

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ



**Politechnika
Śląska**

Rozprawa doktorska
mgr inż. Mariusz Lewandowski

Wpływ parametrów odlewania i obróbki cieplnej na kształtowanie
struktury i właściwości mechanicznych odlewów ciśnieniowych bloku
silnika samochodowego

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Kiełbus, prof. PŚ

Katowice, wrzesień 2024 r.

Spis treści

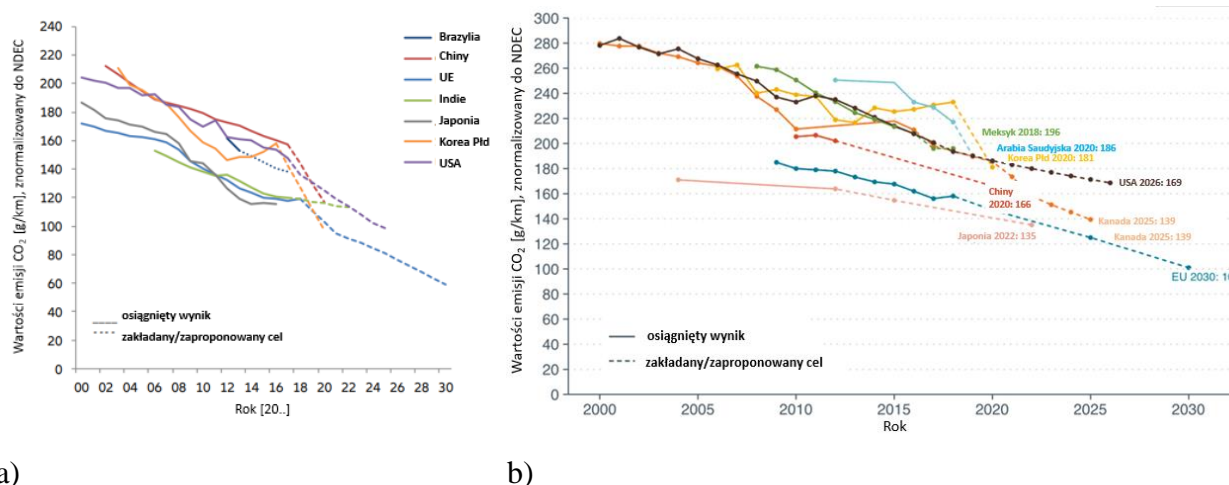
1	WPROWADZENIE	4
2	PRZEGLĄD LITERATURY	10
2.1	CHARAKTERYSTYKA MASZYN CIŚNIENIOWYCH	10
2.1.1	<i>Zarys technologii</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Ogólna zasada działania, zalety i wady</i>	<i>11</i>
2.1.3	<i>Klasyfikacja odlewania ciśnieniowego</i>	<i>13</i>
2.1.4	<i>Elementy maszyny ciśnieniowej zimno-komorowej</i>	<i>16</i>
2.2	SYSTEMY DOZOWANIA CIEKŁEGO STOPU DO MASZYN ZIMNO-KOMOROWYCH	18
2.2.1	<i>Ogólny proces dozowania – opis etapów</i>	<i>18</i>
2.2.2	<i>Czynniki procesu dozowania wpływające na całościowy proces technologiczny i jakość odlewów</i>	<i>19</i>
2.2.3	<i>Wybrane typy systemów dozujących w odlewnictwie ciśnieniowym zimno-komorowym dla stopów aluminium</i>	<i>20</i>
2.3	STOPY ALUMINIUM W ODLEWNICTWIE CIŚNIENIOWYM. PRZYGOTOWANIE I WPŁYW SKŁADNIKÓW STOPU.	25
2.3.1	<i>Stopy aluminium w odlewnictwie ciśnieniowym</i>	<i>26</i>
2.3.2	<i>Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe)</i>	<i>27</i>
2.3.3	<i>Rola i wpływ pierwiastków w stopie EN AC-Al Si9Cu3(Fe)</i>	<i>28</i>
2.3.4	<i>Mikrostruktura stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) odlewu ciśnieniowego</i>	<i>29</i>
3	GENEZA PROBLEMU	31
4	ANALIZA STANU FAKTYCZNEGO	35
4.1	OPIS PROCESU PRODUKCYJNEGO	35
4.2	ANALIZA DANYCH JAKOŚCIOWYCH	42
4.3	ANALIZA MODELU PRODUKCYJNEGO	47
5	TEZA, CELE PRACY	48
6	PLAN BADAŃ	49
7	MATERIAŁ ORAZ METODYKA BADAŃ	52
8	WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	56
8.1	ETAP 1 – OCENA WPŁYWU ZAWARTOŚCI ZŁOMU OBIEGOWEGO W CIEKŁYM STOPIE NA JAKOŚĆ ODLEWÓW	56
8.2	ETAP 2 – SPOSÓB POBIERANIA METALU Z PIECA PODGRZEWZEGO (POZIOM CIEKŁEGO METALU W PIECU)....	69
8.3	ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE	77
8.3.1	<i>Wybór rozwiązania</i>	<i>77</i>

8.3.2	<i>Automatyczna łyżka zalewowa i ograniczenia</i>	79
8.3.3	<i>Innowacyjny system dozowania</i>	82
8.4	INSTALACJA SYSTEMU DOZOWANIA	86
8.5	PIERWSZY TEST INSTALACJI – OCENA SYSTEMU DOZOWANIA	89
8.6	ETAP 3 – WERYFIKACJA WDROŻONEGO SYSTEMU DOZOWANIA W ODLEWANIU SERYJNYM	92
9	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	95
10	BIBLIOGRAFIA	97

1 Wprowadzenie

Branża motoryzacyjna jest jednym z sektorów przemysłu, gdzie wdrażane są limity i obostrzenia dotyczące: m.in. poprawy efektywności energetycznej, czy minimalizacji wpływu na środowisko. Nie dotyczy to jednak tylko wybranych regionów takich jak Unia Europejska, gdzie priorytetem jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, ale również innych części świata. Istnieją regulacje prawne oparte na strategiach zwiększenia efektywności spalania paliwa (CAFE – Stany Zjednoczone) lub ogólnego limitu zużycia paliwa (CAFC – Chiny) [1].

Ograniczenia i wymogi są stopniowo wdrażane wg przyjętej strategii danego państwa lub unii. Oficjalnie zaproponowane emisje CO₂ lub zużycia paliwa dla aut pasażerskich oraz ciężarowych 9 gospodarek świata do 2030 roku przedstawiono na Rys. 1. Regulacje te obejmują 80% rynku światowego sprzedaży pojazdów samochodowych [2, 3].



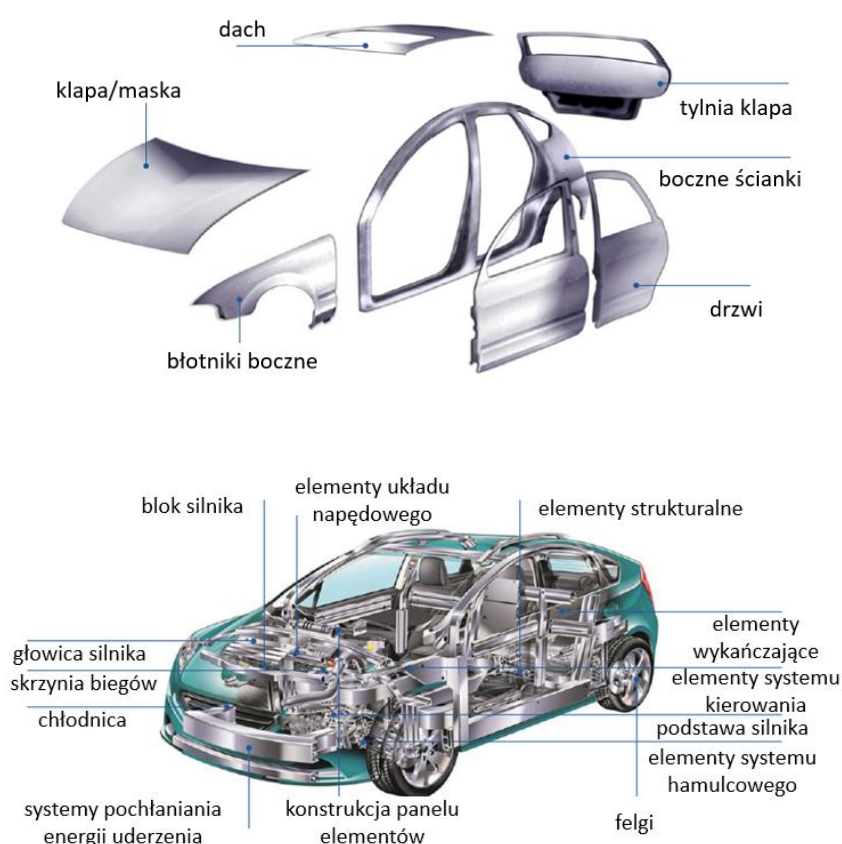
Rys. 1. Zakładane cele ograniczenia emisji CO₂ do 2030 r. dla samochodów: a) osobowych i b) ciężarowych, dla 80% rynku światowego [2, 3].

Wprowadzone regulacje prawne powodują, że producenci samochodów przyjmują różne strategie celem osiągnięcia narzuconych wymogów. Głównym kryterium jest region, gdzie ma zostać sprzedany pojazd. Jedni producenci kierują się w stronę alternatywnych źródeł energii tj. elektryfikacja lub zastosowanie paliwa wodorowego, drudzy skupiają się na bardziej wydajnych jednostkach spalinowych (ICE). Oba podejścia mają pozytywny wpływ ze względu na redukcję masy pojazdów i ekologiczne podejście do produkcji, co stanowi przyczynę dynamicznych prac badawczych w branży motoryzacyjnej. Jak wynika z informacji Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych, redukcja masy samochodu osobowego o 10 % z silnikiem o spalaniu

wewnętrzny, spowoduje obniżenie spalania paliwa o 5 %. Dodatkowo dopasowując moc silnika w celu zachowania tych samych parametrów jezdnych, spalanie może obniżyć się od 6 % do 8 % [1, 4, 5].

