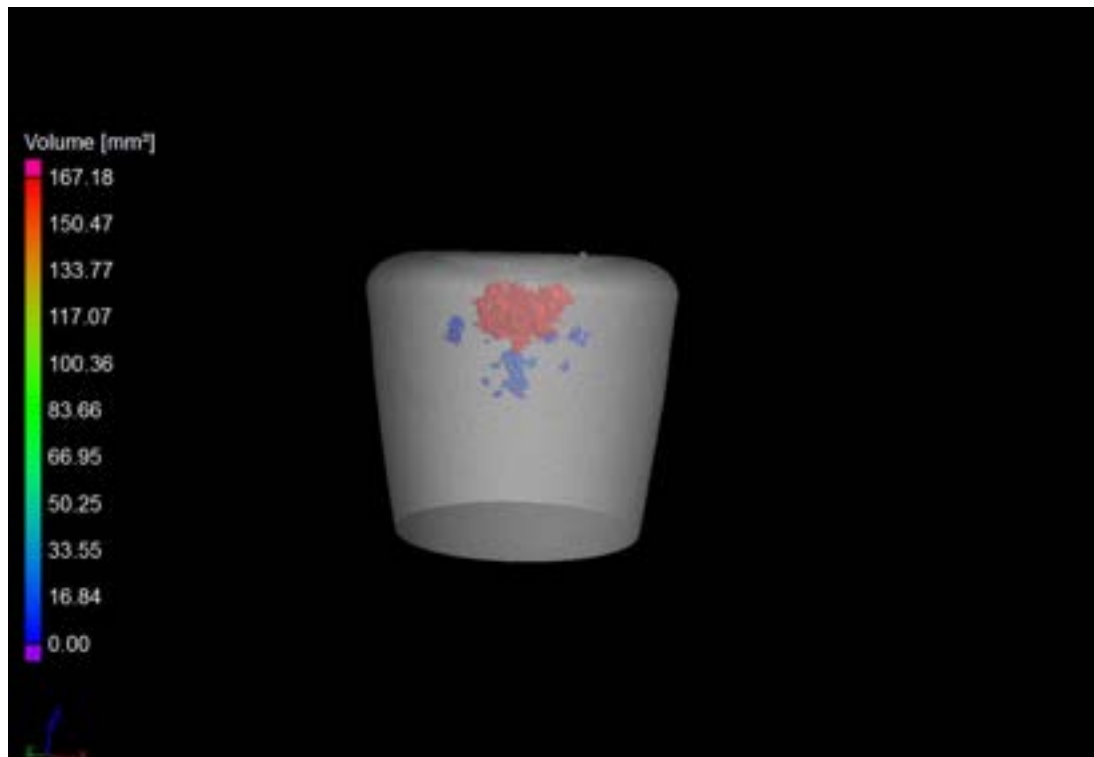
Rys. 4. 116 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4. 117 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



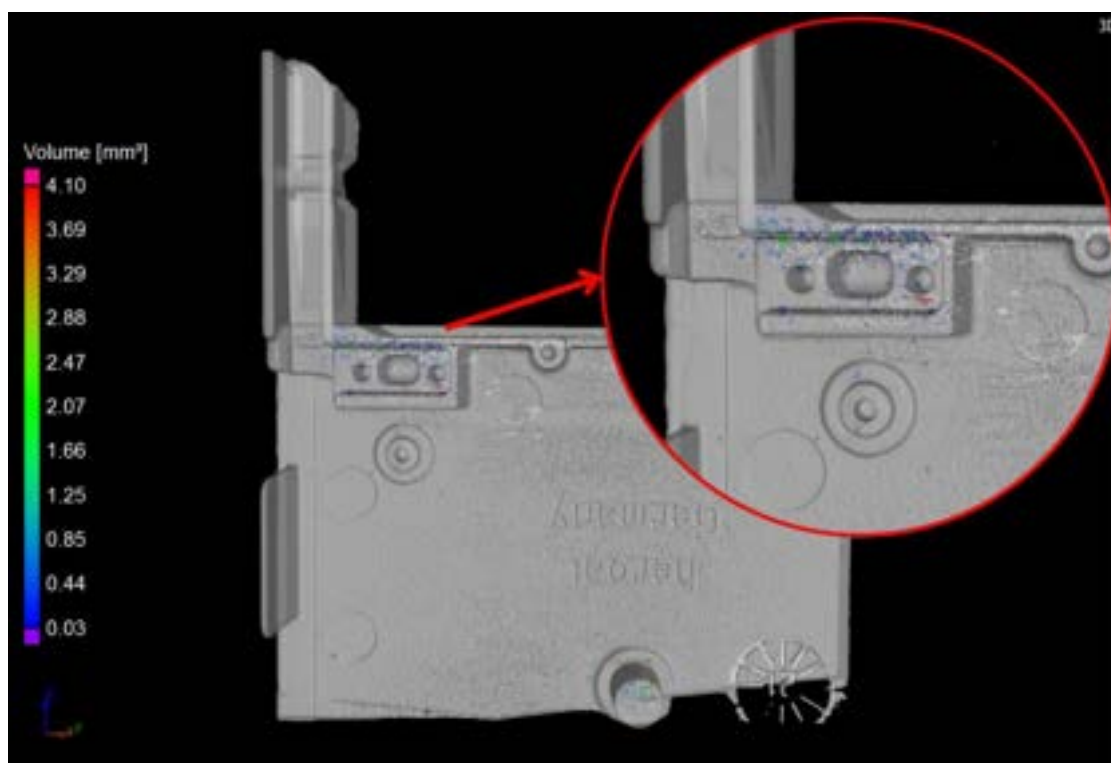
Rys. 4. 118 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



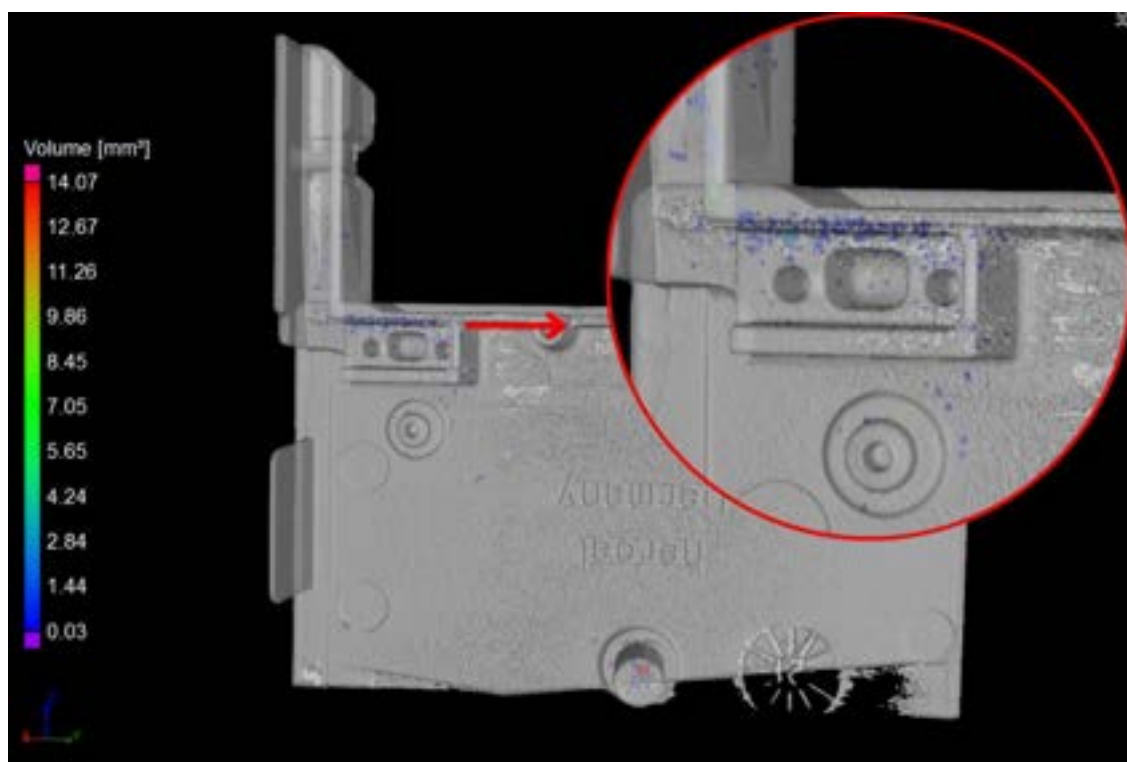
Rys. 4.119 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego

Tabela 4.11 Wyniki pomiarów porowatości odlewów ze stopu AlSi9Cu3

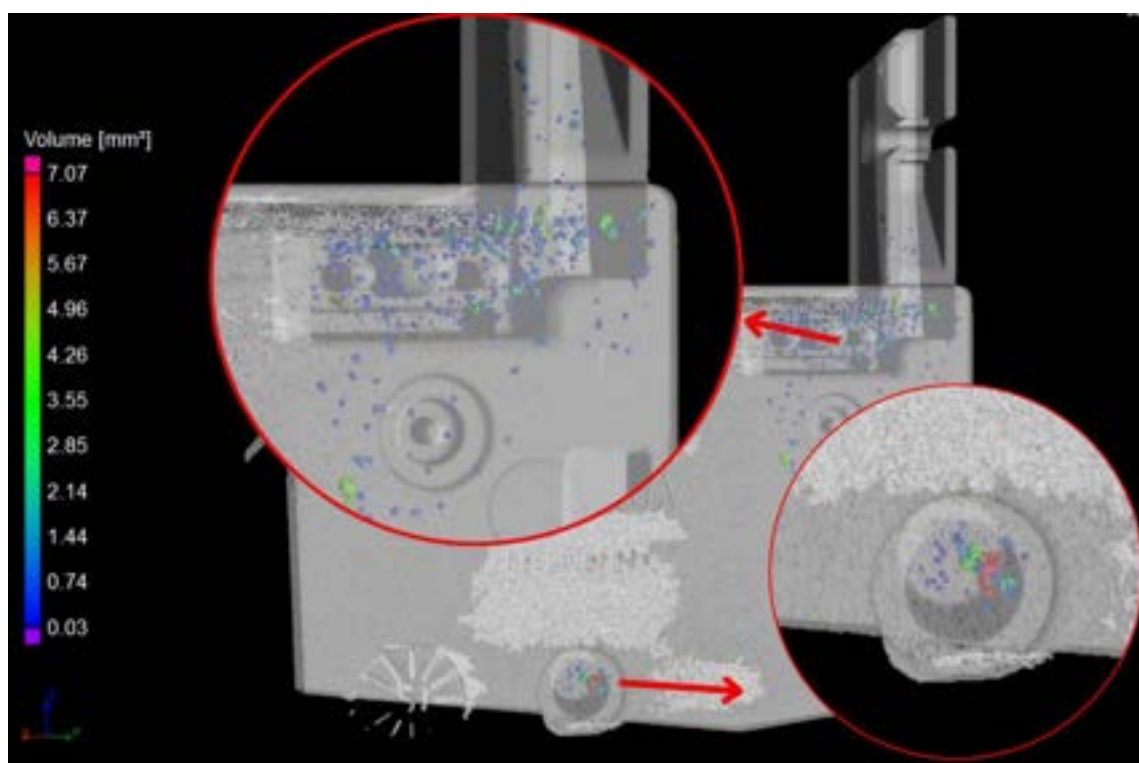
Odlewy AlSi9Cu3			
Zawartość złomu	80%	70%	60%
Czas rafinacji (min)	Objętość największej porowatości (mm ³)	Objętość największej porowatości (mm ³)	Objętość największej porowatości (mm ³)
7	4,10	5,20	6,36
9	14,07	5,02	2,85
15	7,07	7,83	13,07



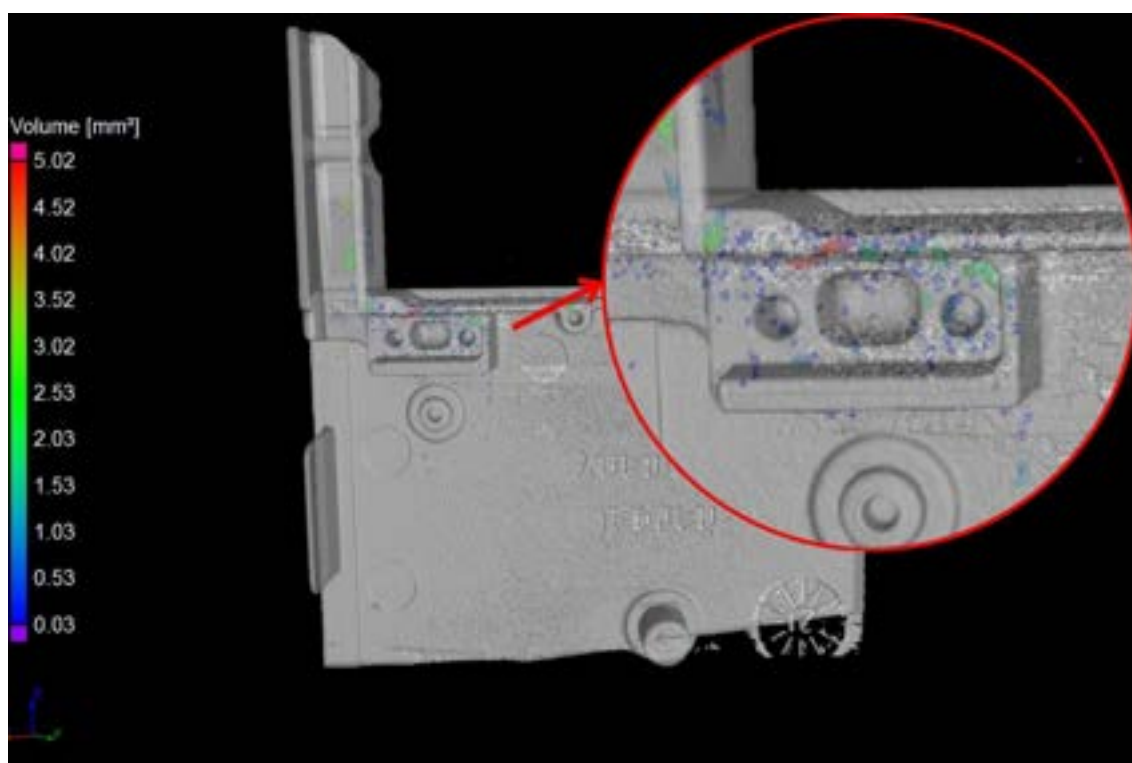
Rys. 4.120 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