W celu obniżenia masy pojazdu, konstruktorzy zaczęli efektywniej zmieniać oraz optymalizować konstrukcje poszczególnych elementów, dzięki wykorzystaniu zaawansowanych programów komputerowych do modelowania oraz symulacji [1, 6, 7].

Dodatkowo zaobserwowano wyraźnie większe zainteresowanie ze strony producentów pojazdów samochodowych zastosowaniem stopów aluminium. Materiał ten stosowany jest na przykład w produkcji niektórych komponentów pojazdu (Rys. 2) takich jak elementy strukturalnej czy składniki karoserii. Konwencjonalnie części te produkowane były ze stali [8, 9, 10]. Jednym z głównych powodów, dla których udział stopów aluminium zwiększa się w całkowitej masie pojazdów jest ich niska gęstość wynosząca około $2,7 \text{ g/cm}^3$ w porównaniu do stali $\sim 7,6 \text{ g/cm}^3$. Oczywiście właściwości mechaniczne stopów aluminium są niższe i dlatego konstrukcje elementów z tego materiału często różnią się grubością, stąd efektywna redukcja masy wynosi około 50% [11, 12].



Rys. 2. Przykłady elementów ze stopów aluminium w pojazdach samochodowych [12].

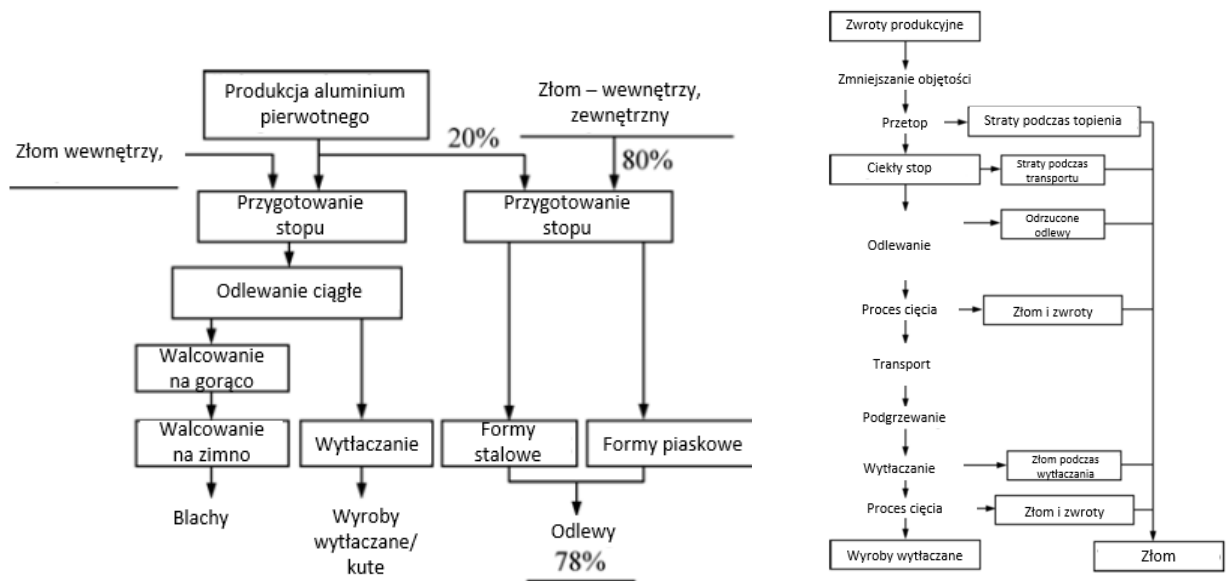
Od roku 2016 do 2019, średni udział stopów w aluminium w konstrukcji samochodów europejskich wzrósł ze 150,6 kg do około 179,2 kg. Przy czym archiwalne prognozy z 2016 roku dotyczące udziału stopów aluminium w masie pojazdu samochodowego w 2020 roku wynosiły tylko od 162,1 kg do 169,8 kg. Najnowsza prognoza na rok 2025 wskazuje, że udział aluminium wyniesie do 198,8 kg. Warto podkreślić, że sama sumaryczna masa komponentów nie odzwierciedla ich ilości oraz skomplikowania, ponieważ optymalizacja geometryczna jest dodatkowym sposobem na ograniczenie masy całego pojazdu. Udział aluminium w konstrukcji samochodu osobowego stale się zwiększa zwłaszcza w elementach struktury nośnej pojazdu i systemach układu napędowego [4, 12-16].

Elementy konstrukcyjne ze stopów aluminium produkuje się głównie technologiami odlewania (grawitacyjnego oraz ciśnieniowego) oraz przeróbki plastycznej (tłoczenie, kucie, walcowanie). Jedną z kluczowych technologii przy masowej produkcji komponentów w motoryzacji jest odlewnictwo ciśnieniowe. Ilość komponentów ze stopu aluminium może wynosić w aucie ponad 30 % masy [14, 17].

Dla stopów aluminium możliwe jest odlewanie małych komponentów o grubości ścianki 1.5-1,8 mm natomiast dla niewielkich obszarów odlewu może on wynosić nawet 1 mm. Technologia ta oferuje krótki czas cyklu produkcyjnego, wysoką jakość powierzchni odlewów oraz możliwość produkowania elementów cienkościennych oraz wysoce zintegrowanych [18, 19]. Producenci z branży motoryzacyjnej coraz częściej korzystają z zalet danej technologii, aby obniżyć masę pojazdu poprzez zastąpienie stalowych komponentów na materiały o mniejszej gęstości. Przykładem był projekt MMLV z 2012 roku zainicjowany przez Forda, Magnę Interim oraz U.S Energy Department. Ich celem było przeprojektowanie i budowa pojazdu z zachowaniem pierwotnej zewnętrznej i wewnętrznej architektury auta, ale z obniżoną masą poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Rezultatem projektu w 2015 roku była redukcja masy samochodu o 23.5 % w porównaniu do masy wyjściowej. Dany wynik osiągnięto m.in. przez zastąpienie tradycyjnej konstrukcji wspornika zawieszenia wykonanego ze stali (złożonego z 7 elementów), jednym odlewem ciśnieniowym ze stopu aluminium. Zmiana technologii nie tylko obniżyła masę komponentu o 40 % względem oryginalnego, ale również obniżyła koszty produkcji. Podobne rezultaty uzyskano na innych elementach struktury nośnej samochodu, gdzie zastąpiono stal, stopami aluminium wykorzystując technologię odlewnictwa ciśnieniowego [20, 21].

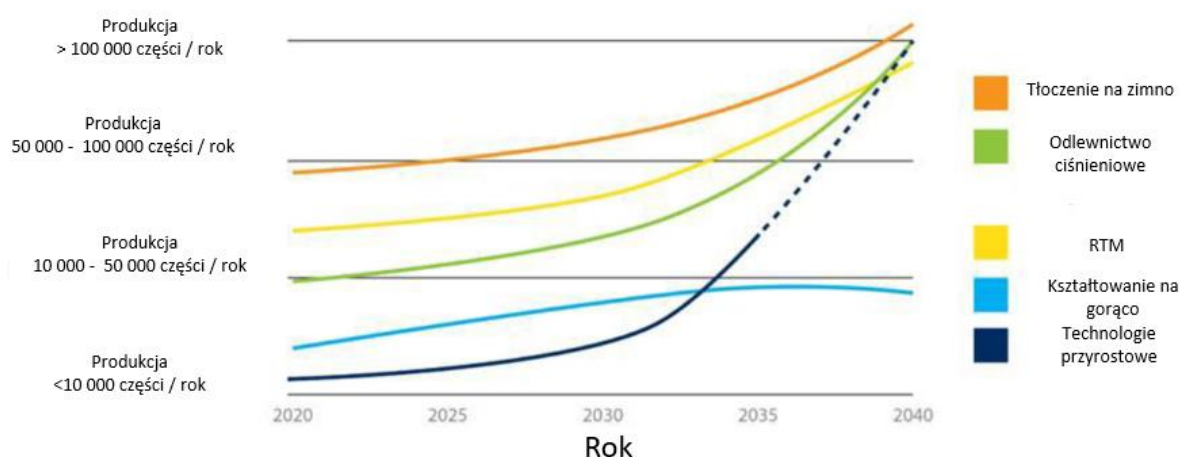
Z ostatnich obiecujących perspektyw jakie ukazało odlewnictwo ciśnieniowe dla branży motoryzacyjnej jest odlewanie całej konstrukcji nośnej pojazdu w czasie jednego wtrysku ciekłego stopu do wnęki formy - wniosek patentowy firmy Tesla z 2019 roku. Takie podejście eliminuje konieczność łączenia dziesiątków pojedynczych elementów konwencjonalnymi i kosztownymi metodami [22].

W technologii odlewania ciśnieniowego, istotne znaczenie ma jakość ciekłego stopu, który powinien być przygotowywany wg określonych wymagań jakościowych i technologicznych. W czasie produkcji, odlewy odpadowe, czy elementy układu wlewowego z systemami przelewowymi, mogą zostać przetopione w tym samym obszarze produkcyjnym. Dany zabieg ogranicza znacząco łańcuch logistyczny poza miejscem produkcji bez wysokiego skomplikowania procesu (Rys. 3). Jest to bardzo istotna zaleta technologii, bo dodatkowo stopy aluminium zawarte w zużytych częściach samochodów podlegają recyklingowi i daje to możliwość oszczędności około 95 % energii potrzebnej do produkcji pierwotnego aluminium [12, 23, 24].