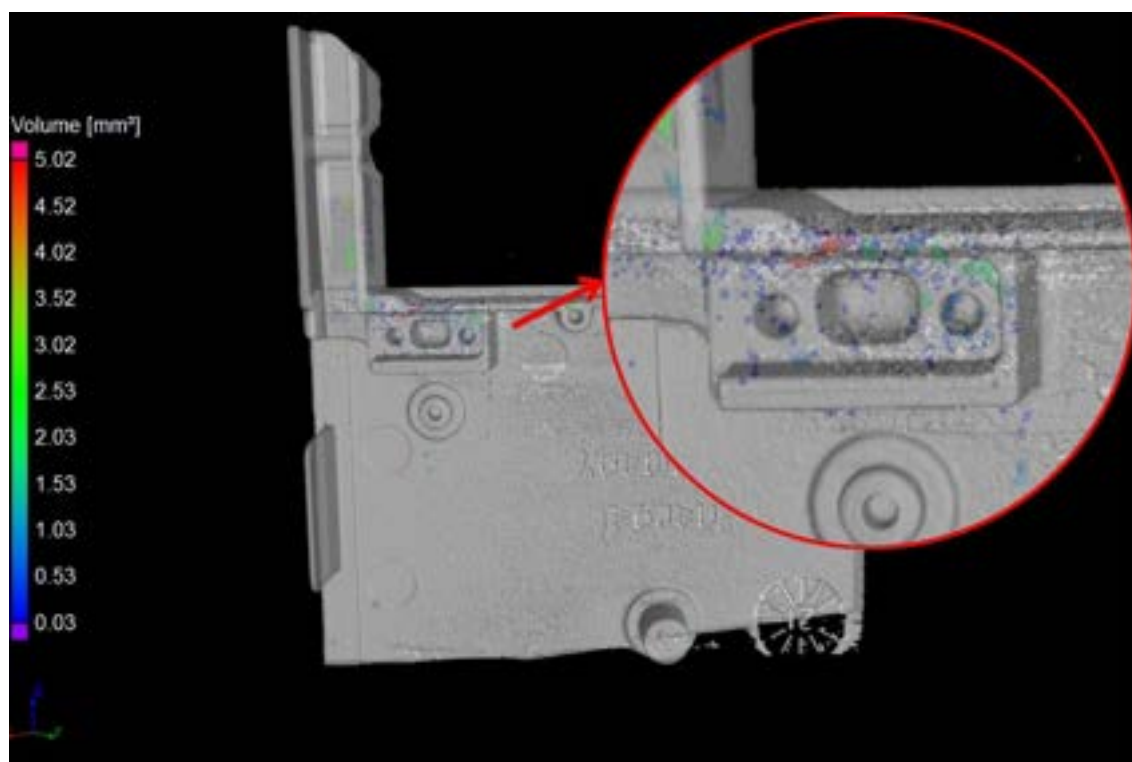
Rys. 4. 121 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4. 122 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



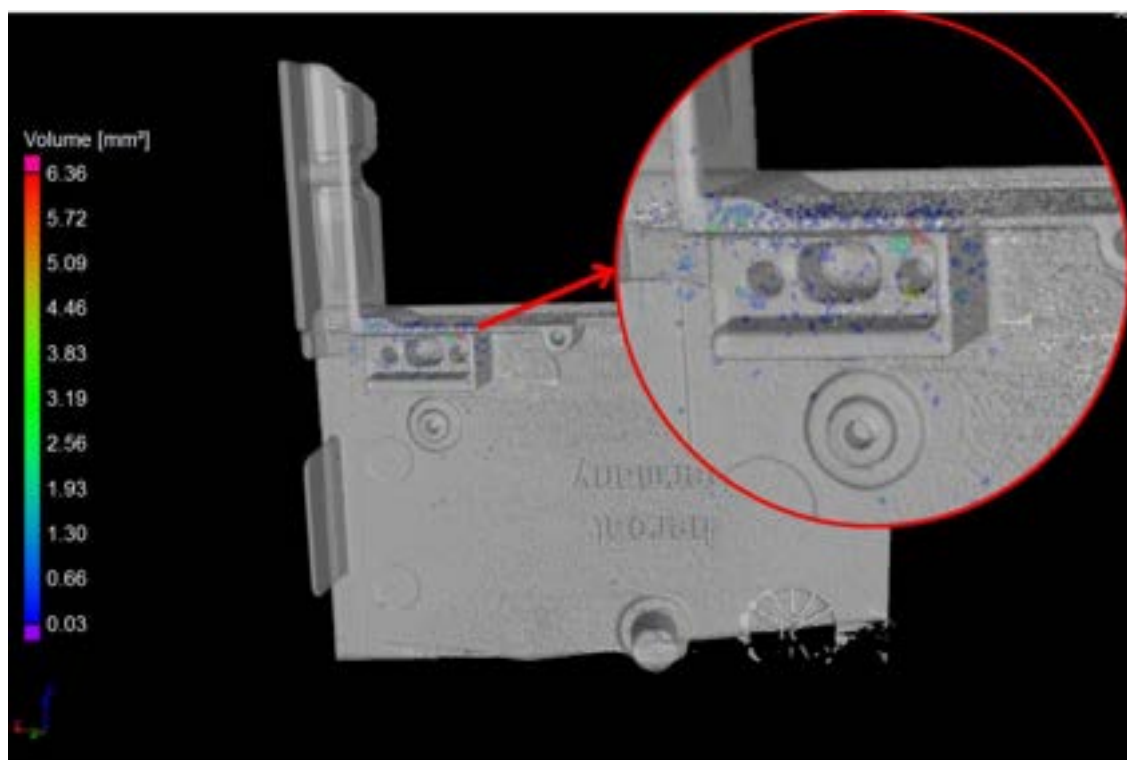
Rys. 4. 123 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



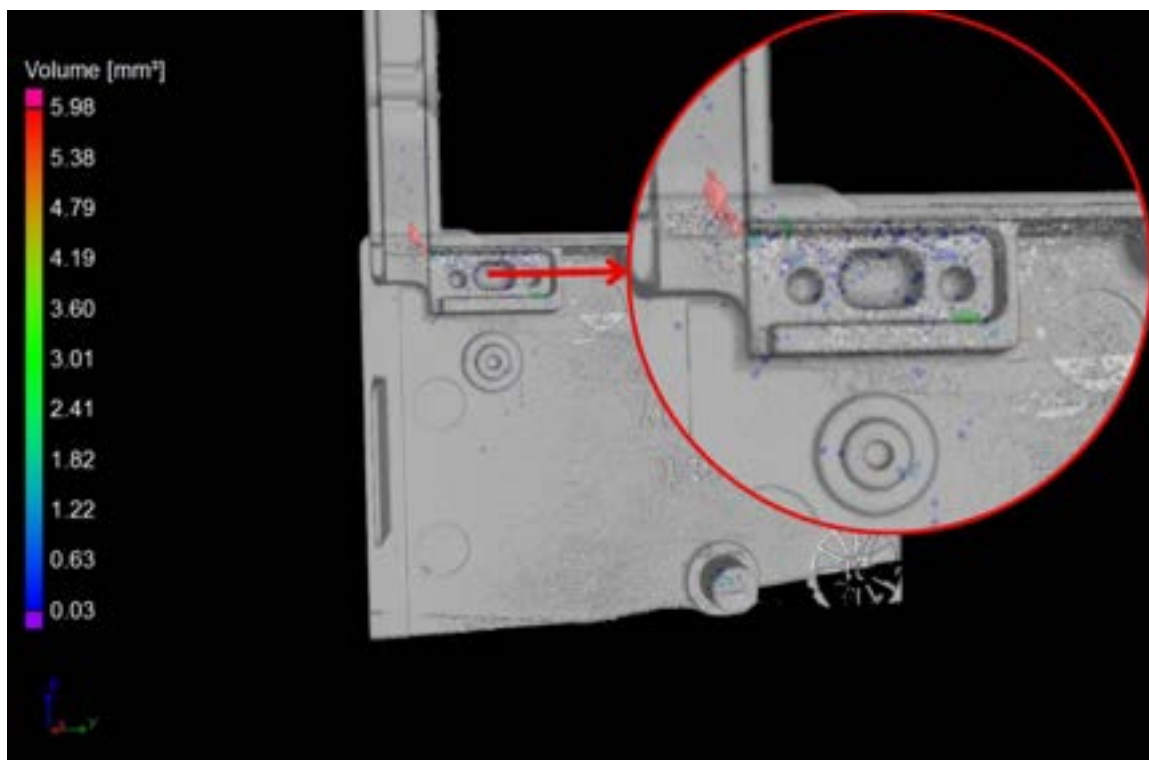
Rys. 4. 124 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



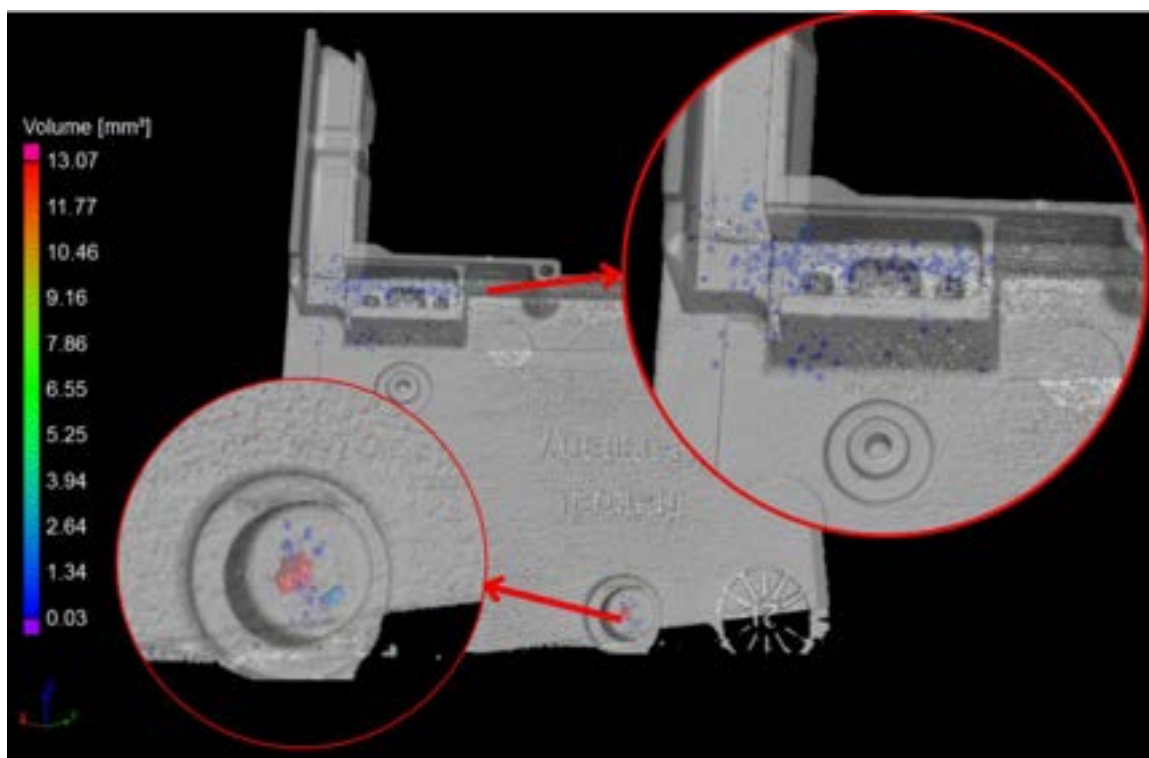
Rys. 4. 125 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4. 126 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4. 127 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego



Rys. 4. 128 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego

Wlewki ze stopu AlSi9Cu3, poddane różnym czasom rafinacji barbotażowej i zawierające różne ilości złomu obiegowego, wykazały wyraźne różnice w objętości porowatości w zależności od parametrów procesu, nie można wskazać jednak jednego trendu. Na przykład, we wlewkach zawierających 60% złomu obiegowego po rafinacji przez 7 minut (rys. 4.111), objętość największej porowatości wynosiła 7,35 mm³ (Tabela 4.10). Z kolei we wlewkach rafinowanych przez 9 minut (rys. 4.114), porowatość wzrosła do 636,04 mm³. To wskazuje, że dłuższy czas rafinacji, mimo zmniejszenia stopnia zagazowania, może prowadzić do zwiększenia objętości porowatości. Wydłużenie czasu rafinacji do 15 minut skutkowało zmniejszeniem objętości największej porowatości do 167,18 mm³. Podobny trend zaobserwowano w przypadku stopu zawierającego w swoim składzie 80 % złomu obiegowego. W przypadku wlewków zawierających w swoim składzie 70 % złomu obiegowego wydłużenie czasu rafinacji skutkowało zmniejszeniem objętości największej porowatości, po 7 minutach rafinacji objętość największej porowatości wynosiła 1165,01 mm³, a po 15 minutach zmniejszyła się do 87,05 mm³ (Tabela 4.10). We wszystkich przypadkach wydłużenie czasu rafinacji skutkowało obniżeniem poziomu zagazowania wlewków (Tabela 4.10).

W odlewach ciśnieniowych, jak pokazano na rysunkach 4.120–4.128, porowatość jest znacznie mniejsza w porównaniu do wlewków. We wszystkich analizowanych przypadkach objętość największej porowatości jest najmniejsza w odlewach rafinowanych przez 7 minut i jest ona zbliżona dla wszystkich składów stopów, wynosi 4,10-6,36 mm³. Za wyjątkiem odlewu zawierającego w swoim składzie 80 % złomu obiegowego, wydłużenie czasu rafinacji do 9 minut przyczyniło się do zmniejszenia objętości największej porowatości, przy czym najmniejszą porowatością charakteryzował się odlew zawierający w swoim składzie 60 % złomu obiegowego. Wydłużenie czasu rafinacji do 15 minut skutkowało zmniejszeniem objętości największej porowatości tylko w odlewie zawierającym w swoim składzie 80 % złomu obiegowego (Tabela 4.11).

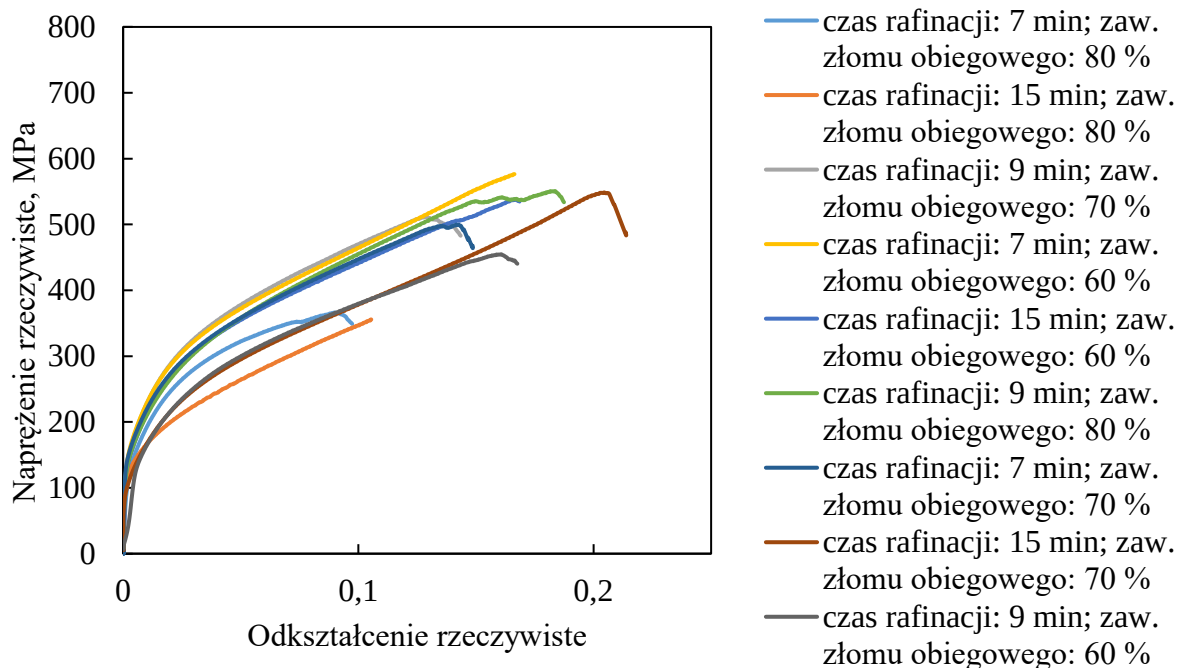
Wyniki przedstawione przez Gyarmati i wsp. dowodzą, że mimo zredukowania gazowych porowatości przez proces odgazowania, porowatości skurczowe były obecne w obszarach wlewków o nieregularnej strukturze, gdzie siły skurczowe były większe, szczególnie w miejscach, gdzie odlew krzepł najwolniej [127]. W odlewach ciśnieniowych, proces krzepnięcia jest znacznie szybszy i bardziej kontrolowany, co ogranicza formowanie się porowatości skurczowej, która jest bardziej widoczna we wlewkach ze względu na ich

wolniejsze krzepnięcie i większe rozmiary. Jak pokazują zdjęcia zamieszczone na rysunkach 4.124–4.128, odlewy ciśnieniowe charakteryzują się bardziej jednorodną mikrostrukturą i niższym stopniem porowatości, co jest wynikiem lepszej kontroli procesu chłodzenia i krystalizacji. Wlewki wykazują większą porowatość i zagazowanie, co wynika z ich większych rozmiarów i wolniejszego procesu krzepnięcia, natomiast odlewy ciśnieniowe, dzięki szybszemu krzepnięciu i lepszej kontroli procesu, mają mniejszą porowatość oraz wyższe właściwości mechaniczne.

4.2.4. Wyniki badań własności mechanicznych

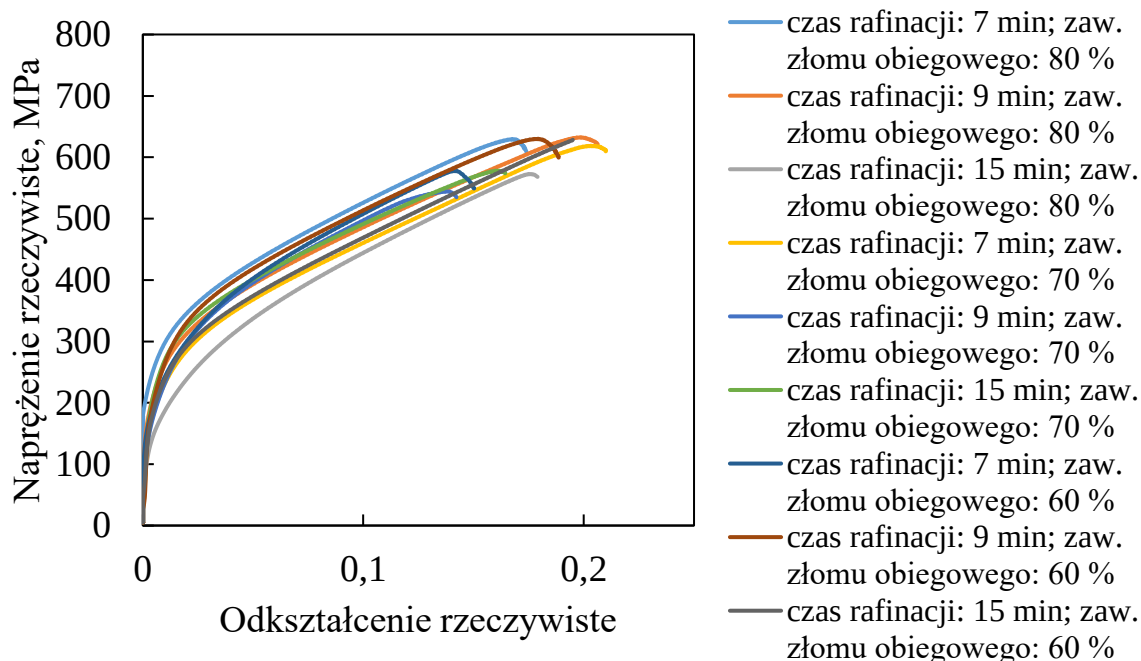
4.2.4.1. Wyniki uzyskane w jednoosiowej próbie ściskania

Próba jednoosiowego ściskania została przeprowadzona zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 3.7.1 Proces przerwano po osiągnięciu trwałego odkształcenia na poziomie 45 %. Analiza danych uzyskanych w ramach przeprowadzonej próby polegała na zestawieniu krzywych ściskania w układzie naprężenie rzeczywiste – odkształcenie rzeczywiste. Wyniki badań statycznej próby ściskania w zależności od czasu rafinacji i zawartości złomu obiegowego przedstawiono na rysunkach 4.129 i 4.130 oraz w tabeli 4.12.



Rys. 4. 129 Charakterystyka ściskania dla wlewków ze stopu AlSi9Cu3

Na podstawie wyników uzyskanych w jednoosiowej próbie ściskania wlewków ze stopu AlSi9Cu3 można zauważyć wzrost naprężenia wraz ze wzrostem odkształcenia dla wszystkich badanych próbek. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie osiągnęła próbka rafinowana przez 7 minut i zawierająca 80% złomu obiegowego, uzyskując naprężenie maksymalne na poziomie około 600 MPa przy odkształceniu wynoszącym około 0,18. Z kolei najniższą wytrzymałość odnotowano dla próbki rafinowanej przez 15 minut, zawierającej 80% złomu obiegowego, która osiągnęła naprężenie maksymalne wynoszące około 300 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,1. Analizując wyniki, można zauważyć, że próbki z mniejszą zawartością złomu obiegowego (60%) średnio wykazują mniejsze naprężenie maksymalne, ale jednocześnie większe odkształcenie rzeczywiste, co wskazuje na ich większą plastyczność. Na przykład, próbka rafinowana przez 9 minut i zawierająca 60% złomu obiegowego osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 500 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,18. Dla porównania, próbka rafinowana przez 7 minut i zawierająca 80% złomu osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 350 MPa przy mniejszym odkształceniu wynoszącym około 0,1. Wydłużenie czasu rafinacji poprawia ogólne własności mechaniczne próbek. Próbki z mniejszą zawartością złomu obiegowego wykazują lepszą plastyczność, co objawia się większą zdolnością do odkształceń. Z kolei próbki z większą zawartością złomu obiegowego charakteryzują się wyższą wytrzymałością, lecz mniejszą zdolnością do odkształceń co wpływa na ich niższą plastyczność.



Rys. 4.130 Charakterystyka ściskania dla odlewów ze stopu AlSi9Cu3

W przypadku wyników uzyskanych w jednoosiowej próbie ściskania odlewów ze stopu AlSi9Cu3 widoczny jest wyraźny wzrost naprężenia wraz ze wzrostem odkształcenia dla wszystkich badanych próbek. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie osiągnęła próbka rafinowana przez 9 minut, zawierająca 80% złomu obiegowego, uzyskując naprężenie maksymalne na poziomie około 650 MPa przy odkształceniu wynoszącym około 0,2. Wynik ten sugeruje, że nawet przy wysokiej zawartości złomu obiegowego materiał zachowuje bardzo dobre właściwości mechaniczne, co świadczy o optymalnej mikrostrukturze stopu po odpowiedniej rafinacji. Z kolei najniższą wytrzymałość odnotowano dla próbki rafinowanej przez 7 minut, zawierającej 60% złomu obiegowego, osiągając naprężenie maksymalne wynoszące około 500 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,15, co wskazuje na nieco niższą wytrzymałość w porównaniu do próbek z większą zawartością złomu. W tym przypadku mniejsza zawartość złomu mogła prowadzić do mniej korzystnej mikrostruktury, prawdopodobnie za sprawą niższej zawartości żelaza, co wpływa na ograniczenie wytrzymałości. Wydłużenie czasu rafinacji wpływa na poprawę właściwości mechanicznych próbek, zarówno dla tych o niższej, jak i wyższej zawartości złomu obiegowego. Na przykład, próbka rafinowana przez 9 minut i zawierająca 70% złomu osiągnęła maksymalne naprężenie na poziomie około 600 MPa przy odkształceniu wynoszącym około 0,18. Sugeruje to lepszą mikrostrukturę w porównaniu do próbki rafinowanej przez 7 minut i zawierającej 70% złomu, która osiągnęła maksymalne naprężenie na poziomie około 550 MPa przy podobnym odkształceniu. Próbka rafinowana przez 15 minut, zawierająca 60% złomu, osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 600 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,2. Dla porównania, próbka rafinowana przez 7 minut, zawierająca 80% złomu obiegowego, osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 600 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,17, co wskazuje na wysoką wytrzymałość, ale mniejszą podatność na odkształcenie. Wyniki dla próbek z 80% złomu obiegowego są szczególnie interesujące, ponieważ mimo wyższej zawartości złomu, materiały te wykazują zarówno wysoką wytrzymałość, jak i wysoką zdolność do odkształceń. Próbka rafinowana przez 7 minut z 80% złomu obiegowego osiągnęła naprężenie maksymalne na poziomie około 600 MPa, przy odkształceniu wynoszącym 0,19. Wyniki te sugerują, że odpowiedni czas rafinacji pozwala na zachowanie wysokich własności mechanicznych, nawet przy wysokim udziale złomu, co może wynikać z dobrej dystrybucji faz i korzystnych warunków mikrostrukturalnych, takich jak mniejsze defekty mikrostruktury oraz równomiernie rozłożone cząstki krzemu w osnowie aluminiowej. Zarówno próbki z mniejszą, jak i większą zawartością złomu obiegowego charakteryzują się

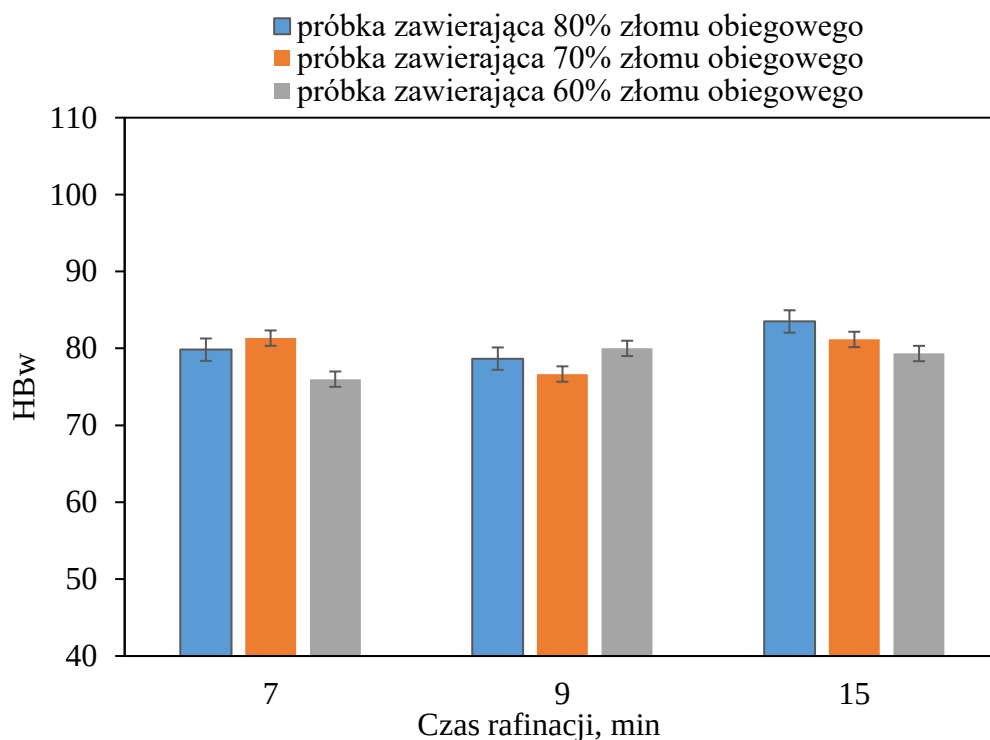
dobrymi własnościami mechanicznymi, przy czym większa zawartość złomu niekoniecznie pogarsza wytrzymałość, jak sugerowałyby wcześniejsze założenia. Kluczowym czynnikiem okazuje się być czas rafinacji, który optymalizuje mikrostrukturę stopu i pozwala na osiągnięcie wysokich wartości naprężenia maksymalnego oraz odpowiedniej plastyczności, niezależnie od zawartości złomu [10].

Tabela 4.12 Zestawienie zbiorcze wartości naprężeń dla wlewków oraz odlewów

Wariant	Wlewki		Odlewy	
	σ ,MPa dla $\varepsilon=0.05$	σ ,MPa dla $\varepsilon=0.1$	σ ,MPa dla $\varepsilon=0.05$	σ ,MPa dla $\varepsilon=0.1$
7-80	323	349	428	526
9-80	264	347	393	487
15-80	378	470	337	444
7-70	372	465	368	461
9-70	356	442	396	497
15-70	358	455	403	492
7-60	358	447	403	508
9-60	295	379	418	514
15-60	299	380	374	469

4.2.4.2 Wyniki pomiarów twardości metodą Brinella

Badania twardości metodą Brinella zostały przeprowadzone zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 3.7.2, zarówno dla wlewków jak i odlewów, czego wyniki w formie wykresów przedstawiono na rysunku 4.131 oraz 4.132.

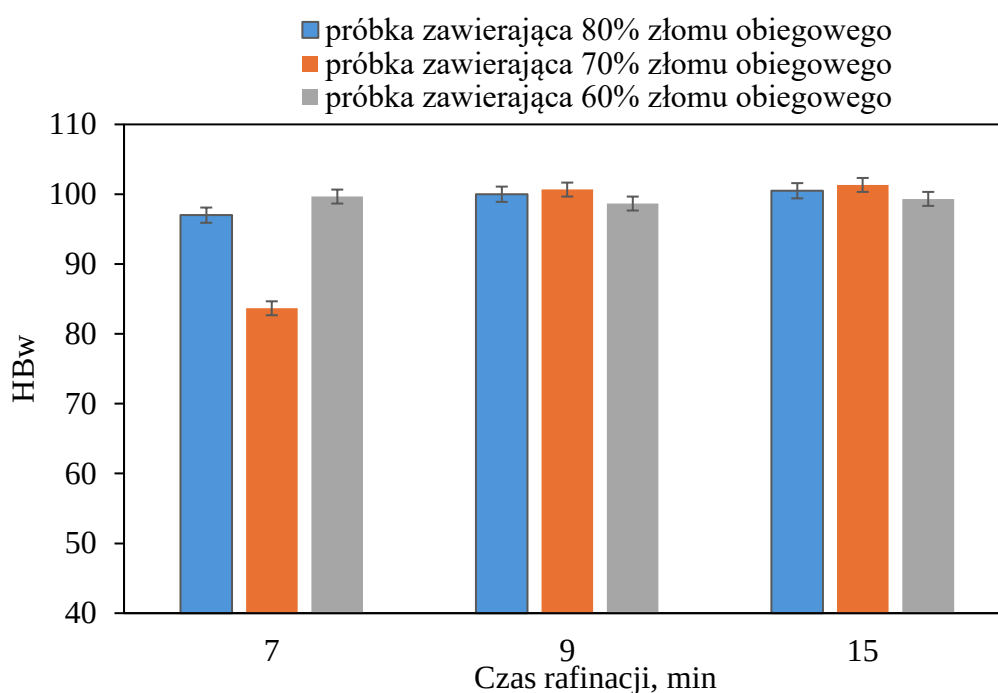


Rys. 4.131 Wyniki pomiarów twardości wlewków wykonanych ze stopu AlSi9Cu3

Analiza wyników pomiaru twardości wlewków wykonanych ze stopu AlSi9Cu3 przedstawionych na rysunku 4.131, wskazuje na różnice w poziomie twardości w zależności od zawartości złomu obiegowego oraz czasu rafinacji. Dla wlewków zawierających 80% złomu obiegowego po 7 minutach rafinacji uzyskano twardość na poziomie 76 HBW, co świadczy o wysokiej efektywności tego wariantu rafinacji. Wraz z wydłużeniem czasu rafinacji do 9 minut, twardość wzrosła do 80 HBW. Przy dalszym wydłużeniu czasu rafinacji do 15 minut, twardość nieznacznie spadła do 79 HBW. Dla wlewków zawierających 70% złomu obiegowego, twardość była wyższa w porównaniu do wlewków z 80% zawartością złomu obiegowego. Po 7 minutach rafinacji twardość wyniosła 81 HBW, wydłużenie czasu rafinacji do 9 minut skutkowało obniżeniem twardości do 77 HBW, co wskazuje na pogorszenie własności mechanicznych przy dłuższym czasie rafinacji. Po 15 minutach rafinacji twardość ponownie wzrosła do 81 HBW, co wskazuje, że dla tej zawartości złomu obiegowego dłuższy czas rafinacji wpływa korzystnie na twardość materiału. W próbkach zawierających 60% złomu obiegowego, po 7 minutach rafinacji twardość wynosiła 76 HBW, co jest porównywalne z próbkami zawierającymi 80% złomu. Po 9 minutach rafinacji

twardość wzrosła do 80 HBW, a po 15 minutach była na zbliżonym poziomie i wynosiła 79 HBW.