Rys. 3. Ilość złomu w produkcji odlewów aluminium wynosząca nawet ~80%. Uproszczenie logistyczne związane z przetapianiem elementów zakwalifikowanych jako złom w porównaniu do elementów wyciskanych [23].

W kontekście globalnych trendów w przemyśle motoryzacyjnym, zwiększenie udziału złomu w produkcji komponentów metodą odlewania ciśnieniowego jest odpowiedzią na rosnące wymagania dotyczące zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Metoda ta jest jedną z głównych technologii produkcyjnych w branży samochodowej dla stopów aluminium, w związku z czym nacisk na bardziej ekologiczną produkcję w tym obszarze jest znaczący – Rys. 4 [17].



Rys. 4. Prognozy dotyczące udziału poszczególnych technologii wytórczych w produkcji komponentów w branży motoryzacyjnej [17].

Wybór tematu pracy doktorskiej jest wynikiem realnych potrzeb przemysłu motoryzacyjnego dla technologii odlewania wysokociśnieniowego stopu aluminium AlSi9Cu3(Fe). Zwiększenie udziału złomu w produkcie końcowym ma nie tylko znaczenie ekologiczne, ale również ekonomiczne (konkurencyjność oraz ścisła współpraca z Klientem). Celem głównym pracy było osiągnięcie narzuconych wymagań właściwości mechanicznych (R_m oraz A_5) dla odlewu korpusu silnika spalinowego, przy jednoczesnym zwiększaniu udziału złomu własnego (obiegowego) w składzie danego produktu. Podjęto próbę weryfikacji w warunkach przemysłowych firmy Nemark Polska, czy zwiększenie udziału złomu w produkcji wpłynie negatywnie na właściwości mechaniczne odlewów oraz na stabilność produkcyjną. Istniały podejrzenia Firmy, że wyższy udział złomu może utrudnić osiągnięcie stabilnych właściwości mechanicznych. Wszystkie eksperymenty oraz badania dotyczą procesu produkcyjnego w Nemark Polska i jej indywidualnej charakterystyki przemysłowej. Proces odlewania ciśnieniowego ma wiele możliwości modyfikacji kluczowych etapów, dlatego niewielka zmiana jednego czynnika, może prowadzić do różnych rezultatów końcowych.

Realizowane prace charakteryzują się wysokimi wymaganiami, które nie są standardem w odlewnictwie ciśnieniowym. Ze względu na ochronę i wymogi narzucone przez Firmę, nie wszystkie szczegóły mogą zostać ujawnione. W ramach pracy doktorskiej przeprowadzono analizę stanu faktycznego z próbą identyfikacji niestabilnych parametrów procesowych w Nemak Polska. Uzyskane wyniki pozwoliły na dokładne zrozumienie wpływu różnych czynników na właściwości mechaniczne odlewów i umożliwiły identyfikację potencjalnych źródeł problemów produkcyjnych. Jako główny problem zidentyfikowano zbyt duży udział objętościowy cząstek ołowiu w ciekłym stopie, przy niewielkiej ilości stopu w piecu podgrzewczym.

W ramach realizacji pracy doktorskiej, w celu ograniczenia ilości cząstek ołowiu w ciekłym stopie w piecu podgrzewczym zintegrowanym z maszyną wysokociśnieniową, nieznacznie zmodyfikowano konstrukcję pieca podgrzewczego oraz zainstalowano innowacyjny system dozowania ciekłego stopu AVD bezpośrednio do komory prasowania maszyny wysokociśnieniowej. Ustalono optymalną głębokość zanurzenia ciśnieniowego pojemnika ceramicznego poniżej lustra ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ w piecu podgrzewczym, w celu zminimalizowania ryzyka pobierania wtrąceń niemetalicznych i zabezpieczenia przed poborem pierwiastków ciężkich (głównie Pb) w pobliżu dna pieca podgrzewczego. Weryfikacja efektów zrealizowanych projektów konstrukcyjnych, z uwzględnieniem wymagań norm wewnętrznych dotyczących udziału wyselekcjonowanego złomu obiegowego we wsadzie, wykazała że, stabilne osiągnięcie wymaganego poziomu właściwości wytrzymałościowych odlewów wysokociśnieniowych korpusów silników spalinowych ze stopu $AlSi9Cu3(Fe)$.

2 Przegląd literatury

2.1 Charakterystyka maszyn ciśnieniowych

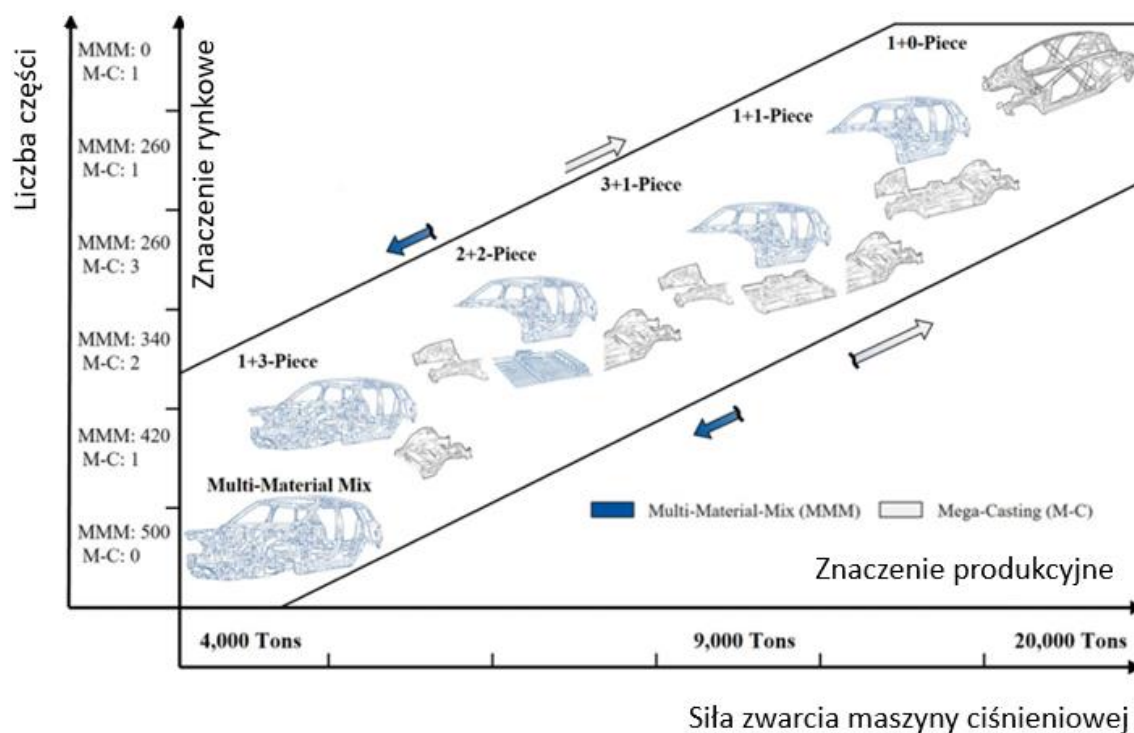
2.1.1 Zarys technologii

Technologia odlewnictwa ciśnieniowego miała swój początek w XIX wieku, na skutek rozwijającej się branży poligraficznej i zapotrzebowania na masową produkcję czcionek drukarskich. Konstrukcja pierwszej maszyny odlewającej z wykorzystaniem dodatkowego ciśnienia zewnętrznego została opatentowana przez Wililiama Churcha w 1822 roku. Jednak dopiero w latach 30, XX wieku, zaczęto seryjnie produkować zaawansowane maszyny odlewnicze [25-26].

W latach 60, XX wieku, odlewanie ciśnieniowe stało się już z jedną z podstawowych metod odlewania stopów metali nieżelaznych. Uporządkowana została struktura technologii, wyposażenie, sposób organizacji procesu wraz z jego kontrolą i sterowaniem. Dostępne źródła literaturowe podkreślają, że aktualnie ponad 50 % odlewów ze stopów aluminium jest produkowaną tą technologią [25, 28-29].

Omawiana technologia przechodzi nieprzerwane zmiany i ulepszenia nabierając znaczenia przemysłowego, zwłaszcza w branży motoryzacyjnej. Nie tylko za sprawą udoskonalonych sposobów mechanizacji i automatyzacji, ale również dzięki zaawansowaniu systemów komputerowych do poprawy stabilności i jakości procesu. Ważnym aspektem jest również dostępność stopów o coraz wyższych właściwościach mechanicznych (bez dodatkowej obróbki cieplnej), które stają się bardziej konkurencyjne dla innych metod produkcji ze względu na aspekty ekonomiczne [30, 31].

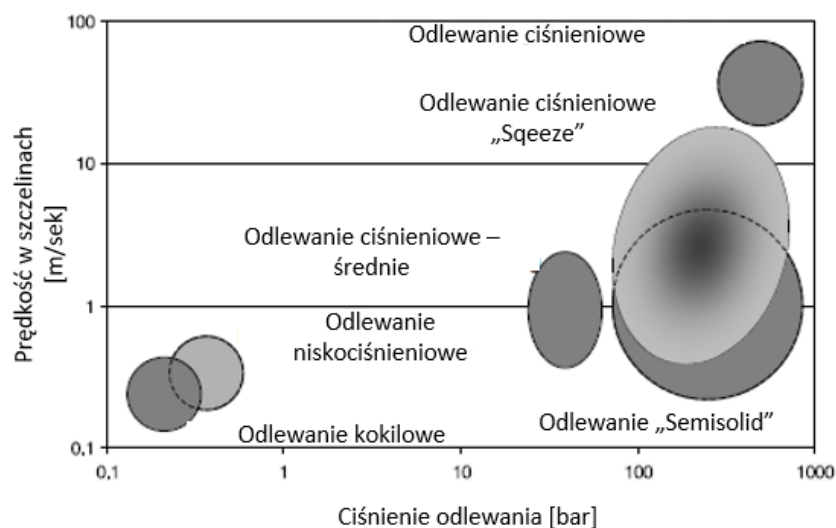
Współczesna technologia odlewania ciśnieniowego rewolucjonizuje sposób produkcji części motoryzacyjnych, takich jak elementy nośne konstrukcji samochodów. Tesla, producent aut elektrycznych, jest jednym z pionierów pod kątem promowania tej technologii w produkcji wielkogabarytowych, zintegrowanych elementów. Zwiększanie rozmiaru odlewów, znacząco redukuje całościowy czas i koszty produkcyjne. Ogranicza to ilość elementów w pojeździe i zaawansowane procesy ich łączenia. Jest to czynnik, który napędza rozwój technologii odlewania ciśnieniowego pod kątem zwiększania siły zwarcia maszyny – Rys. 5 [30, 32-34].



Rys. 5. Rozwój maszyn ciśnieniowych pod kątem zwiększania siły zwarcia i możliwości produkcji wielkogabarytowych, zintegrowanych odlewów w branży motoryzacyjnej [34].

2.1.2 Ogólna zasada działania, zalety i wady

Główną cechą odlewnictwa ciśnieniowego jest wtrysk ciekłego stopu do formy odlewniczej wykonanej ze stali do pracy na gorąco przy ciśnieniu nawet >1000 bar, utrzymywanym do czasu zakrzepnięcia. Proces wykonany jest w bardzo krótkim czasie (np. 5-150 ms) z prędkościami płynięcia ciekłego stopu wynoszącymi nawet 20-150 m/s w szczelinach wnęki, co wyróżnia je na tle innych technik odlewania – Rys. 6. Jest to zaprzeczenie regułom klasycznego odlewania, w którym głównym celem jest powolne i spokojne wypełnianie wnęki [26, 35-38].



Rys. 6. Porównanie ciśnienia odlewania do prędkości w szczelinach formy odlewniczej dla określonych technologii odlewania stopów metali [36].

Czas samego cyklu produkcyjnego elementów wyrażany jest w najczęściej w sekundach, a wielkość maszyn wiąże się bezpośrednio z siłą zwierania. Jest to istotny parametr, ponieważ odpowiednio dobrana wartość siły zapobiega otwarciu formy w trakcie wtrysku ciekłego metalu pod wysokim ciśnieniem. Dla dużych odlewów, siły te mogą sięgać kilkunastu tysięcy ton. Przewagą odlewnictwa ciśnieniowego względem odlewania grawitacyjnego jest [25-27, 30, 37-39]:

- wysoka powtarzalność procesu i stabilność produkcji,
- wysoka stabilność wymiarowa oraz uzysk metalu (95%),
- wysoka wydajność oraz trwałość narzędzia (np. >100 000 odlewów),
- bardzo krótki czas cyklu,
- dobra jakość powierzchni odlewu, redukująca wymóg dodatkowej obróbki mechanicznej,
- lepsze właściwości fizyczne i chemiczne odlewów za sprawą drobnoziarnistej struktury w porównaniu do odlewów kokilowych,
- możliwość automatyzacji całego procesu,
- potencjał pod kątem zwiększenia wielkości i skomplikowania geometrii odlewu z jednoczesną redukcją grubości ścianek,
- łatwość recyklingu komponentów i wdrożenie go bezpośrednio w miejscu produkcji.

Jak każda technologia, również odlewanie ciśnieniowe nie jest pozbawione wad. Do najważniejszy zalicza się:

- brak lub niską opłacalność przy małoseryjnych produkcjach,
- wysoki koszt narzędzia (formy), utrudnione zmiany geometryczne formy,
- czasochłonny okres przygotowania do produkcji,
- ograniczenie pod kątem wielkości odlewów – siła zwarcia maszyny limituje wielkość odlewu,
- wysoki koszt inwestycyjny maszyny oraz urządzeń, wymóg zaprojektowania odpowiedniej infrastruktury,
- wysoka ilość parametrów procesu jakie muszą być kontrolowane, pod kątem jakości procesu oraz odlewów,
- złożoność procesu produkcyjnego, utrudnienie diagnozy problemów związanych z utrzymaniem i konserwacją maszyny z urządzeniami pomocniczymi w odpowiednim stanie,
- wysokie ryzyko wad w odlewie i braków produkcyjnych, przy braku zawansowanej i błyskawicznej kontroli jakości. Jakość odlewów może utrudnić spełnienie wymagań jakościowych po procesach jak obróbka cieplna, mechaniczna lub technologie łączenia,
- główne zastosowanie w metalach nieżelaznych,
- wymagane wysokie kwalifikacje zasobów ludzkich,
- limitacje przy geometrii odlewów zamkniętych i przestrzeni, tj. kanały chłodzące. Rdzenie stalowe formy tylko odwzorowują kształty, które muszą umożliwić wyjęcie odlewu po zakrzepnięciu.

2.1.3 Klasyfikacja odlewania ciśnieniowego

Źródła literaturowe przedstawiają różne i złożone podziały technologii i maszyn odlewnictwa ciśnieniowego. Klasyfikacja może dotyczyć:

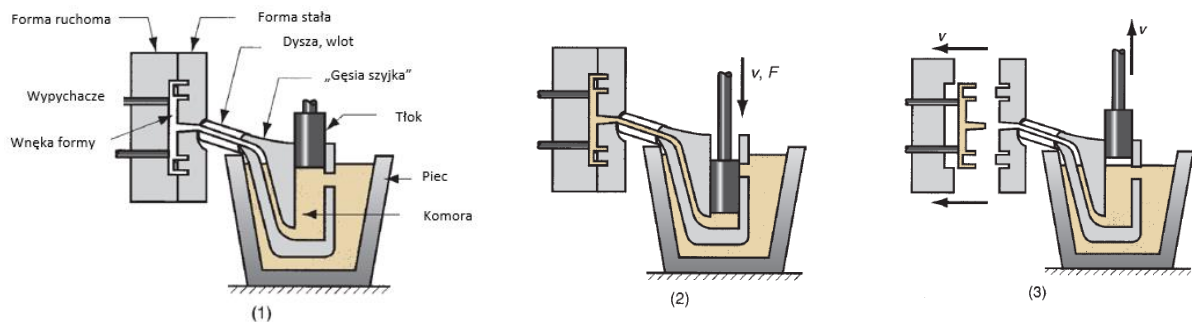
- rodzaju, wielkości maszyny produkcyjnej i wartości ciśnienia wywieranego na stop (zwarcie maszyn wyrażone w tonach),
- sposobie ryglowania form (przegubowe, klinowe),
- systemu wywierania ciśnienia na ciekły stop (pneumatyczne, mechaniczne),
- rodzaju napędów (elektryczne, hydrauliczne),
- sposobie wypełnienia wnęki formy (ilość etapów ruch tłoka lub inna forma wtlaczania typu squeeze casting),

- stanu skupienia stopu przed wtryskiem (stan ciekły i odmiany stanu ciekło-stałego tj. semi-solid, tixocasting, rheocasting),
- warunków atmosfery we wnęce (np. obniżone ciśnienie przed wtryskiem),
- stopień automatyzacji (ręczny, półautomatyczny, automatyczny).

Jednak najpowszechniejszym podziałem jest rozróżnienie maszyn pod kątem lokalizacji komory (strzałowej, tłokowej, wlewowej, ciśnieniowej, wtryskowej), w której realizowany jest wzrost ciśnienia na ciekły stop. Tym samym, wyróżniamy dwa główne procesy w odlewnictwie ciśnieniowym technologii gorąco- oraz zimno-komorową (z rozróżnieniem na orientację komory - pionowa oraz pozioma). Podział na maszyny zimno- i gorąco-komorowe wziął się głównie ze względu na agresywne działanie stopów o wyższych temperaturach topienia, na trwałość elementów systemu wtrysku. Wady oraz zalety obu wariantów technologii przedstawia Tab. 1.