Podsumowując, twardość próbek jest wyższa dla krótszych czasów rafinacji (7 minut) oraz wyższej zawartości złomu obiegowego (70%), natomiast wydłużenie czasu rafinacji do 15 minut w próbkach zawierających 80% i 60% złomu powoduje jedynie minimalne zmiany w twardości.



Rys. 4.132 Wyniki pomiarów twardości odlewów wykonanych ze stopu AlSi9Cu3

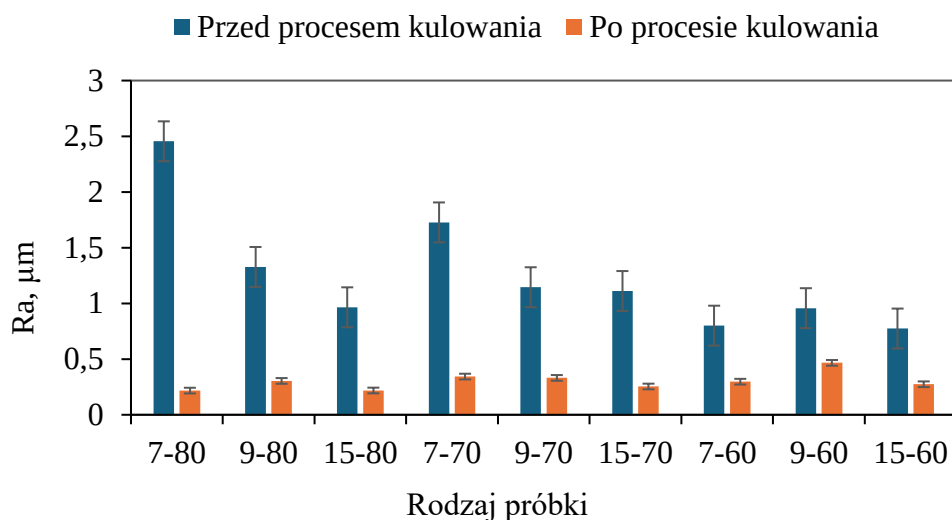
Wyniki pomiaru twardości odlewów ciśnieniowych wykonanych ze stopu AlSi9Cu3 przedstawiono w formie wykresu na rysunku 4.132. Twardość odlewów wykonanych ze stopu zawierającego 80 % złomu obiegowego rafinowanych przez 7 minut wynosiła 97 HBW. Wraz z wydłużeniem czasu rafinacji do 9 minut, twardość nieznacznie wzrosła do 100 HBW. Dalsze wydłużenie czasu rafinacji do 15 minut nie wpłynęło na poziom twardości. Podobnie w przypadku stopu zawierającego w swoim składzie 60 % złomu obiegowego, wydłużenie czasu rafinacji barbotażowej nie powodowało zmian twardości, która wynosiła dla wszystkich wariantów ok. 99 HBW. Jedynie w przypadku odlewów

zawierających w swoim składzie 70 % złomu obiegowego stwierdzono korzystny wpływ czasu rafinacji barbotażowej na twardość. Twardość odlewów rafinowanych przez 7 minut wynosiła 84 HBw. Wydłużenie czasu rafinacji do 9 minut skutkowało wzrostem twardości o 17 HBw do poziomu 101 HBw. Dalsze wydłużenie czasu rafinacji nie wpłynęło na zmiany twardości odlewów wykonanych z tego stopu.

Podsumowując można stwierdzić, że twardość badanych odlewów jest wyższa po rafinacji przez 9 i 15 minut, bez względu na skład chemiczny stopu.

4.2.5. Wyniki pomiarów chropowatości odlewów

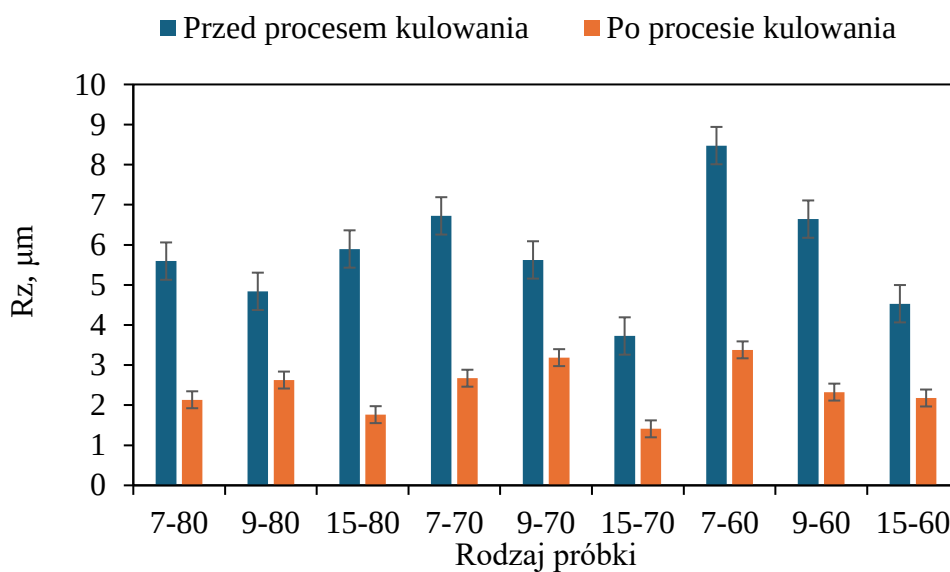
Wyniki pomiarów chropowatości odlewów ciśnieniowych wyrażone przez Ra i Rz przedstawiono w formie graficznej na rys. 4.133 oraz 4.134. Na rysunku 4.133 zamieszczono wykres przedstawiający wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości od linii średniej (Ra) dla odlewów przed i po procesie kulowania, z kolei na rys. 4.134 wartości wysokości chropowatości Rz.



Rys. 4.133 Wykres ilustrujący wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości od linii średniej (Ra) dla odlewów przed i po procesie kulowania; oś X przedstawia różne warianty procesu rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego, oś Y przedstawia wartości Ra wyrażone w mikrometrach

Przed procesem kulowania wartości Ra dla poszczególnych odlewów mieściły się w zakresie od 0,8 μm do 2,455 μm , co wskazuje na zróżnicowany poziom chropowatości

w zależności od rodzaju próbki i warunków obróbki. Największą chropowatością powierzchni charakteryzowała się próbka rafinowana przez 7 minut i zawierająca 80% złomu obiegowego - R_a wyniosło 2,455 μm . Najmniejszą chropowatością charakteryzował się z kolei odlew wykonany ze stopu o zawartości złomu obiegowego wynoszącego 60 % i rafinowanego przez 7 minut - R_a wyniosło 0,8 μm . Po procesie kulowania wartości R_a zmalały, co świadczy o poprawie gładkości powierzchni odlewów. Określone wartości R_a po procesie kulowania wynosiły od 0,217 μm dla odlewu rafinowanego przez 7 minut i zawartości złomu obiegowego 80% do 0,466 μm dla odlewu rafinowanego przez 9 minut i zawartości złomu obiegowego 60%. Największe wygładzenie powierzchni odnotowano w przypadku odlewów o początkowo najwyższej chropowatości, co potwierdza skuteczność procesu kulowania w redukcji nierówności powierzchni. Wyniki te wskazują, że proces kulowania znacznie poprawia gładkość powierzchni odlewów AlSi9Cu3 , obniżając wartości R_a w niektórych przypadkach nawet o ponad 90%. Szczególnie efektywny okazał się dla odlewów o wyższej początkowej chropowatości, takich jak odlewy wykonane ze stopu rafinowanego przez 7 minut zawierającego 80 % złomu obiegowego gdzie różnica przed i po procesie kulowania wyniosła aż 2,238 μm .



Rys. 4.134 Wysokość chropowatości odlewów według dziesięciu punktów profilu; oś X przedstawia różne warianty procesu rafinacji barbotażowej i zawartości złomu obiegowego, oś Y przedstawia wartości R_z wyrażone w mikrometrach

Wyniki pomiarów parametru R_z dla odlewów AlSi9Cu3 przed i po procesie kulowania przedstawiono na rysunku 4.134. Uzyskane dane dowodzą, że wartość parametru R_z przed

procesem kulowania wykazywała znaczną zmienność, zależną od parametrów obróbki. Największe obniżenie wartości Rz zanotowano w próbkach o początkowo najwyższej wartości tego parametru, tj. dla odlewu rafinowanego przez 7 minut i zawierającego 60% złomu obiegowego, wartość Rz obniżyła się z 8,5 μm do 2,3 μm . Najmniejsze różnice w wartościach Rz po procesie kulowania odnotowano w odlewach rafinowanych przez 15 minut zawierających odpowiednio 60 i 70 % złomu obiegowego. Na przykład wyznaczona wartość Rz dla odlewu rafinowanego przez 15 minut i zawierającego 70% złomu obiegowego spadła z 3,7 μm do 1,5 μm . Wyniki te potwierdzają, że kulowanie skutecznie redukuje wysokość chropowatości Rz powierzchni odlewów, niezależnie od czasu rafinacji i zawartości złomu obiegowego, co potwierdzają uzyskane wyniki.

Analizując oba wykresy, można zauważyć, że proces kulowania znacząco wpływa na redukcję chropowatości powierzchni odlewów AlSi9Cu3 , zarówno dla wskaźnika Ra, jak i Rz. W przypadku wskaźnika Ra, który mierzy średnie odchylenie profilu od linii średniej, redukcja chropowatości jest szczególnie wyraźna, co wskazuje na ogólną poprawę gładkości powierzchni odlewów po kulowaniu. Największy spadek wartości parametru Ra zaobserwowano dla odlewów rafinowanych przez 7 minut i zawierających w swoim składzie 80% złomu obiegowego - różnica wyniosła aż 2,238 μm . Podobną tendencję można zauważyć dla parametru Rz, który mierzy różnicę między najwyższym a najniższym punktem profilu powierzchni. Redukcja Rz po procesie kulowania wskazuje na zmniejszenie najbardziej wyraźnych nierówności, co potwierdza skuteczność procesu kulowania w eliminowaniu defektów powierzchniowych. Największą redukcję parametru Rz odnotowane w przypadku odlewów rafinowanych przez 7 minut i zawierających w swoim składzie 60% złomu obiegowego - różnica wyniosła około 6,293 μm . Proces kulowania okazał się szczególnie efektywny dla próbek rafinowanych przez 7 i 9 minut, gdzie zaobserwowano największą poprawę gładkości powierzchni.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Sformułowana teza pracy zakłada, że poprzez odpowiedni dobór zawartości złomu poprocesowego, istnieje możliwość wytworzenia wysokiej jakości odlewów wysokociśnieniowych zimnokomorowych charakteryzujących się odpowiednimi właściwościami mechanicznymi oraz niskim stopniem zagazowania. Jednocześnie możliwe jest skrócenie czasu rafinacji barbotażowej.

Będące przedmiotem prowadzonych badań, w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, stopy AlSi9Cu i AlSi12, ze względu na swoją wytrzymałość, twardość i plastyczność, znajdują szerokie zastosowanie, jednak ich przetwarzanie, zwłaszcza z udziałem złomu obiegowego, wymaga dalszej optymalizacji. Rafinacja barbotażowa, polegająca na mieszaniu ciekłego stopu za pomocą gazów obojętnych, usuwa zanieczyszczenia, zmniejsza porowatość i poprawia mikrostrukturę, co jest kluczowe dla jakości odlewów. W związku z tym celem badań była optymalizacja parametrów procesu, takich jak czas rafinacji i zawartość złomu, w celu uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych i mikrostrukturalnych przy minimalnych defektach oraz jednocześnie akceptowalnych kosztach. Badania przeprowadzono na dwóch stopach aluminium AlSi9Cu3 i AlSi12, obejmując cały proces technologiczny: od topienia metalu w piecach indukcyjnych, przez odlewanie na maszynach ciśnieniowych, aż po obróbkę końcową detali. Materiał wsadowy składał się z mieszanki gąsek i złomu, gdzie zawartość złomu wynosiła 60%, 70% i 80%. Każda partia była rafinowana przez 0, 7, 9 i 15 minut. W celu realizacji przyjętych celów przeprowadzono badania własności mechanicznych, w tym pomiar twardości metodą Brinella oraz jednoosiową próbę ściskania. Następnie dokonano analizy mikrostrukturalnej z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej. Analizę wielkości wydzieleni wykonano za pomocą programu ImageJ. Dodatkowo przeprowadzono badania z użyciem rentgenowskiej tomografii komputerowej, aby zbadać strukturę i rozmieszczenie porów wewnątrz próbek. Wyznaczono także chropowatość powierzchni odlewów przed i po procesie kulowania.