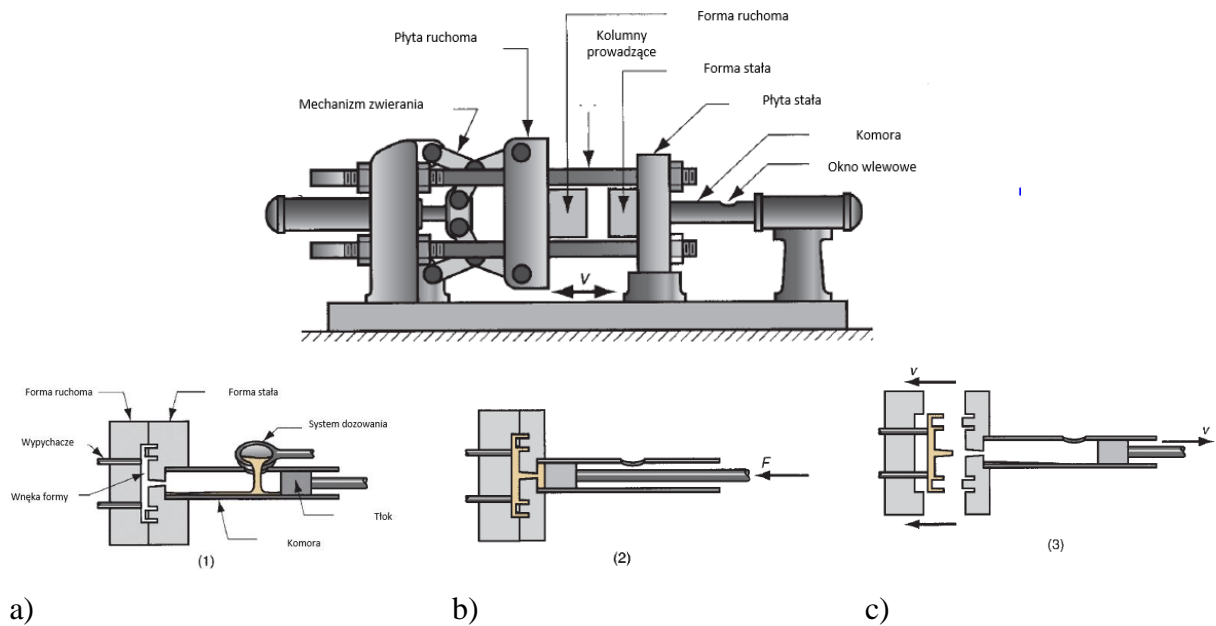
W przypadku [25-27, 35, 41, 42]:

- 1) gorąco-komorowej, komora strzałowa z układem wtrysku jest zanurzona w ciekłym stopie bezpośrednio w piecu. Ciekły stop przepływa przez otwór bezpośrednio z pieca wypełniając komorę. Przy ruchu tłoka, ciekły stop przetłaczany jest przez otwór wlewowy do wnęki formy. Ruch tłoka powoduje odcięcie zasilania. Odlew po procesie krzepnięcia zostaje wyciągnięty z formy – Rys. 7a-c.



a) b) c)
Rys. 7. Gorąco-komorowa technologia odlewania ciśnieniowego: a) składowe procesy, b),c) zasada odlewania [35].

- 2) zimno-komorowej, komora z układem wtrysku znajduje się poza piecem jako osobny element konstrukcji formy lub maszyny odlewniczej. Ciekły stop jest transportowany przez odrębny system dozowania (ręczny, bądź automatyczny) do komory znajdującej przy maszynie odlewniczej. Po zwarceniu formy, ciekły stop wlewany jest do komory, po czym następuje ruch tłoka i wtrysk stopu do wnęki. Po wyjęciu odlewu i operacji oprysku, realizowany jest powrót tłoka w pozycji tylnej – Rys. 8a-c.



Rys. 8. Technologia odlewania ciśnieniowego, zimno-komorowa: a) składowe maszyny, b) zasada odlewania [35].

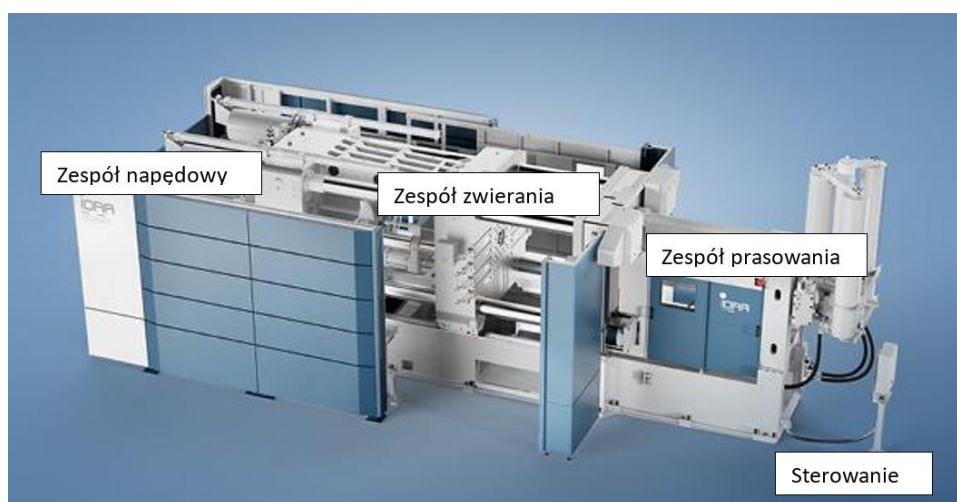
Tab. 1. Zalety i wady odlewania ciśnieniowego w wariantach gorąco- i zimno-komorowych.

Kryterium	Technologia gorąco-komorowa	Technologia zimno-komorowa
<u>Zakres temperatury pracy</u>	Ograniczenie do stopów o niskiej temperaturze topnienia do 480°C tj.: cynku, ołowiu, cyny. Wyjątkiem są stopy magnezu.	Zastosowanie dla stopów o wyższej temperaturze topnienia (stopy Al, Cu, Ti). Wyjątkiem są stopy Mg.
<u>Cisnienie prasowania</u>	Ograniczenia technologiczne związane z możliwością zastosowania wyższych ciśnień.	Uzyskanie najwyższych wartości prasowania dzięki odrębnemu systemowi wtrysku.
<u>Temperatura stopu</u>	Wyższa kontrola pod kątem temperatury stopu – układ zamknięty i kompaktowy.	Dodatkowe czynniki, takie jak transport, odległość pieca od komory, mogą wpływać na niestabilność temperaturową.
<u>Czas cyklu</u>	Krótki, ze względu na zintegrowany system dozowania i szybsze wypełnianie wnętrza formy	Długi, z powodu konieczności transferu stopu za pomocą dodatkowego urządzenia.
<u>Jakość odlewu</u>	Zamknięty układ, zredukowany wpływ utleniania stopu. Wyższa kontrola transferu metalu.	Większe ryzyko wpływu czynników zewnętrznych na jakość odlewu, ze względu na złożoność procesu. Wyższe właściwości mechaniczne.
<u>Efektywność</u>	Wyższa wydajność i stabilność procesu. Wyższy uzysk stopu.	Występowania krążka (piętki) przy układzie wlewowym, który w odlewach cienkościennych wymaga dłuższego czasu krzepnięcia i wydłużenia czasu cyklu.
<u>Trwałość</u>	Niska trwałość elementów uszczelniających, wysokie wymagania konserwacji i przeglądów. Nie ma wymogu stosowania chłodzenia końcówki tłoka i komory.	Niska awaryjność. Wysoka temperatura ciekłego metalu nie działa bezpośrednio na ruchome części maszyny. Prostsza naprawa i konserwacja określonych komponentów systemu.
<u>Zastosowanie</u>	Małe elementy. Mniejsze ciśnienia prasowania. Niewielkie możliwości pod kątem produkcji odlewów wielogabarytowych.	Umożliwia stosowanie stopów na bardziej zaawansowane i wymagające elementy konstrukcyjne.
<u>Złożoność systemu</u>	Zintegrowany układ wtrysku i pieca.	Wymagany odrębny system dozowania ciekłego stopu. Większa podatność na wady związane z transportem stopu (np. utlenianie, wtrącenia niemetaliczne).

2.1.4 Elementy maszyny ciśnieniowej zimno-komorowej

Najpowszechniejszą technologią ciśnieniową w produkcji masowej elementów w przemyśle motoryzacyjnym jest technologia zimno-komorowa. Głównie ze względu na możliwość odlewania stopów o wyższych właściwościach mechanicznych (stopy aluminium) oraz większe możliwości pod kątem wielkości i geometrii odlewów. Producenci maszyn oraz urządzeń peryferyjnych oferują zróżnicowane systemy wchodzące w skład celi odlewniczej, ale podstawowymi i powszechnymi elementami samej maszyny są (Rys. 9) [26-27, 43-44, 47]:

- zespół napędowy,
- zespół zwierania płyt montażowych,
- zespół prasowania (multiplikacji),
- zespół sterowania i zasilania.



Rys. 9. Najważniejsze zespoły maszyny odlewniczej [27, 46].

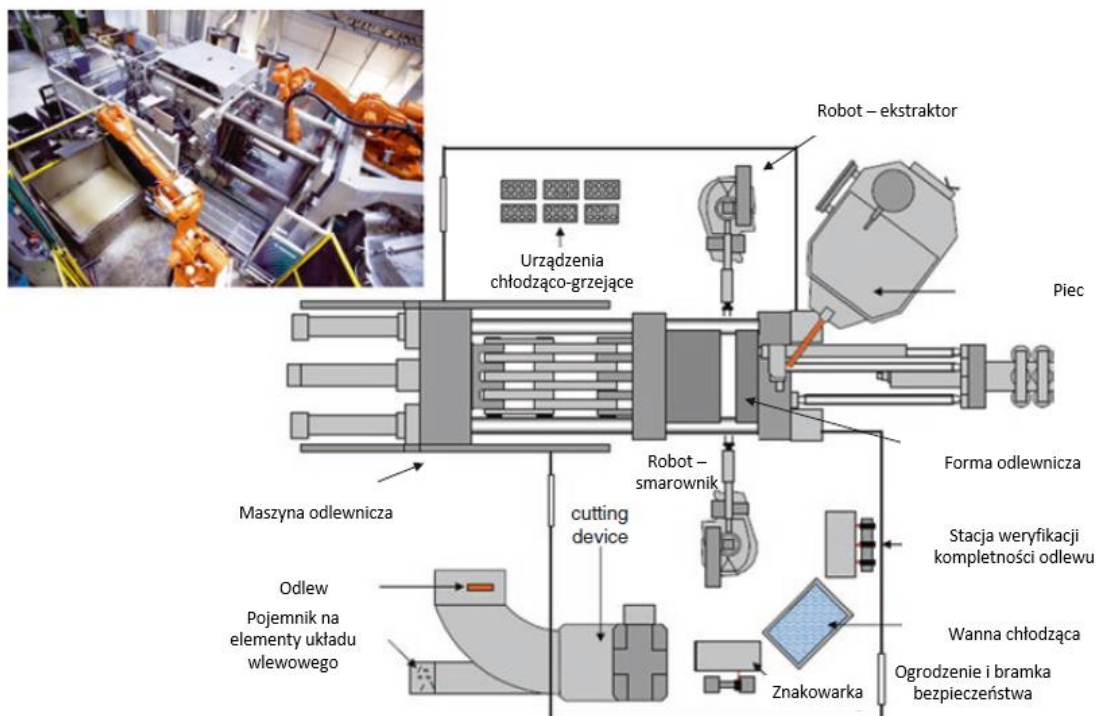
Maszyna wraz urządzeniami pomocniczymi (peryferyjnymi), tworzy celę odlewniczą, obsługiwana przez operatora maszyny odlewniczej (Rys. 10). Podstawowymi elementami celi są:

- forma odlewnicza – narzędzie odwzorowujące kształt odlewu wraz z całym zespołem elementów tj., wypychacze, kanały grzania/chłodzenia, suwaki,
- piec podgrzewczy oraz system dozowania ciekłego stopu – przetrzymuje ciekły stop w odpowiedniej temperaturze/warunkach oraz dozuje ciekły stop do komory strzałowej,
- zespół smarowania formy – czyszczenie pozostałości po poprzednim wtrysku, natrysk środków oddzielających, ułatwienie oddzielenie odlewu od formy w czasie ekstrakcji,
- system ekstrakcji odlewu z formy oraz transportu – automatyczna wyjmowanie odlewu, najczęściej realizowane poprzez manipulatora przemysłowego,

- urządzenia usuwające części układu wlewowego od odlewu – obijanie, cięcie, prasa,
- urządzenia regulujące temperaturę pracy formy (jednostki termoregulacji, chłodzenia) – kontrola procesu oraz trwałości formy.

Dodatkowymi elementami w celi odlewniczej mogą być:

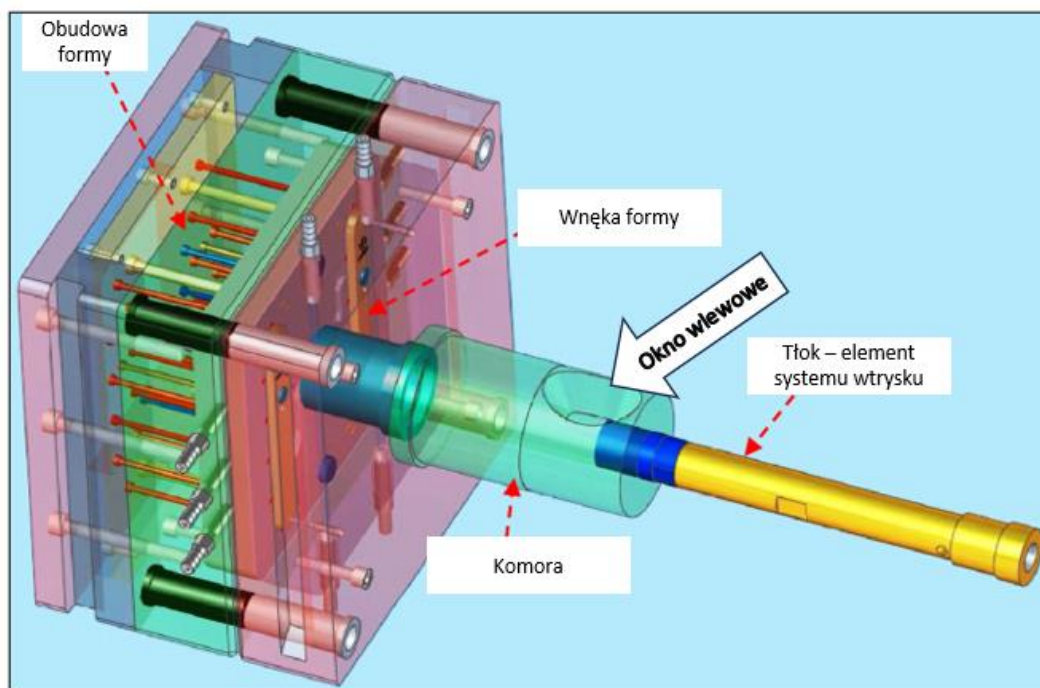
- systemy próżni – obniżanie ciśnienia we wnętrzu formy umożliwia zminimalizowanie wad takich jak np. porowatość gazowa,
- rozbudowane systemy kontroli ruchu tłoka i smarowania – zwiększenie jakości odlewów, uniknięcie okluzji stopu w komorze lub zanieczyszczenie smarem,
- systemy kontroli temperatury formy (termokamery) – kontrola temperatury powierzchni formy, to kluczowy czynnik oceny procesu,
- wanny lub komory chłodzące odlewy – sposób chłodzenia odlewu po ekstrakcji z formy ma wpływ na finalne właściwości mechaniczne elementu,
- zespół pras hydraulicznych – przycinanie odlewu oraz jego prostowanie,
- stanowisko identyfikacji odlewów – nadruk numeru identyfikacyjnego,
- nieniszczące kontrole jakości odlewu – kontrole wizyjne oraz rentgenowskie,
- zintegrowane systemy komputerowe - do kolekcjonowania i analizy danych o produkcji,
- stacje odzysku oddzielaczy, energii, filtry oraz odciągi,
- bramki i systemy bezpieczeństwa.



Rys. 10. Przykładowe wyposażenie celi odlewniczej w urządzenia peryferyjne [44].

2.2 Systemy dozowania ciekłego stopu do maszyn zimno-komorowych

Wtrysk ciekłego stopu do wnęki formy odlewniczej w maszynach ciśnieniowych zimno-komorowych jest poprzedzony procesem dozowania stopu do okna wlewowego komory – Rys. 11. W przeszłości proces ten był wykonywany ręcznie, ale przy znacznej masie odlewu, jest on realizowany automatycznie. Ułatwia to uzyskanie stabilnych i wydajnych warunków procesu odlewania [25, 28].



Rys. 11. Okno wlewowe komory strzałowej - lokalizacja końcowa ciekłego stopu w maszynie zimno-komorowej [48].

2.2.1 Ogólny proces dozowania – opis etapów

Proces dozowania ciekłego metalu można podzielić na trzy etapy:

Etap I – pobieranie ciekłego stopu z pieca Przy maszynie ciśnieniowej jest zlokalizowany piec podgrzewczy (dozujący). Jego główną rolą jest podtrzymanie parametrów przygotowanego wcześniej stopu z pieca topialnego. Może być niezależnym urządzeniem lub posiadać wbudowany system dozowania. Ciekły stop jest pobierany przez system dozowania z określonej lokalizacji z objętości pieca (np. z okolicy powierzchni bądź dna) [25, 28, 49].

Etap II - transport do komory strzałowej Jest to głównie transport poprzez narzędzie/urządzenie przemieszczające się z pieca do komory lub ścieżkę łączącą między piecem, a komorą (kanał transportowy). Transport ciekłego metalu jest zsynchronizowany z cyklem pracy maszyny odlewniczej [25, 28, 49].

Etap III - wypełnianie komory Ostatnia czynność to wlanie wymierzonej porcji ciekłego stopu do komory prasowania. Forma musi być zamknięta i zablokowana poprzez system ryglujący maszyny. Tłok prasujący jest w pozycji startowej, z tyłu komory strzałowej odsłaniając okno wlewowe komory. Dozowanie odbywa się przez wymuszenie mechaniczne, grawitacyjne, bądź w wyniku zmiany ciśnienia [25, 28, 49].

2.2.2 Czynniki procesu dozowania wpływające na całościowy proces technologiczny i jakość odlewów

Jakość odlewów ciśnieniowych zależy między innymi od parametrów dozowania ciekłego stopu. Do najważniejszych należą:

- 1) **Stabilność i odpowiednia temperatura stopu** – przegrzany stop, zwiększa ryzyko zagazowania. Zbyt wychłodzony natomiast może negatywnie wpływać na zdolność wypełniania wnęki formy, a tym samym pogarszać jakość odlewu oraz zwiększyć ryzyko zniszczenia formy bądź pieca. Potencjalne wady odlewów: niedolewy, porowatość skurczowa, gazowa. Niejednorodny rozkład temperaturowy stopu w piecu może powodować niestabilność jakościową produktów [49].
- 2) **Lokalizacja pobierania stopu z objętości pieca.** Na powierzchni stopu zachodzi proces utleniania, czyli powstawania tlenków. Dodatkowo na powierzchnię mogą przedostać się cząstki niemetaliczne będące zanieczyszczeniem w stopie (pochodzące z wymurówki ogniotrwałej). Pobieranie stopu w pobliżu dna jest związane z ryzykiem pobrania cząstek, które opadły lub znalazły się tam na skutek grawitacji bądź wymuszonego ruchu mieszającego stopu. Dane czynniki mogą wpływać na właściwości wytrzymałościowe stopu i jakość odlewów [49, 50].
- 3) **Sposób pobrania ciekłego stopu** - zbyt gwałtowne wypełnienie może skutkować zagazowaniem stopu, za wolne wypełnianie negatywnie wpływa na czas cyklu (efektywność procesową) [49].

- 4) **Warunki i sposób przemieszczenia stopu do komory prasowania** również mogą wpływać na jakość stopu. Występuje ryzyko zagazowania stopu lub przedostawanie się utlenionej warstwy stopu mającej kontakt z narzędziem roboczym, przy niekontrolowanym lub zbyt gwałtownym przemieszczeniu stopu. Długość i czas drogi transportu powinien być jak najkrótszy, aby ograniczyć wychładzanie stopu i powstawanie tlenków [51].
- 5) **Wypełnienie komory** powinno nastąpić w momencie gotowości maszyny do wtrysku, aby nie wpływać na czas cyklu. Gwałtowne i niekontrolowane wypełnianie komory powoduje obniżenie jakości odlewu. Skutkiem ubocznym wypełniania komory jest jej powolne niszczenie poprzez kontakt stopu z komorą (erozja oraz przegrzewanie), skracając jej trwałość [53].

2.2.3 Wybrane typy systemów dozujących w odlewnictwie ciśnieniowym zimno-komorowym dla stopów aluminium

Istnieje wiele rozwiązań systemów dozujących oferowanych przez producentów lub opracowanych przez instytucję badawczo-naukowe. W literaturze dostępny jest podział systemów m.in. ze względu na zasadę działania i sposób realizacji technicznej [28]:

- pneumatyczne,
- próżniowe - zasysanie ciekłego metalu do wnęki formy,
- elektromagnetyczne,
- dozowniki mechaniczne, czerpakowe.

Natomiast w odlewnictwie ciśnieniowym zimno-komorowym dla stopów aluminium, wyróżniamy głównie typy systemów [52]:

1) Mechaniczne/ czerpakowe (naczyniowe)

Najpowszechniejsza i najprostsza metoda dozowania. Czerpak, czyli naczynie o kształcie otwartym (Rys. 12a) bądź zamkniętym, jest najczęściej zamocowany na manipulatorze mechanicznym (Rys. 12b). Może być wykonany z żeliwa pokrytego ochronną powłoką lub z ceramiki.

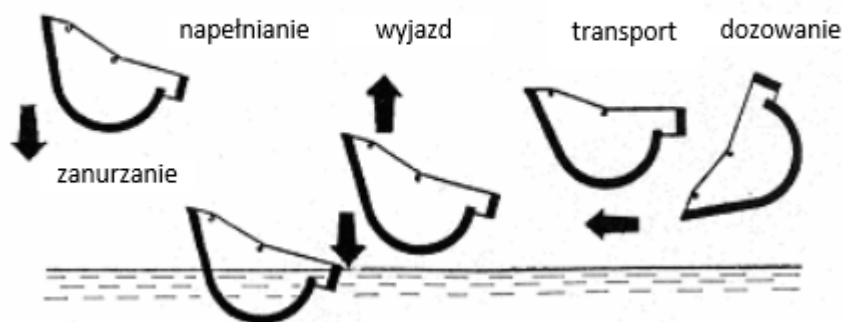


a)

b)

Rys. 12. System łyżki automatycznej: a) czerpak o kształcie otwartym w komorze pieca podgrzewczego, b) manipulator z zamontowanym systemem dozowania [54].

Cykl dozowania rozpoczyna się od umieszczenia nagrzanej łyżki nad lustrem stopu w piecu. Następuje jej obniżenie do momentu wykrycia stopu np. przez system elektrod. Po wykryciu stopu (opcjonalny jest ruch robota odgarniający lustro z tlenków), łyżka zanurzana jest pod zaprogramowanym kątem. Dzięki temu, czerpak pobiera określoną ilość stopu, zmienia kąt i wyjeżdża z pieca. Następuje transport do komory i przechył łyżki ze stopem do otworu wlewowego. Manipulator wraca do pieca zakańczając cykl. Uproszczony schemat procesu przedstawia Rys. 13.



Rys. 13. Uproszczona zasada dozowania stopu łyżką automatyczną [25].

Automatyczne łyżki dozujące muszą współpracować z piecami podgrzewczymi zlokalizowanymi blisko maszyny odlewniczej. Piece są niezależnymi elementami systemu dozowania. Istnieją różnorodne systemy grzania pieców (gazowe, elektryczne) umieszczone

w różnych konfiguracjach (dno, sklepienie pieca) – Rys. 14a,b. Odlewnie mogą posiadać własne konstrukcje tego typu, zaprojektowane pod swoje wymagania z zastosowaniem własnych rozwiązań technologicznych [49].



a)



b)

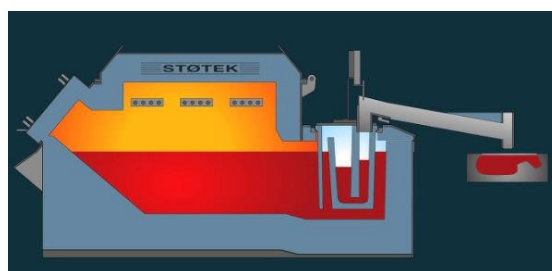
Rys. 14. Piece podgrzewcze: a) niezależne urządzenia b) współpracujące z automatyczną łyżką zalewową [49, 55].

2) Z zastosowaniem nadciśnienia gazu

Możemy wyróżnić dwa systemy: piece nadciśnieniowe z wydzieloną (Rys. 15a,b) i ze szczelną komorą (Rys. 16a). Systemy te są zespolone konstrukcyjnie z piecem podgrzewczym. Często określa się je jako piece dozujące.



a)

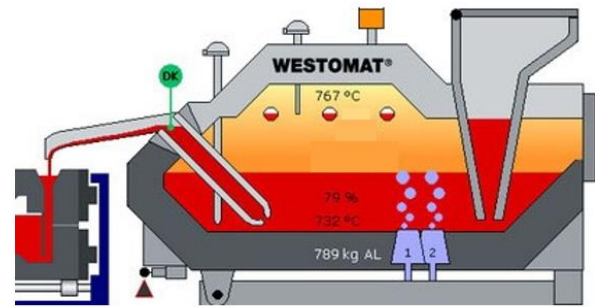


b)

Rys. 15. Piec dozujący z wydzieloną komorą firmy STOTEK: a) konstrukcja, b) elementy systemu [56, 57].



a)



b)

Rys. 16. Piec dozujący ze szczelną komorą firmy STRIKO WESTOFEN: a) konstrukcja, b) elementy systemu [58, 59].

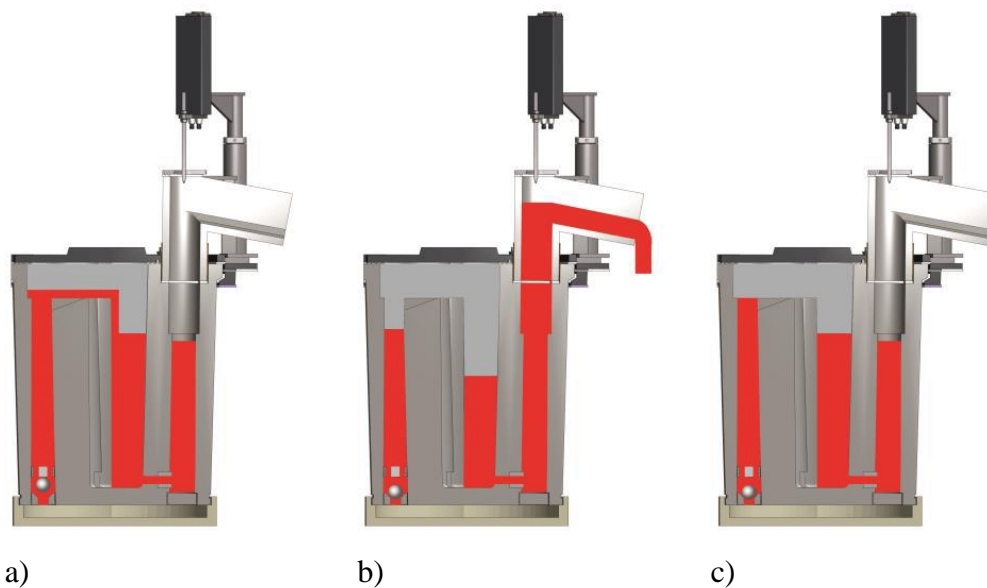
Różnica między dwoma systemami jest następująca:

a) Piec nadciśnieniowy ze szczelną całą komorą pieca

W piecach tego typu wykorzystuje się zasadę zwiększania ciśnienia nad lustrem stopu (Rys. 16b), wypychając określoną ilość stopu przez rurę ceramiczną umieszczoną blisko dna na rynnę dozującą. Odpowiednia masa metalu jest przeliczana na podstawie czasu i ciśnienia [59].

b) Piec nadciśnieniowy z otwartą komorą pieca

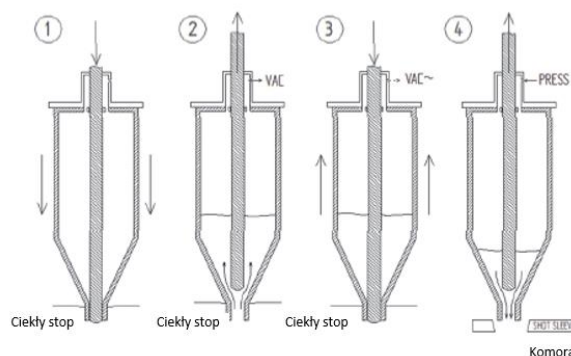
W pierwszej kolejności sprężone powietrze, jest wykorzystane do wytworzenia podciśnienia (Rys. 17a). Ma to na celu wypełnienie komory pompy do ustalonego poziomu. Zakończenie wypełniania jest realizowane poprzez sygnał z elektrod stykowych. Następnie sprężone powietrze lub azot tworzy nadciśnienie w pompie powodując przepływ stopu do kanału wyjściowego/dozującego na rynnę transportową (Rys. 17b). Charakterystyczną cechą systemu jest to, że poziom wypełnienia pompy zostaje taki sam po każdym cyklu, niezależnie od poziomu wypełnienia pieca (Rys. 17c) [56].