Mikrostruktura wlewków AlSi12 (rys. 4.1–4.9) charakteryzuje się występowaniem dendrytów fazy α oraz iglastymi wydzieleniami krzemu w fazie eutektycznej (α +Si). Wydzielenia te są nieregularne i negatywnie wpływają na plastyczność stopu ze względu na kształt krzemu, który może powodować koncentrację naprężeń i prowadzić do pęknięcia. Rafinacja barbotażowa przyczynia się do zmniejszenia rozmiaru wydzieleni faz krzemowych oraz zapewnia ich bardziej jednorodny rozkład w strukturze stopu. Wyniki te są zgodne

z badaniami Gyarmatiego i wsp. [127], w których rafinacja rotacyjna również przyczyniła się do zmniejszenia wydzielen krzemu oraz ujednolicenia rozmieszczenia faz międzymetalicznych w stopie AlSi. W badaniach Matejki i wsp. [72], opisano wpływ wielokrotnego przetapiania stopu AlSi9Cu3 na wzrost wydłużonych faz żelaza, takich jak β -Al₅FeSi, co negatywnie wpływało na właściwości wlewków. Podobne zjawisko zaobserwowano w stopie AlSi12, gdzie zwiększenie ilości złomu obiegowego prowadziło do wzrostu liczby i rozmiaru faz międzymetalicznych (rys. 4.27–4.28). Odlewy ciśnieniowe wykonane ze stopu AlSi12 (rys. 4.10–4.18) charakteryzują się bardziej drobnziarnistą i jednorodną mikrostrukturą w porównaniu z wlewkami. Szybkie chłodzenie podczas procesu odlewania zmniejsza rozmiar dendrytów fazy α oraz prowadzi do zmiany morfologii wydzielen krzemowych, które przybierają bardziej globularną formę. Badania Gyarmatiego i wsp. [127] potwierdzają, że rafinacja i szybkie chłodzenie redukuje rozmiary faz międzymetalicznych, co pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne stopów. W pracy Li i wsp. [81] również podkreślono, że zastosowanie rafinacji barbotażowej w odlewach poprawia jednorodność mikrostruktury, zmniejsza porowatość oraz liczbę wydłużonych wydzielen, co przekłada się na lepszą wytrzymałość odlewów. We wlewkach ze stopu AlSi9Cu3, których mikrostruktura przedstawiona jest na rysunkach 4.65–4.73, zgodnie z badaniami Matejki i wsp. [72], wielokrotne przetapianie, a tym samym zwiększenie udziału złomu obiegowego, prowadziło do wzrostu liczby i długości faz bogatych w żelazo, takich jak β -Al₅FeSi. Długość tych faz wzrosła z 55,7 μ m po pierwszym przetopieniu (D1) do 89,4 μ m po siódmym przetopieniu (D7). Obecność wydłużonych faz negatywnie wpływa na plastyczność i wytrzymałości na pękanie stopów. Podobne wnioski przedstawiono w pracy Abdulsahiba [20], gdzie dodatek miedzi do stopu AlSi9Cu3 prowadził do wydzielania faz Al₂Cu. Choć poprawiało to twardość, jednocześnie zmniejszało plastyczność materiału, co jest zgodne z badaniami przedstawionymi w niniejszej dysertacji (rys. 4.129–4.132). Uzyskane wyniki potwierdzają, że dodatek miedzi sprzyja tworzeniu się twardych wydzielen fazy Al₂Cu, co zwiększa twardość stopu, ale negatywnie wpływa na jego plastyczność. Na przykład, w mikrostrukturze wlewków ze stopu AlSi9Cu3 wydłużone wydzielania bogate w miedź (faza Al₂Cu) powodują wzrost twardości, co widać na rysunkach 4.131 i 4.132. Jednocześnie obecność tych faz prowadzi do lokalnych koncentracji naprężeń, co obniża plastyczność stopu (rys. 4.129 i 4.130). Badania Hurtalovej i wsp. [51], wskazują, że złom obiegowy przyczynia się do zwiększenia ilości i rozmiarów faz międzymetalicznych, co pogarsza jednorodność struktury wlewków AlSi9Cu3. Wyniki te pokrywają się z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy, co widać na przykładzie próbek

z większym udziałem złomu (rys. 4.65 - 4.73), które wykazywały obecność licznych wydzielen w mikrostrukturze pogarszających jednorodność strukturalną. Jednak wydłużenie czasu rafinacji zmniejszało ten efekt (rys. 4.70–4.73). W przypadku mniejszej zawartości złomu obiegowego oraz dłuższego czasu rafinacji, mikrostruktura stopu stawiała się bardziej jednorodna, co wskazuje na skuteczniejsze oczyszczanie stopu i zmniejszenie ilości faz międzymetalicznych, zgodnie z obserwacjami Hurtalova. W odlewach ze stopu AlSi9Cu3 z wyższą zawartością złomu obiegowego zauważono większą ilość faz $\beta\text{-Fe}$ (rys. 4.87–4.90), co negatywnie wpływa na plastyczność. Jednak dzięki rafinacji i szybszemu chłodzeniu wydzielenia te są mniejsze i bardziej zwarte, co poprawia ogólną wytrzymałość w porównaniu do odlewów ze stopu AlSi12 . Zarówno w odlewach ciśnieniowych ze stopu AlSi9Cu3 , jak i AlSi12 , proces rafinacji i szybkie chłodzenie przyczyniają się do poprawy jednorodności mikrostruktury poprzez zmniejszenie wielkości wydzielen krzemowych oraz faz międzymetalicznych ($\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$). W obu tych stopach, wlewki zawierają większe, bardziej wydłużone fazy międzymetaliczne, co negatywnie wpływa na plastyczność i wytrzymałość materiału. Obecność złomu obiegowego zwiększa liczbę tych faz. Odlewy ze stopu AlSi12 charakteryzują się bardziej drobnoziarnistą mikrostrukturą z globularnymi wydzieleniami krzemowymi, co poprawia ich wytrzymałość na rozciąganie i plastyczność. Z kolei dodatek miedzi w odlewach i wlewkach ze stopu AlSi9Cu3 przyczynia się do powstawania faz Al_2Cu , które zwiększają twardość, ale jednocześnie zmniejszają plastyczność materiału.

Badane stopy AlSi9Cu3 i AlSi12 różnią się przede wszystkim morfologią i rodzajem wydzielen w mikrostrukturze, co ma wpływ na ich właściwości mechaniczne. W stopie AlSi12 , widoczne są igiełkowate i nieregularne wydzielenia fazy $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$, które mają charakterystyczną morfologię przypominającą "pismo chińskie". Ta faza jest bardziej pożądana od fazy β (Al_5FeSi), ponieważ korzystniej wpływa na właściwości mechaniczne stopu. W stopie AlSi9Cu3 , szczególnie w próbkach z większą zawartością złomu obiegowego, pojawiają się również wydzielenia o morfologii "pisma chińskiego", jednak dotyczą one fazy Al_5FeSi oraz, w mniejszym stopniu, $\text{Al}_{15}\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$, która powstaje w obecności miedzi i magnezu. Wydłużenie czasu rafinacji w stopie AlSi9Cu3 prowadzi do ujednorodnienia mikrostruktury i zmniejszenia liczby wydzielen. Generalnie, w obu stopach kluczowa jest kontrola fazy α , która poprawia właściwości mechaniczne, natomiast faza β , charakterystyczna dla obu stopów, jest mniej pożądana z powodu niekorzystnego wpływu na ich wytrzymałość.

Wyniki pomiarów stopnia zagazowania wlewków ze stopu AlSi12 wykazały istotne różnice przed i po procesie rafinacji. Przykładowo, przed rafinacją poziom zagazowania we wlewkach wynosił od 13% do 19%, natomiast po 15 minutach rafinacji obniżył się poniżej 5%, przy czym w stopie z najwyższą zawartością złomu obiegowego (80%) poziom zagazowania zmniejszył się do 1,32% (Tabela 4.1). Wzrost zawartości złomu obiegowego zwiększał początkowy poziom zagazowania, jednakże proces rafinacji znacząco zredukował poziom gazów. Na przykład, przy 60% zawartości złomu początkowy poziom zagazowania wynosił 13,28%, a po rafinacji obniżył się do 0,78% (Tabela 4.3). Te dane wskazują, że czas rafinacji jest kluczowym czynnikiem wpływającym na zmniejszenie poziomu gazów we wlewkach ze stopu AlSi12. Podobne tendencje zaobserwowano we wlewkach ze stopu AlSi9Cu3. Wyniki przedstawione w tabelach 4.7-4.9 potwierdzają, że przed rafinacją poziom zagazowania wynosił od 13,28% do 19,71%, a po 15 minutach rafinacji obniżył się do zbliżonego poziomu, jak w przypadku stopu AlSi12. W próbkach zawierających 80% złomu obiegowego (Tabela 4.7) poziom zagazowania po rafinacji został zredukowany do 1,32%, a dla złomu o 60% zawartości (Tabela 4.9) do 0,78%. Podobnie jak w przypadku stopu AlSi12, wyższa zawartość złomu zwiększała początkowy poziom gazów, ale proces rafinacji skutecznie redukował ich nadmiar, co potwierdzają również dane literaturowe oraz badania Gumienego i wsp. przedstawione w pracy [143]. Zarówno w przypadku stopu AlSi12, jak i AlSi9Cu3, proces rafinacji barbotażowej wykazuje podobny wpływ na zmniejszenie poziomu zagazowania, niezależnie od zawartości złomu obiegowego. W obu stopach początkowe poziomy zagazowania były wyższe przy większej ilości złomu obiegowego, co wynikało z obecności gazów w złomie, jednak rafinacja znacząco je redukowała, co poprawiało jednorodność mikrostruktury i właściwości mechaniczne stopów. Różnice w stopniu zagazowania przed rafinacją mogą także wynikać ze zróżnicowanej temperatury przetopu tych stopów, która była wyższa w przypadku stopu z miedzią AlSi9Cu3 (719–746°C), niż w stopie AlSi12 (710–730°C), co mogło wpływać na stopień zagazowania przed rafinacją. Mimo tych różnic, efektywność rafinacji w obu stopach była bardzo wysoka, a czas rafinacji wynoszący 15 minut pozwalał osiągnąć minimalny poziom zagazowania. Wlewki ze stopu AlSi12 wykazywały nieco wyższy poziom zagazowania początkowego, co może być spowodowane różnicami w zawartości pierwiastków stopowych, takich jak krzem i żelazo.

Wyniki dotyczące wlewków ze stopu AlSi12 potwierdzają wcześniejsze badania, takie jak te prowadzone przez Gyarmati i współ. [127], które również wskazywały na redukcję

porowatości po procesie rafinacji. Podobnie jak w wynikach uzyskanych w ramach niniejszej pracy dla stopu AlSi12, Gyarmati zauważył, że wydłużenie czasu rafinacji wpływa na redukcję porowatości gazowej, jednak pozostawia porowatość skurczową w obszarach o nieregularnej strukturze. Wyniki dotyczące porowatości w obszarze odlewów, zawarte w pracy potwierdzają, że większa prędkość chłodzenia, jak w przypadku odlewów ciśnieniowych, korzystnie wpływa na ograniczenie porowatości i poprawę własności mechanicznych w porównaniu do wlewków. Odlewy ciśnieniowe wykonane z obu stopów, dzięki szybszemu krzepnięciu, cechują się znacznie mniejszą porowatością oraz bardziej jednorodną mikrostrukturą, co bezpośrednio przekłada się na lepszą wytrzymałość mechaniczną. Wyniki te są zgodne z danymi prezentowanymi w literaturze, w tym z badaniami Mathew i wsp. [111], gdzie również zauważono zmniejszenie porowatości skurczowej dzięki szybszemu chłodzeniu. W przypadku wlewków, gdzie proces krzepnięcia jest wolniejszy, porowatość jest wyższa, co prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych.

Większe rozmiary porowatości zaobserwowano we wlewkach wykonanych ze stopu AlSi9Cu3, zwłaszcza przy krótszych czasach rafinacji i wyższej zawartości złomu obiegowego, co dodatkowo potwierdza stwierdzenie, że wolniejsze krzepnięcie sprzyja tworzeniu się wad (rys. 4.111–4.119). Przy dłuższych czasach rafinacji porowatość była mniejsza, co wynikało z lepszej jednorodności mikrostruktury i redukcji skurczu podczas krzepnięcia. Jest to szczególnie widoczne na rysunkach przedstawiających porowatość we wlewkach po różnych czasach rafinacji i zawartości złomu. Na przykład rys. 4.114 pokazuje zwiększoną porowatość po 9 minutach rafinacji, natomiast rys. 4.116 przedstawia bardziej jednorodną mikrostrukturę po dłuższym czasie rafinacji. Wyniki te są zgodne z obserwacjami Samardziova i wsp. [146], którzy także zauważyli, że nieregularna mikrostruktura i wolniejsze krzepnięcie sprzyjają powstawaniu porowatości skurczowej w odlewach AlSi9Cu3. Badania Gyarmati i wsp. [127] wskazują też, że szybkie krzepnięcie w odlewach ciśnieniowych AlSi9Cu3 prowadzi do mniejszej porowatości, co potwierdzają także uzyskane wyniki w ramach niniejszej pracy zarówno dla odlewów, ale przede wszystkim wlewków wykonanych z obu stopów. W obu przypadkach, odlewy ciśnieniowe wykazują znacznie mniejszą porowatość niż wlewki, co wynika z lepszej kontroli procesu chłodzenia oraz szybszego krzepnięcia. Na przykład, w stopie AlSi12, odlewy charakteryzowały się mniejszą objętością największej porowatości ($0,50 \text{ mm}^3$ dla odlewu o zawartości 60% złomu obiegowego i czasie rafinacji 9 minut) w porównaniu do wlewka

o tej samej zawartości złomu, gdzie porowatość wyniosła $107,179 \text{ mm}^3$. Wyniki te są zgodne z uzyskanymi dla odlewów AlSi9Cu3 , gdzie również obserwowano zmniejszenie porowatości (Tabela. 4.4, 4.10). We wlewkach wykonanych ze stopu AlSi12 , objętość największych porowatości była niższa niż w przypadku wlewków ze stopu AlSi9Cu3 . We wlewkach ze stopu AlSi12 zawierających 60% złomu obiegowego i rafinowanych przez 9 minut, porowatość wynosiła $107,179 \text{ mm}^3$ [111]. Dla analogicznych wlewków ze stopu AlSi9Cu3 porowatość wynosiła $636,04 \text{ mm}^3$, co wskazuje na większe porowatości we wlewkach ze stopu AlSi9Cu3 . Wyniki tomograficzne potwierdzają, że dłuższy czas rafinacji w obu przypadkach prowadzi do zmniejszenia porowatości, przy czym wlewki ze stopu AlSi12 osiągają bardziej jednorodną mikrostrukturę niż te ze stopu AlSi9Cu3 . We wlewkach ze stopu AlSi9Cu3 większa zawartość złomu obiegowego sprzyja większej porowatości, co jest związane z obecnością faz międzymetalicznych (Tabela 4.5, 4.111).

Wlewki ze stopu AlSi9Cu3 wykazują większą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do tych ze stopu AlSi12 , szczególnie przy krótszym czasie rafinacji i większej zawartości złomu obiegowego. Najwyższe naprężenie ściskające dla wlewków stopu AlSi9Cu3 wynosiło 600 MPa, co jest wynikiem większej zawartości miedzi i żelaza, które tworzą twarde fazy międzymetaliczne, takie jak Al_2Cu i Al_5FeSi , zwiększające wytrzymałość mechaniczną. Wlewki ze stopu AlSi12 , mimo że wykazują większą plastyczność, osiągnęły maksymalnie naprężenie na poziomie 750 MPa jedynie przy mniejszej zawartości złomu (60%) i dłuższym czasie rafinacji. Ten wynik jest związany z bardziej jednorodną mikrostrukturą krzemową, która sprzyja deformacji. Wzrost zawartości złomu w stopie AlSi12 prowadzi jednak do znacznego obniżenia wytrzymałości, co jest związane z większą ilością defektów mikrostrukturalnych, które osłabiają materiał. To dowodzi, że stop AlSi9Cu3 wykazuje lepsze właściwości w warunkach obciążenia mechanicznego, podczas gdy stop AlSi12 charakteryzuje się większą plastycznością, lecz mniejszą odpornością na duże naprężenia. Podobne różnice zaobserwowano w przypadku odlewów obu stopów. Próbkę odlewów AlSi9Cu3 z większą zawartością złomu obiegowego (80%) oraz dłuższym czasem rafinacji (9 minut) osiągnęły maksymalne naprężenie na poziomie około 650 MPa przy odkształceniu wynoszącym około $\varepsilon = 0,2$. Dłuższy czas rafinacji miał korzystny wpływ na mikrostrukturę, przyczyniając się jednocześnie do zwiększenia wytrzymałości próbek, co jest związane z bardziej jednorodnym rozkładem faz międzymetalicznych oraz mniejszą porowatością. Dla porównania, odlewy AlSi12 osiągały maksymalne naprężenie na poziomie około 850 MPa przy odkształceniu rzeczywistym wynoszącym 0,3 w próbkach

rafinowanych przez 15 minut z 80% zawartością złomu obiegowego. Podobnie jak w przypadku AlSi9Cu3, dłuższy czas rafinacji sprzyjał poprawie wytrzymałości, jednak różnice w plastyczności były bardziej widoczne. Zarówno odlewy, jak i wlewki ze stopu AlSi12 wykazywały większą zdolność do odkształceń plastycznych, szczególnie w próbkach z niższą zawartością złomu (60%). Jest to efektem mniejszych defektów mikrostrukturalnych oraz bardziej równomiernego rozkładu cząstek krzemu. Stop AlSi9Cu3, pomimo wyższej twardości, charakteryzował się mniejszą plastycznością, co jest wynikiem obecności twardych faz międzymetalicznych, takich jak Al₅FeSi, które sprzyjają koncentracji naprężeń i mogą obniżać zdolność do odkształceń.

Wyniki badań twardości wlewków stopów AlSi9Cu3 i AlSi12 wykazują wyraźne różnice. Wyższą twardością charakteryzuje się stop AlSi9Cu3, szczególnie przy wyższej zawartości złomu obiegowego oraz wydłużonym czasie rafinacji (rys. 4.61, 4.131). Twardość wlewków AlSi9Cu3 osiągała maksymalnie 80 HBW, podczas gdy dla AlSi12 najwyższa wartość twardości wynosiła 53 HBW. Wyższa twardość AlSi9Cu3 wynika z obecności większej ilości faz międzymetalicznych, zwłaszcza bogatych w żelazo i miedź, takich jak Al₅FeSi i Al₂Cu, które zwiększają właściwości mechaniczne stopu, zwiększając jego odporność na zużycie i odkształcenie plastyczne. Z kolei w stopie AlSi12, który zawiera mniej tych faz umacniających, twardość jest niższa, a jednocześnie materiał wykazuje większą plastyczność, co jest korzystne w aplikacjach, gdzie zdolności do odkształceń są istotne. Ponadto, wydłużenie czasu rafinacji w przypadku stopu AlSi9Cu3 prowadzi do wzrostu twardości, gdyż proces rafinacji sprzyja lepszej dystrybucji i zmniejszeniu defektów mikrostrukturalnych. W przypadku stopu AlSi12, wydłużony czas rafinacji nie przynosi tak wyraźnych korzyści. Również odlewy ze stopu AlSi9Cu3 wykazują wyższą twardość w porównaniu do odlewów ze stopu AlSi12, co wynika z wyższej zawartości pierwiastków stopowych, takich jak miedź i żelazo, które sprzyjają tworzeniu twardych faz międzymetalicznych (rys. 4.62, 4.132). Najwyższą twardość odlewów wykonanych ze stopu AlSi9Cu3 osiągnięto przy zawartości 70% złomu obiegowego po 9 minutach rafinacji, wynoszącą 101 HBW. Z kolei w odlewach ze stopu AlSi12, twardość była znacznie niższa i wynosiła maksymalnie 65 HBW. Niższa twardość odlewów ze stopu AlSi12 wiąże się z mniejszą zawartością miedzi, co sprzyja lepszej plastyczności, ale obniża twardość. Wyniki te są zgodne z badaniami Tupaj i wsp. [128], które również potwierdzają, że zastosowanie rafinacji barbotażowej w stopach AlSi12 prowadzi do wzrostu twardości odlewów. W badaniach Tupaja, twardość wzrosła z 61-63 HBW dla stopu nierafinowanego

do 81 HBW po rafinacji. Wyniki te potwierdzają, że proces rafinacji ma korzystny wpływ na twardość stopów, szczególnie w przypadku AlSi12.

Badania chropowatości powierzchni odlewów ze stopów AlSi9Cu3 oraz AlSi12 wykazały istotne różnice w wartościach Ra (średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości) zarówno przed, jak i po procesie kulowania, z uwzględnieniem zawartości złomu obiegowego oraz czasu rafinacji. W odlewach ze stopu AlSi9Cu3 przed procesem kulowania, wartości Ra były stosunkowo wysokie, i wynosiły około 2,45 μm przed rafinacją, a dla próbek rafinowanych 0,7 – 1,72 μm i były uzależnione od zawartości złomu obiegowego i czasu rafinacji. Proces kulowania znacząco obniżył te wartości, nastąpiła redukcja Ra do 0,2–0,44 μm , co wskazuje na znaczną poprawę gładkości powierzchni, szczególnie w przypadku próbek rafinowanych przez dłuższy czas. W przypadku odlewów ze stopu AlSi12, początkowe wartości Ra były niższe niż w przypadku AlSi9Cu3 i mieściły się w przedziale 0,66–0,75 μm . Kulowanie również przyniosło znaczącą redukcję chropowatości, wartości Ra obniżyły się do 0,12–0,15 μm . Pomimo podobnych tendencji w zakresie redukcji chropowatości, odlewy AlSi12 miały początkowo gładszą powierzchnię w porównaniu do odlewów AlSi9Cu3. Jest to najprawdopodobniej związane z mniejszą ilością faz międzymetalicznych w stopie AlSi12, takich jak Al_2Cu i Al_5FeSi , które w stopie AlSi9Cu3 mogą wpływać na większą chropowatość początkową powierzchni. Podsumowując, proces kulowania znacznie wygładza powierzchnię zarówno odlewów wykonanych ze stopu AlSi12, jak i AlSi9Cu3, poprawiając zarówno estetykę, jak i właściwości użytkowe.

Niniejsza rozprawa doktorska dostarcza nowych informacji w zakresie kompleksowej analizy wpływu parametrów technologicznych, takich jak czas rafinacji oraz zawartość złomu obiegowego, na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę wlewków i odlewów ze stopów AlSi9Cu3 oraz AlSi12. Szczególnie innowacyjne jest to, że badania obejmowały cały cykl technologiczny odlewania ciśnieniowego, w tym procesy topienia, rafinacji barbotażowej i odlewania oraz szczegółową analizę jakościową detali, co jest rzadko spotykane w tak pełnym zakresie w literaturze. Chociaż badania nad rafinacją barbotażową były wcześniej prowadzone, niniejsza praca wnosi nowatorskie podejście poprzez analizę wpływu zarówno czasu rafinacji w warunkach przemysłowych, jak i udziału złomu obiegowego na zmniejszenie porowatości oraz poprawę jakości odlewów, co jest istotne z perspektywy produkcji przemysłowej. Ponadto do analizy porowatości we wlewkach

i odlewach zastosowano tomografię komputerową, która umożliwiła zobrazowanie rozłożenia objętościowego porów w badanych detalach. Zrealizowane badania dostarczają cennych informacji na temat wpływu zawartości złomu obiegowego na jakość odlewów, pozwalając na lepsze zrozumienie kompromisów między wykorzystaniem materiałów wtórnych, a zachowaniem optymalnych właściwości mechanicznych. Stanowią także istotny wkład w optymalizację procesu rafinacji, umożliwiając zmniejszenie ilości odpadów produkcyjnych oraz poprawę jakości wyrobów.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań nad rafinacją barbotażową odlewów i wlewków ze stopów AlSi9Cu3 oraz AlSi12 o różnej zawartości złomu obiegowego sformułowano następujące wnioski:

- Wydłużenie czasu procesu rafinacji barbotażowej wpływa na znaczące obniżenie poziomu zagazowania odlewów, co w konsekwencji prowadzi do poprawy ich jakości.
- Wysoka zawartość złomu obiegowego (do 80%) w materiale wsadowym powoduje wzrost zawartości żelaza w stopie. Może to negatywnie wpływać na plastyczność stopu, szczególnie w przypadku procesów, w których nie stosowano modyfikatorów. Mimo tego, zawartość złomu na poziomie 80% nie powoduje znaczącego pogorszenia właściwości mechanicznych w porównaniu do stopów o niższej zawartości złomu obiegowego.
- Uzyskane wyniki badań wskazują na wyższą wytrzymałość na ściskanie i twardość stopu AlSi9Cu3 w porównaniu do AlSi12 , co można tłumaczyć zwiększoną zawartością faz międzymetalicznych w stopie AlSi9Cu3 .
- Parametry procesu rafinacji barbotażowej nie miały istotnego wpływu na twardość badanych wlewków i odlewów.
- Wydłużenie czasu rafinacji barbotażowej sprzyja ujednorodnieniu mikrostruktury, co korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne zarówno odlewów, jak i wlewków.
- Wyższa zawartość złomu obiegowego, dzięki zwiększonej zawartości faz bogatych w żelazo Fe, pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne badanych odlewów i wlewków.
- Największe skupiska porów obserwowane są w centralnej części wlewka lub w najgrubszych częściach odlewów cienkościennych, gdzie krzepnięcie przebiega wolniej, sprzyjając powstawaniu jam skurczowych.
- Dowiedziono, że proces rafinacji barbotażowej trwający 9 minut jest korzystny zarówno pod względem jakości, jak i efektywności ekonomicznej, z niższym zużyciem gazu obojętnego. Wydłużenie czasu rafinacji barbotażowej do 15 minut pozwala uzyskać lepsze właściwości mechaniczne odlewów.
- Wydłużenie czasu rafinacji sprzyja zmniejszeniu chropowatości powierzchni, szczególnie w przypadku odlewów ze stopu AlSi9Cu3 .

7. BIBLIOGRAFIA

1. Inspektorat Ochrony Środowiska. (2024). Odlewanie. <http://ippc.mos.gov.pl/ippc/?id=313-20.05.24>
2. Przybyłowicz, K. (1999). Metaloznawstwo. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
3. Praca zbiorowa. (1986). Poradnik inżyniera: Odlewnictwo (Vol. 1). Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
4. Jerina, L., Medved, J., Godec, M., , Vončina, M. (2018). Influence of the specific surface area of secondary material on the solidification process and microstructure of aluminium alloy AA7075. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 134, 10.1007/s10973-018-7425-2
5. Dhaneswara, D., Firmansyah, M. R., Prasetyo, Y., , Ashari, A. (2020). Comparative study of degassing method by using NaF-NaNO₃-based tablet degasser, technical argon gas, and pure argon gas in aluminum casting. *AIP Conference Proceedings*, 2232, 10.1063/5.0001916
6. Schlafka, P., , Bydąlek, A. W. (2019). The influence of the proportion of charge from waste materials on the quality of high pressure castings. *Archives of Foundry Engineering*, 19(2), 21-24.
7. Taylor, J. (2004). The effect of iron in Al-Si casting alloys. In 35th Australian Foundry Institute National Conference.
8. Agnes, S., Yasser, Z., Herbert, D., Victor, S., , Fawzy, H. S. (2021). A review study on the main sources of porosity in Al-Si cast alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, Article 1921603. <https://doi.org/10.1155/2021/1921603>
9. Bogdanova, T. A., Merkulova, G. A., Gilmanshina, T. R., Kosovich, A. A., Lytkina, S. I., Cheglakov, A. V., , Antonov, M. M. (2021). Comparative evaluation of methods for determination of hydrogen and non-metallic inclusions content in aluminum alloys. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(3), 355-360.
10. Bell, S., Davis, B., Javaid, A., , Essadiqi, E. (2003). Final report on refining technologies of aluminum. doi: 10.13140/RG.2.2.27655.39847
11. Jacobs, M. H. (1999). Introduction to aluminium as an engineering material. TALAT Lecture 1201. Interdisciplinary Research Centre in Materials, The University of Birmingham.
12. Kaufman, J. G., , Rooy, E. L. (2004). Aluminium Alloy Castings: Properties, Processes and Applications (Ch. 3, pp. 21-37). ASM International.
13. Praca zbiorowa. (1995). Metaloznawstwo (J. Hucińska, Ed.). Gdańsk.
14. Totten, G. E., , Mackenzie, D. S. (2003). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press.
15. Murray, J. L. (1997). Phase Diagrams of Binary Aluminum Alloys. ASM International.
16. Davis, J. R. (1993). Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International.

17. Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. ASM International.
18. Kaufman, J. G., , Rooy, E. L. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. ASM International.
19. ASM International. (1990). *ASM Handbook: Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International.
20. Abdulsahib, Y. M. (2014). Effect of copper addition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 7(4).
21. Akinribide, O. J., Ogundare, O. D., Akinwamide, S. O., Gamaoun, F., , Olubambi, P. A. (2022). Alloying effect of copper in AA-7075 aluminum composite using bale out furnace. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 3849–3856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.054>
22. Anyalebechi, P. N. (2003) Effects of Hydrogen, Solidification Rate, and Ca on Porosity Formation in As-Cast Aluminum Alloy A356.
23. Polmear, I. J. (2006). *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. Butterworth-Heinemann.
24. Swaminathan, S., , Srin, B. (2002). The influence of oxygen impurities on the formation of AlN/Al composites by infiltration of molten Al/Mg. *Materials Science and Engineering: A - Structural Materials - Properties, Microstructure and Processing*, 337 (1-2). pp. 134-139. ISSN 0921-5093
25. Ludwig, T., Di Sabatino, M., Arnberg, L., , Dispinar, D. (2012). Influence of Oxide Additions on the Porosity Development and Mechanical Properties of A356 Aluminium Alloy Castings. *International Journal of Metalcasting*, 6(2), 41–50. <https://doi.org/10.1007/BF03355526>
26. Grandfield, J. F., Eskin, D. G., , Bainbridge, I. F. (2013). *Direct-chill casting of light alloys* (1st ed.). John Wiley , Sons.
27. Saravanakumar, P., M, M., S, N., , G, R. (2017). Review on application of gases for aluminium refining. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 6(7). <https://doi.org/10.26808/rs.ed.i7v6.16>
28. Cantor, B. (1997). Impurity effects on heterogeneous nucleation. *Materials Science and Engineering: A*, 226, 151–156.
29. Rading, G. O., Li, J., , Berry, J. T. (1994). Fatigue crack growth in cast Al-Cu alloy A206 with different levels of porosity. *AFS Transactions*, 102, 57–61.
30. Anyalebechi, P. N. (2003) Effects of hydrogen, solidification rate, and Ca on porosity formation in as-cast aluminum alloy A356.
31. Monroe, R. (2005). Porosity in castings. *AFS Transactions*, 113, 519–546.
32. Sigworth, G. K. (1999). Gas fluxing of molten aluminum, part 1: Hydrogen removal. *Light Metals* (ss. 641–648).

33. Knuutinen, A., Nogita, K., McDonald, S. D., , Dahle, A. K. (2001). Porosity formation in aluminium alloy A356 modified with Ba, Ca, Y and Yb. *Journal of Light Metals*, 1(4), 241–249.
34. Bonderek, Z., , Rzadkosz, S. (1999). Problemy uszlachetniania ciekłych stopów aluminium. *Solidification of Metals and Alloys*, 1(41), 153–159.
35. Kotadia, H. R., Hari Babu, N., Zhang, H., Arumuganathar, S., , Fan, Z. (2011). Solidification behavior of intensively sheared hypoeutectic Al-Si alloy liquid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(4), 1117–1126.
36. Gökelma, M., Aarnæs, T. S., Maier, J., Renkel, M. F., Ekstrøm, K. E., Friedrich, B., , Tranell, G. (2021). Behavior of Al₄C₃ particles during flotation and sedimentation in aluminum melts. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52(2), 743–754. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02049-7>
37. Fang, Q. T., Anyalebechi, P. N., O'Marrey, R. J., , Granger, D. A. (1987). Effect of solidification conditions on hydrogen porosity formation in unidirectionally solidified aluminum alloys. *Solidification Processing: Third International Conference* (ss. 33–36).
38. Oreko, B. U., Samuel, O. D., Idi, S., , Fayomi, O. S. I. (2018). Evaluation of mechanical properties of locally recycled aluminium alloy scrap. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 413, 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/413/1/012024>
39. Zhang, L., Gao, J., Damoah, L. N. W., , Robertson, D. G. (2012). Removal of iron from aluminum: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 33(2), 99–157. <https://doi.org/10.1080/08827508.2010.542211>
40. Cantor, B. (1997). Impurity effects on heterogeneous nucleation. *Materials Science and Engineering: A*, 226, 151–156.
41. Kucharčík, L., Brûna, M., , Sládek, A. (2014). Influence of chemical composition on porosity in aluminium alloys. *Archives of Foundry Engineering*, 14 (2), 5–8. <https://doi.org/10.2478/afe-2014-0026>
42. Greer, A. L. (2003). Grain refinement of alloys by inoculation of melts. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1804), 479–495.
43. Easton, M., , Stjohn, D. (1999). Grain refinement of aluminum alloys: Part I. The nucleant and solute paradigms — A review of the literature. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(June), 1613–1623.
44. Fraś, E. (2010). Podstawy teoretyczne modyfikacji, część I - metale i stopy jednofazowe. W S. Pietrowski (Red.), *Tendencje optymalizacji systemu produkcyjnego w odlewniach: Monografia przygotowana z okazji X Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Optymalizacja Systemów Produkcyjnych w Odlewniach”* (ss. 89–93). Polska Akademia Nauk. Komisja Odlewnictwa.
45. Jahromi, S. A. J., Dehghan, A., , Malekjani, S. (2004). Effects of optimum amount of Sr and Sb modifiers on tensile, impact and fatigue properties of A356 aluminum alloy. 28.

46. Al-Helal, K., Lazaro-Nebreda, J., Patel, J. B., , Scamans, G. M. (2021). High-shear de-gassing and de-ironing of an aluminum casting alloy made directly from aluminum end-of-life vehicle scrap. *Recycling*, 6(4), 66. <https://doi.org/10.3390/recycling6040066>
47. Chesonis, D. C. (2017). A holistic approach to molten metal cleanliness. W A. P. Ratvik (Red.), *Light Metals 2017* (ss. 1411–1417). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_168
48. Zhou, M., Shu, D., Li, K., Zhang, W. Y., Sun, B. D., Wang, J., , Ni, H. J. (2003). Performance improvement of industrial pure aluminum treated by stirring molten fluxes. *Materials Science and Engineering: A*, 347(1–2), 280–290. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00611-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00611-1)
49. Mueller, M. G., Fornabaio, M., Žagar, G., , Mortensen, A. (2016). Microscopic strength of silicon particles in an aluminium–silicon alloy. *Acta Materialia*, 105, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.12.006>
50. Molina, R., Amalberto, P., , Rosso, M. (2011). Mechanical characterization of aluminium alloys for high temperature applications Part1: Al-Si-Cu alloys. *Metallurgical Science and Technology*, 29(1), 5–15.
51. Kuchariková, Lenka , Tillová, Eva , Chalupová, M.. (2013). The structure analysis of secondary (Recycled) AlSi9Cu3 cast alloy with and without heat treatment. *Engineering Transactions*. 61. 197-218
52. Wasilewski, P. (1993). *Siluminy - modyfikacja i jej wpływ na strukturę i własności. Krzepnięcie Metali i Stopów*, 21, Katowice.
53. Predel B. (1998) „Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys” Edited by O. Madelung Springer
54. Pan, E. N., Cherng, Y. G., Lin, C. A., , Chiou, H. S. (1994). Roles of Sr and Sb on silicon modification of A356 aluminum alloys. *AFS Transactions*, 70, 609-617.
55. Pietrowski, S. (2001). *Siluminy*. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
56. Sigworth, G. K. (1983). Theoretical and practical aspects of the modification of Al-Si Alloys. *AFS Transactions*, 91, 7-16.
57. ASM International. (1990). *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International.
58. Kapturkiewicz, W. (1995). *Odlewnictwo stopów aluminium*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
59. Svobodova, J., Cais, J., , Weiss, V. (2014). The evaluation of the corrosion resistance of the Al-Si alloys antimony alloyed. *Archives of Foundry Engineering*, 14(2), 13–18. <https://doi.org/10.2478/afe-2014-0028>
60. Peterson, D. R. (1994). *Machining of light alloys*. Elsevier Science.
61. Liu, Y., , Atkinson, H. V. (2004). Microstructure evolution in rheocast Al–Si alloys during heat treatment. *Journal of Materials Science*, 39(20), 6487-6498.

62. Deev, V., Prusov, E., Ri, E., Prihodko, O., Smetanyuk, S., Chen, X., , Kononov, S. (2021). Effect of melt overheating on structure and mechanical properties of Al-Mg-Si cast alloy. *Metals*, 11(9), 1353. <https://doi.org/10.3390/met11091353>
63. Hajkowski, M., Bernat, Ł., , Hajkowski, J. (2012). Mechanical properties of Al-Si-Mg alloy castings as a function of structure refinement and porosity fraction. *Archives of Foundry Engineering*, 12(4), 57–64. <https://doi.org/10.2478/v10266-012-0107-9>
64. Kotadia, H. R., Hari Babu, N., Zhang, H., Arumuganathar, S., , Fan, Z. (2011). Solidification behavior of intensively sheared hypoeutectic Al-Si alloy liquid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(4), 1117–1126. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0516-8>
65. Dong, X., Yang, H., Zhu, X., , Ji, S. (2019). High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.260>
66. Kazup, A., Karpati, V., Hegedus, B., , Gacsi, Z. (2020). Semi-continuous casting and microstructure investigation of the AlSi12 alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 903(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012012>
67. Indoitu, D. V., Gusarova, A. V., Zykova, A. P., Kalashnikova, T. A., Chumaevskii, A. V., Gurianov, D. A., , Beloborodov, V. A. (2021). Friction stir processing regularities of cast aluminum alloy AlSi12. *Journal of Physics: Conference Series*, 1989(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1989/1/012030>
68. Mondolfo, L. F. (1976). *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. Butterworth-Heinemann.
69. Hatch, J. E. (1984). *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. ASM International.
70. Ji, X., Xiong, J., , Zhou, L. (2024). Microstructure evolution and mechanical properties of extruded AlSiCuFeMnYb alloy. *Metals*, 14(7), 774. <https://doi.org/10.3390/met14070774>
71. Molina, R. (2011). Mechanical characterization of aluminium alloys for high temperature applications Part1: Al-Si-Cu alloys. 29.
72. Matejka, M., Bolibruchova, D., Kasińska, J., , Kuriš, M. (2020). Study of AlSi9Cu3 alloy crystallization process with increased iron content at different number of remelts. *Archives of Foundry Engineering*, 20(1), 79-83. [10.24425/afe.2020.131287](https://doi.org/10.24425/afe.2020.131287)
73. Kozana, J., Piękoś, M., Maj, M., Garbacz-Klempka, A., , Żak, P. L. (2020). Analysis of the microstructure, properties and machinability of Al-Cu-Si alloys. *Archives of Foundry Engineering*, 145–153. <https://doi.org/10.24425/afe.2020.136069>
74. Gonçalves, R. A., , Silva, M. B. D. (2015). Influence of copper content on 6351 aluminum alloy machinability. *Procedia Manufacturing*, 1, 683–695. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.014>
75. Dobrzański, L. A. (2008). *Metaloznawstwo opisowe stopów metali nieżelaznych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
76. European Aluminium Association. (2024, August 1). Retrieved from <https://www.eaa.net>

77. Dybiec, H. (2008). Submikrostrukturalne stopy aluminium. Kraków: AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne.

78. Aluminium. (2024). Retrieved from <https://www.recykling.pl/recykling/index.php/y/odpady/111/o/10>

79. Kevorkijan, V. (2002). The recycle of wrought aluminum alloys in Europe. JOM, 54(2), 38–41. <https://doi.org/10.1007/BF02701072>

80. Leroy, C. (2009). Provision of LCI data in the European aluminium industry methods and examples. The International Journal of Life Cycle Assessment, 14(S1), 10–44. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0068-6>

81. Li, Q., He, K., Wu, N., , Zeng, J. (2019). Purification of aluminum melt in crucibles by bubble flotation. Procedia Manufacturing, 37, 438–442. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.071>

82. Miller, W. S. (2007). Recent developments in aluminium alloys for the automotive industry. Materials Science and Engineering: A, 280(1), 37–49.

83. Williams, J. C., , Grimwade, J. (1992). The production of aluminium and its industrial use. Oxford University Press.

84. Kaufman, J. G. (2000). Introduction to Aluminum Alloys and Tempers. ASM International.

85. Totten, G. E., , MacKenzie, D. S. (2003). Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press.

86. Davis, J. R. (2001). Aluminum and aluminum alloys. In Alloying: Understanding the Basics (pp. 349–416). Ohio, USA: ASM International.

87. Zalensas, D. L. (1993). Aluminum casting technology (2nd ed.). DesPlanes, U.S.A.: AFS.

88. Backerund, L., Król, E., , Tamminen, J. (1986). Solidification Characteristics of Aluminium Alloys. Oslo: Skanaluminium.

89. Campbell, J. (2015). Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

90. www.SrebrnyKruk.pl - Abc złotniczo-jubilerskie -22.07.2024

91. ASM International. (1990). ASM Handbook, Volume 15: Casting. ASM International.

92. Heine, R. W., Loper, C. R., , Rosenthal, P. C. (1967). Principles of Metal Casting. McGraw-Hill.

93. Jabłoński, M., , Kaczmarek, T. (2020). Analiza mikrostruktury i własności mechanicznych odlewów siluminów wytwarzanych metodą odlewania skorupowego. Materials Science and Engineering, 45(4), 1012–1025.

94. Józef Zawora (2007) "Podstawy technologii maszyn" WSiP, Warszawa

95. Wiśniewski, P. (2019). Zastosowanie metody odlewania skorupowego w przemyśle motoryzacyjnym. *Automotive Engineering Review*, 34(2), 78-89.
96. Kowalski, J., , Nowak, A. (2018). Wpływ parametrów procesu na jakość odlewów siluminów metodą odlewania skorupowego. *Journal of Casting Technology*, 22(3), 123-135.
97. http://www.k17.p.lodz.pl/dydaktyka/Techniki_wytwarzania_Odlewnictwo.pdf (dostęp: 28.06.2024).
98. Praca zbiorowa. (1986). *Poradnik inżyniera: Odlewnictwo*, t. 2. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
99. Hossain, M., , Ahmed, S. (2019). Comparative analysis of die casting and sand casting in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 268, 234-245.
100. Kim, S. Y., , Lee, J. H. (2018). Mechanical properties and microstructure of die-cast versus sand-cast aluminum-silicon alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 124-133.
101. Zhang, T., Li, X., , Wang, Y. (2017). Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys in permanent mold casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 1333-1340.
102. Liu, Z., Li, M., , Zhang, Y. (2015). Economic benefits of high pressure die casting in mass production. *Procedia Manufacturing*, 3, 45-52.
103. Kapranos, P., Frydman, J., , Jones, H. (2010). High pressure die casting of automotive components. *Journal of Manufacturing Processes*, 12(2), 123-130.
104. Favi, C., Germani, M., , Mandolini, M. (2017). Analytical cost estimation model in high pressure die casting. *Procedia Manufacturing*, 11, 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.146>
105. Shankar, R., Singh, P., , Patel, S. (2008). Investment costs analysis for high pressure die casting production. *International Journal of Production Research*, 46(9), 2457-2469.
106. Wang, X., Zhang, Y., , Liu, J. (2017). Mechanical properties of high pressure die cast aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 690, 60-68.
107. Niu, Z., Liu, G., Li, T., , Ji, S. (2022). Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 303, 117525. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117525>
108. Zawora, J. (2007). *Podstawy technologii maszyn*. WSiP.
109. Pater, Z. (2013). *Podstawy metalurgii i odlewnictwa*. Politechnika Lubelska.
110. Kosowski, A. (1997). *Zarys odlewnictwa*. Wyd. AGH.
111. Mathew, J., Williams, M. A., , Srirangam, P. (2021). X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys. *JOM*, 73(12), 3866–3872. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04944-z>

112. Białobrzęski, A. (1998). Technologie specjalne odlewania ciśnieniowego. Instytut Odlewnictwa.
113. Instytut Odlewnictwa w Krakowie. (2017). Odlewnictwo współczesne, Polska i świat. Kwartalnik naukowo-techniczny, Rocznik 10, nr 3/2017.
114. Zolotarevskii, V. S., Belov, N. A., , Glazoff, M. V. (2007). Casting aluminum alloys (1st ed.). Elsevier Science.
115. Bhaskar, M., Nalluswamy, T. S., , Suresh, P. (2021). Melt treatment in die casting industries. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-477968/v1>
116. Odlewnictwo współczesne, polska i świat (2017), Kwartalnik naukowo-techniczny. Rocznik 10, nr 3, Instytut odlewnictwa w Krakowie
117. Brown, J. R. (2000). Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook. Butterworth-Heinemann.
118. Flemmings, M. C. (1974). Solidification processing. McGraw-Hill.
119. Monroe, R. (2005). Porosity in castings. AFS Transactions, 113, 519–546.
120. Cooper, P., , Barber, A. (2003). Review of the latest developments and best use of grain refiners. 2nd International Melt Quality Workshop, October, 16–17.
121. Wu, J., Djavanroodi, F., Gode, C., Attarilar, S., , Ebrahimi, M. (2022). Melt refining and purification processes in Al alloys: A comprehensive study. Materials Research Express, 9(3), 032001. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac5b03>
122. Kashyap, K. T., , Chandrashekar, T. (2001). Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys. Bulletin of Materials Science, 24(4), 345–353. <https://doi.org/10.1007/BF02708630>
123. Bhaskar, M., , Nallusamy, T. (2021). Degassing of aluminum metals and its alloys in non-ferrous foundry. In Non-Ferrous Metal Casting: Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Materials and Processing Technology (pp. 637-644). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8319-3_63
124. Orłowicz, A., Mróz, M., Tupaj, M., Betlej, J., , Poszaj, F. (2009). Influence of refining process on the porosity of high pressure die casting alloy Al-Si. Archives of Foundry Engineering, 9.
125. Liu, Y., Sano, M., Zhang, T., Wang, Q., , He, J. (2009). Intensification of bubble disintegration and dispersion by mechanical stirring in gas injection refining. ISIJ International, 49(1).
126. Shabestari, S. G., Mokarian, P., , Saeidinia, S. (2004). Effect of process variables in rotary degassing of aluminum. CIM Bulletin, 97.
127. Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Tokár, M., , Mende, T. (2020). The effects of rotary degassing treatments on the melt quality of an Al-Si casting alloy. International Journal of Metalcasting, 15(2), 141-151. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00428-z>

128. Orłowicz, A., Mróz, M., Tupaj, M., Betlej, J., , Poszaj, F. (2009). Use of barbotage refining of aluminum-silicon alloy to improve mechanical properties of high pressure die castings. *Archives of Foundry Engineering*, 9.
129. Mostafaei, Mohammad , Ghobadi, M. , B., Ghasem , Uludağ, Muhammet , Tiryakioğlu, Murat. (2016). Evaluation of the Effects of Rotary Degassing Process Variables on the Quality of A357 Aluminum Alloy Castings. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 47. 10.1007/s11663-016-0786-7
130. <https://mmei-inc.com/degassing-process/-20.08.24>
131. Saternus, M., , Merder, T. (2022). Physical Modeling of the Impeller Construction Impact on the Aluminum Refining Process. *Materials*, 15(2), 575. <https://doi.org/10.3390/ma15020575>
132. Yamamoto, T., Suzuki, A., Komarov, S. V., , Ishiwata, Y. (2018). Investigation of impeller design and flow structures in mechanical stirring of molten aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 261, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.012>
133. Lichy, P., Bajerova, M., Kroupova, I., , Obzina, T. (2020). Refining aluminium-alloy melts with graphite rotors. *Materiali in Tehnologije*, 54(2), 263–265. <https://doi.org/10.17222/mit.2019.147>
134. Dhaneswara, D., Fajar Fatriansyah, J., Ramadhan, R., , Ashari, A. (2019). The Effect of Melting Temperature Aluminum Metal Casting Using Mixed Degasser Based Sodium Fluoride and Sodium Nitrate. *MATEC Web of Conferences*, 269, 07001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926907001>
135. <https://www.linkedin.com/pulse/shot-peening-residual-stresses-murat-deveci> - 17.05.2024
136. <http://castech.pl/oczyszczarka-bebnowo-ocierna-obo-1000-2/> -17.05.2022
137. Wrona, R., Zyzak, P., Ziółkowski, E. , Brzeziński, M. (2012). Methodology of Testing Shot Blasting Machines in Industrial Conditions, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 12, Issue 2/2012.
138. Zyzak, P. (2015). Evaluation of the shot stream parameters using indicators of the test with control plates. *Mechanik*, 8–9, 717/374-717/381. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.8-9.403>
139. Bańkowski, D. , Spadło, S. (2019). The Use of Abrasive Waterjet Cutting to Remove Flash from Castings. *Archives of Foundry Engineering*. 3. 94-98. <https://doi.org/10.24425/afe.2019.129617>.
140. Majidi, O., Shabestari, S. G., , Aboutalebi, M. R. (2007). Study of fluxing temperature in molten aluminum refining process. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1), 450-455. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.003>
141. Ganesh, S. (2011). Peening process for enhancing surface finish of a component. Patent EP2353782 A1. Europejski Urząd Patentowy.

142. Korban, P., , Leszczyńska-Madej, B. (2023). Effect of barbotage refining time and recycled scrap content on the microstructure of EN AC 44200 alloy. *Materials Today Communications*, 37, 107038. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107038>
143. Gumienny G, Pisarek B, Szymczak T, Gawroński J, Just P, Władysław R, Rapiejko C, Pacyniak T. (2022)Effect of Degassing Parameters on Mechanical Properties of EN AC-46000 Gravity Die Castings. *Materials*; 15(23):8323. <https://doi.org/10.3390/ma15238323>
144. Grzymałowski M., Herberg A., Wrona R.(2013) Standaryzacja procesu oczyszczania maszynowego odlewów, *Archives of Foundry Engineering*, Volume 13 Special Issue, 3/2013
145. EN 1706:2020. Aluminium and aluminium alloys – Castings – Chemical composition and mechanical properties.
146. Samardziova, M. , Kusá, M. , Kusý, M. (2022). Evaluation of Aluminium Alloy (AlSi9Cu3(Fe)) Porosity by Destructive and Non-destructive Method (Computed Tomography). 10.1007/978-3-030-90421-0_15

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1 Układ równowagi fazowej Al-Si.....	18
Rys. 1.2. Schemat procesu odlewania do formy piaskowej.....	26
Rys. 1.3 Schemat formowania skorupowego.....	27
Rys. 1.4 Schemat urządzenia niskociśnieniowego do odlewania kokilowego	29
Rys. 1.5 Schemat odlewania zimnokomorowego	30
Rys. 1.6 Schemat odlewania gorąckomorowego	31
Rys. 1.7. Proces odlewania ciągłego.....	32
Rys. 1.8 Proces odlewania w warunkach obniżonego ciśnienia atmosferycznego.....	34
Rys. 1.9 Proces odlewania pod niskim ciśnieniem	35
Rys. 1.10 Schemat procesu rafinacji barbotażowej	39
Rys. 1.11 Oczyszczarka bębnowa OB-1000	42
Rys. 1.12 Efekt procesu śrutowania.....	43
Rys. 1.13 Schemat wirnika rzutowego.....	44
Rys. 2.1. Plan badań.....	52
Rys. 3.1 Proces rafinacji barbotażowej	55
Rys. 3.2 Komora maszynki do mielenia wytworzona w procesie odlewania ciśnieniowego stopu AlSi12.....	56
Rys. 3.3 Pokrywa kasety do systemu rolet wytworzona w procesie odlewania ciśnieniowego stopu AlSi9Cu3	56
Rys. 2.4 Poglądowe zdjęcie przedstawiające przykładowy wlewek wykorzystany do badań	56
Rys. 3.5 Mikrostruktura odlewu wykonanego ze stopu AlSi12, rafinowanego przez 15 min. i o zawartości złomu wynoszącej 70%: a) obraz SEM, b) zdjęcie binarne - wydzielenia fazy bogatej w Fe zaznaczono kolorem czarnym	58
Rys. 4.1 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%	60
Rys. 4.2 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	61
Rys. 4.3. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%	61
Rys. 4.4. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%	62

Rys. 4.5. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	62
Rys. 4.6. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%	63
Rys. 4.7. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%	63
Rys. 4.8. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	64
Rys. 4.9. Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%	64
Rys. 4.10. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%.....	65
Rys. 4.11. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	65
Rys. 4.32. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%.....	66
Rys. 4.13. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%.....	66
Rys. 4.14. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	67
Rys. 4.15. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%.....	67
Rys. 4.16. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%.....	68
Rys. 4.17. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	68
Rys. 4.18. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%.....	69
Rys. 4.19 Zestawienie zdjęć mikrostruktury wlewków ze stopu AlSi12 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM	71
Rys. 4.20 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	72
Rys. 4.21 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	72
Rys. 4.22 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	72

Rys. 4.23 Zestawienie zdjęć mikrostruktury odlewów ze stopu AlSi12 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM	73
Rys. 4.24 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	74
Rys. 4.25 odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi12; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	74
Rys. 4.26 Mikrostruktura na przekroju odlewu wykonanego ze stopu AlSi12 dla metalu rafinowanego przez 15 min. i zawartości złomu obiegowego 70%	74
Rys. 4.27 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi12 rafinowanego przez 15 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cr, Mn i Cu; zawartość złomu obiegowego na poz. 80%	76
Rys. 4.28 Mikrostruktura odlewu ze stopu AlSi12 rafinowanego przez 9 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cu, Cr; zawartość złomu obiegowego na poz. 70%.....	76
Rys. 4.29 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewów stopu AlSi12; próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	78
Rys. 4.30 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	78
Rys. 4.31 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego	79
Rys. 4.32 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	79
Rys. 4.33 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	80
Rys. 4.34 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego	80
Rys. 4.35 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	81
Rys. 4.36 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	81
Rys. 4.37 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego	82
Rys. 4.38 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	82
Rys. 4.39 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	83
Rys. 4.40 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi12, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	83

Rys. 4.41 Wlewek ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	87
Rys. 4.42 Wlewek ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	87
Rys. 4.43 Wlewek ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	88
Rys. 4.44 Wlewek ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	88
Rys. 4.45 Wlewek ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	89
Rys. 4.46 Wlewek ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	89
Rys. 4.47 Wlewek ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	90
Rys. 4.48 Wlewek ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	90
Rys. 4.49 Wlewek ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	91
Rys. 4.50 Odlew ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	92
Rys. 4.51 Odlew ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	92
Rys. 4.52 Odlew ze stopu AlSi12 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	93
Rys. 4.53 Odlew ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	93
Rys. 4.54 Odlew ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	94
Rys. 4.55 Odlew ze stopu AlSi12 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	94
Rys. 4.56 Odlew ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	95
Rys. 4.57 Odlew ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	95
Rys. 4.58 Odlew ze stopu AlSi12 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	96
Rys. 4.59 Charakterystyka ściskania dla wlewków ze stopu AlSi12	98

Rys. 4.60 Charakterystyka ściskania dla odlewów ze stopu AlSi12.....	100
Rys. 4.61 Wyniki pomiarów twardości wlewków wykonanych ze stopu AlSi12.....	104
Rys. 0.62 Wyniki pomiarów twardości odlewów wykonanych ze stopu AlSi12	104
Rys. 4.63 Wykres ilustrujący wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości od linii średniej (Ra) dla odlewów przed i po procesie kulowania	106
Rys. 4.64 Wysokość chropowatości odlewów według dziesięciu punktów profilu	107
Rys. 4.65 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%	108
Rys. 4.66 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	109
Rys. 4.67 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%	109
Rys. 4.68 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%	110
Rys. 4.69 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	110
Rys. 4.70 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%	111
Rys. 4.71 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%	111
Rys. 4.72 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	112
Rys. 4.73 Mikrostruktura wlewka wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%	112
Rys. 4.74 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 60%.....	115
Rys. 4.75 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	115
Rys. 4.76 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 80%.....	116
Rys. 4.77 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 60%.....	116
Rys. 4.78 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	117
Rys. 4.79 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 80%.....	117

Rys. 4.80 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 60%.....	118
Rys. 4.81 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	118
Rys. 4.82 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 80%.....	119
Rys. 4.83 Zestawienie zdjęć mikrostruktury wlewków ze stopu AlSi9Cu3 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM	120
Rys. 4.84 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	121
Rys. 4.85 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	121
Rys. 4.86 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 15 min, zawartość złomu obiegowego: 70%	121
Rys. 4.87 Zestawienie zdjęć mikrostruktury odlewów ze stopu AlSi9Cu3 w zależności od zawartości złomu z obiegowego i czasu rafinacji; SEM	122
Rys. 4.88 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 7 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	123
Rys. 4.89 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3; czas rafinacji: 9 min, zawartość złomu obiegowego: 70%.....	123
Rys. 4.90 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego wykonanego ze stopu AlSi9Cu3 dla metalu rafinowanego przez 15 min. i zawartości złomu obiegowego 70%.....	123
Rys. 4.91 Mikrostruktura wlewka ze stopu AlSi9Cu3 rafinowanego przez 7 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cu, Mn i Mg; zawartość złomu na poziomie 60%.....	123
Rys. 4.92 Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego ze stopu AlSi9Cu3 rafinowanego przez 15 min oraz mapy rozkładu pierwiastków Al, Si, Fe, Cu, Cr, Mn i Mg; zawartość złomu na poz. 70%	124
Rys. 4.93 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3; próbka zawierająca 80% złomu obiegowego ...	126
Rys. 4.94 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego ...	126
Rys. 4.95 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego ...	127
Rys. 4.96 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego ...	127
Rys. 4.97 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego ...	128

Rys. 4.98 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego ...	128
Rys. 4.99 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego ...	129
Rys. 4.100 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego ...	129
Rys. 4.101 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla wlewków stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego ...	130
Rys. 4.102 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	131
Rys. 4.103 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	131
Rys. 4.104 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w krzem w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 60% złomu obiegowego	132
Rys. 4.105 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	132
Rys. 4. 106 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	133
Rys. 4.107 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w żelazo w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	133
Rys. 4.108 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	134
Rys. 4.109 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 70% złomu obiegowego	134
Rys. 4.110 Wyniki analizy statystycznej cząstek bogatych w miedź w zależności od czasu rafinacji, dla odlewów stopu AlSi9Cu3, próbka zawierająca 80% złomu obiegowego	135
Rys. 4.111 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego.....	138
Rys. 4. 112 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego.....	139
Rys. 4. 113 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego.....	139
Rys. 4. 114 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego.....	140
Rys. 4. 115 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego.....	140

Rys. 4. 116 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	141
Rys. 4. 117 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	141
Rys. 4. 118 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	142
Rys. 4.119 Wlewek ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	142
Rys. 4.120 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	143
Rys. 4. 121 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	144
Rys. 4. 122 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 7 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	144
Rys. 4. 123 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	145
Rys. 4. 124 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	145
Rys. 4. 125 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 9 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	146
Rys. 4. 126 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 60% zawartości złomu obiegowego	146
Rys. 4. 127 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 70% zawartości złomu obiegowego	147
Rys. 4. 128 Odlew ze stopu AlSi9Cu3 po 15 min. rafinacji; 80% zawartości złomu obiegowego	147
Rys. 4. 129 Charakterystyka ściskania dla wlewków ze stopu AlSi9Cu3	149
Rys. 4.130 Charakterystyka ściskania dla odlewów ze stopu AlSi9Cu3	150
Rys. 4.131 Wyniki pomiarów twardości wlewków wykonanych ze stopu AlSi9Cu3	153
Rys. 4.132 Wyniki pomiarów twardości odlewów wykonanych ze stopu AlSi9Cu3	154
Rys. 4.133 Wykres ilustrujący wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości od linii średniej (Ra) dla odlewów przed i po procesie kulowania	155
Rys. 4.134 Wysokość chropowatości odlewów według dziesięciu punktów profilu	156

SPIS TABEL

Tabela 3.1 Wyniki badań składu chemicznego wlewków wykonanych ze stopu AlSi12, niepoddanych rafinacji barbotażowej	53
Tabela 3.3 Wyniki badań składu chemicznego wlewków wykonanych ze stopu AlSi9Cu3, niepoddanych rafinacji barbotażowej	53
Tabela 4.1 - Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 80% złomu obiegowego	85
Tabela 4.2 - Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 70% złomu obiegowego	85
Tabela 4.3 - Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 60% złomu obiegowego	85
Tabela 4.4 - Wyniki pomiarów porowatości i stopnia zagazowania wlewków ze stopu AlSi12	86
Tabela 4.5 - Wyniki pomiarów porowatości odlewów ze stopu AlSi12	91
Tabela 4.6 - Zestawienie zbiorcze wartości naprężeń dla wlewków oraz odlewów	102
Tabela 4.7 - Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 80% złomu obiegowego	136
Tabela 4.8 - Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 70% złomu obiegowego	136
Tabela 4.9 - Wyniki pomiarów liczby gazowej dla wlewków o zawartości 60% złomu obiegowego	136
Tabela 4.10 - Wyniki pomiarów porowatości i stopnia zagazowania wlewków ze stopu AlSi9Cu3 w zależności od zawartości złomu obiegowego oraz czasu rafinacji barbotażowej	138
Tabela 4.11 - Wyniki pomiarów porowatości odlewów ze stopu AlSi9Cu3	143
Tabela 4.12 - Zestawienie zbiorcze wartości naprężeń dla wlewków oraz odlewów	152