Rys. 17. Zasada działania pieców z otwartą komorą: a) napełnianie, b) dozowanie, c) oczekiwanie na następny cykl [56].

3) Z zastosowaniem próżni, podciśnienia

System bazuje na zamkniętym czerpaku mechanicznym oraz systemie pobierania stopu za pomocą podciśnienia w komorze roboczej (Rys. 18a,b). Stop w odpowiedniej ilości jest zasysany do komory. Cechą charakterystyczną jest pobieranie stopu spod powierzchni lustra. Dotychczas systemy oferowały małą pojemność dozowania, przez co nie znalazły większego zastosowania w produkcji wielkogabarytowych elementów motoryzacyjnych [52].



a)

b)

Rys. 18. System dozowania bazujący na podciśnieniu a) Przykładowe urządzenie AVD firmy MELTEC b) bazujący na dozowaniu z wykorzystaniem podciśnienia [52, 60].

W literaturze nie ma kompleksowego porównania podstawowych cech systemów dozowania, ale na podstawie informacji producentów oraz dostępnej literatury, w Tab. 2 przedstawiono własne zestawienie ważniejszych cech ww. systemów.

Tab. 2. Zestawienie głównych cech poszczególnych systemów dozowania w odlewnictwie ciśnieniowym stopów aluminium [49, 52, 56, 61].

Cechy systemów dozowania	Dozowniki czerpakowe	Piec nadciśnieniowe (dozujące)	System podciśnieniowy
Maksymalna masa dozowanego materiału	>50 kg	> 60 kg	Do 25 kg
Powtarzalność i dokładność	2-5 %	±1.5-2 %	±0,5-1,5 %
Gotowość systemu do realizacji dozowania po postoju	Zalecane wygrzanie łyżek przed zanurzeniem	Natychmiastowa	Wymagane podgrzanie systemu 15-45 min
Wpływ systemu na jakość stopu	Otwarta konstrukcja łyżki powodują utratę ciepła oraz szybsze utlenianie stopu. Wysokie ryzyko pobierania wtrąceń z powierzchni stopu	Rynna dozująca ma zazwyczaj 0,5-2,5 m. Za każdy raz po dozowaniu powstaje cienka warstwa stopu na rynnie, trafiająca do komory, a tym samym do wnęki. Wysoki spadek temperatury i ryzyko pobierania zanieczyszczeń z dna pieca	Zamknięta i kompaktowa przestrzeń, minimalizuje spadek temperatury i utleniania. Pobieranie stopu z pominięciem lustra stopu.
Trwałość, stopień zaawansowania, wymagania dotyczące konserwacji	Wysoka trwałość, łatwość w konserwacji i wymiany poszczególnych elementów	Piece podatne na nieszczelności oraz zanieczyszczenia stopów. Trudna konserwacja i naprawa wymagająca czasami opróżnienia pieca ze stopu	System podatny na nieszczelności. Wysoki stopień skomplikowania.

2.3 Stopy aluminium w odlewnictwie ciśnieniowym. Przygotowanie i wpływ składników stopu.

Aluminium jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków w skorupie ziemskiej. Jest obecnie drugim pierwiastkiem po żelazie najczęściej stosowanym w technice. Zaliczane jest do grupy metali lekkich, jego gęstość wynosi $2,7 \text{ g/cm}^3$, nie posiada odmian alotropowych, krystalizuje w strukturze regularnej ściennie centrowanej cF4 (A1), a temperatura topnienia wynosi $660 \text{ }^\circ\text{C}$ [11, 62].

Stopy aluminium należą do intensywnie badanej i szeroko stosowanej grupy materiałów metalicznych. Charakteryzują się dużą wytrzymałością właściwą. Wytrzymałość właściwa stopów aluminium jest większa niż stali i dlatego materiały te stosowane są wszędzie tam, gdzie potrzebna jest określona wytrzymałość konstrukcji przy możliwie małej masie Ponadto stopy aluminium

wykazują wiele użytecznych cech takich jak dobre przewodnictwo elektryczne i ciepłne, łatwa formowalność i obrabialność. Brak temperatury przejścia w stan kruchy, umożliwiającą stosowanie tych stopów w niskiej temperaturze. Jednym z dodatkowych atutów aluminium i jego stopów jest łatwość recyklingu złomu aluminiowego [63].

Głównymi dodatkami wprowadzanymi do stopów aluminium są miedź, mangan, krzem, magnez i cynk; rzadziej stosuje się srebro i lit. Niekiedy pierwiastki takie jak chrom, cyrkon, czy ostatnio skand, dodaje się do aluminium jako mikrododatki stopowe, gdyż te pierwiastki tworzą dyspersyjne trudno rozpuszczalne fazy międzymetaliczne.

Składy chemiczne poszczególnych grup stopów oraz zakładane właściwości mechaniczne odlewów zostały zawarte w Normie PN-EN 1706, zatwierdzonej w 2020 roku. W normie rozróżnia się 5 różnych technologii odlewania stopów aluminium, w tym odlewanie ciśnieniowe [64].

2.3.1 Stopy aluminium w odlewnictwie ciśnieniowym

W Normie PN-EN 1706, wyróżnionych jest 12 grup stopów, ale tylko 9 z nich jest stosowanych w odlewnictwie ciśnieniowym – Tab. 3.

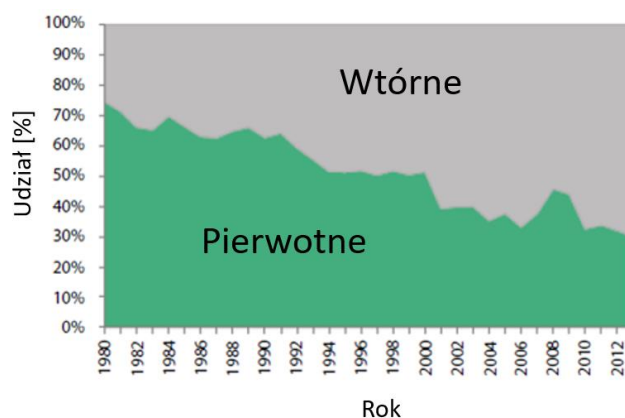
Tab. 3. Stopy aluminium w odlewnictwie ciśnieniowym wraz ich oznaczeniami wg normy PN-EN 1706 [64].

Grupa	Oznaczenie numeryczne	Oznaczenie chemiczne
<u>AlSi7Mg</u>	EN AC – 42400	EN AC-Al Si7MnMg
<u>AlSi10Mg</u>	EN AC – 43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)
	EN AC – 43500	EN AC-Al Si10MnMg
<u>AlSi</u>	EN AC – 44300	EN AC-Al Si12(Fe)
	EN AC – 44400	EN AC-Al Si9
	EN AC – 44500	EN AC-Al Si12(Fe)
	EN AC – 44600	EN AC-Al Si10Mn
<u>AlSi9Cu</u>	EN AC – 46000	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)
	EN AC – 46100	EN AC-Al Si11Cu2(Fe)
	EN AC – 46500	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)(Zn)
<u>AlSi(Cu)</u>	EN AC – 47100	EN AC-Al Si12Cu1(Fe)
	EN AC – 47200	EN AC-Al Si12(Fe)
<u>AlSiCuMg</u>	EN AC – 48000	EN AC-Al Si12CuMgNi
	EN AC – 48100	EN AC-Al Si17Cu4Mg
	EN AC – 48200	EN AC-Al Si15Cu3MgFe
<u>AlMg</u>	EN AC – 51200	EN AC-Al Mg9
	EN AC – 51500	EN AC-Al Mg5Si2Mn
<u>AlZnSiMg</u>	EN AC – 71100	EN AC-Al Zn10Si8Mg

2.3.2 Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe)

Jednymi z najbardziej rozpowszechnionych stopów aluminium w odlewnictwie ciśnieniowym w branży motoryzacyjnej są stopy z grupy AlSi9Cu. Wynika to z ich bardzo dobrych właściwości odlewniczych oraz wysokiej wytrzymałości, łatwości eksploataowania, dostępności oraz ekonomiczności [65].

W przemyśle wykorzystywane są stopy pierwotne oraz wtórne (stopy z recyklingu) – Rys. 19. Stopy z recyklingu wymagają około 5% energii wytworzenia względem stopów pierwotnych. Udział stopów wtórych w ogólnej produkcji stopów aluminium systematycznie się zwiększa [49, 66].



Rys. 19. Udział stopów pierwotnych i wtórych na przestrzeni lat 1980-2012 [49].

Skład chemiczny stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) zamieszczony w normie PN-EN 1706 zawiera nie tylko pierwiastki główne (stopowe), ale również pierwiastki modyfikujące i rafinujących strukturę tj. Na, Sr, Sb i P oraz zanieczyszczenia tj. Pb, Sn, Ni – Tab. 4. Właściwości wytrzymałościowe stopu przedstawione zostały w Tab. 5.

Tab. 4. Skład chemiczny (%_{mas.}) stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) wg normy PN-EN 1706 [64].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
8,0-11,0	1,3 (0,6-1,1)	2,0-4,0	0,55	0,05-0,55 (0,15-0,55)	0,15	0,55
Zn	Pb	Sn	Ti	Inne – poj.	Inne - razem	Al
1,2	0,29	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	reszta

Tab. 5. Właściwości wytrzymałościowe stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) wg normy PN-EN 1706 [64].

Stan stopu	R _m [MPa] min.	R _{p0,2} [MPa] min.	A [%] min.	Twardość – [HBW] min.
F (bez obróbki cieplnej)	240	140	<1	80
T5 (starzenie sztuczne)	240	165	<1	85

2.3.3 Rola i wpływ pierwiastków w stopie EN AC-Al Si9Cu3(Fe)

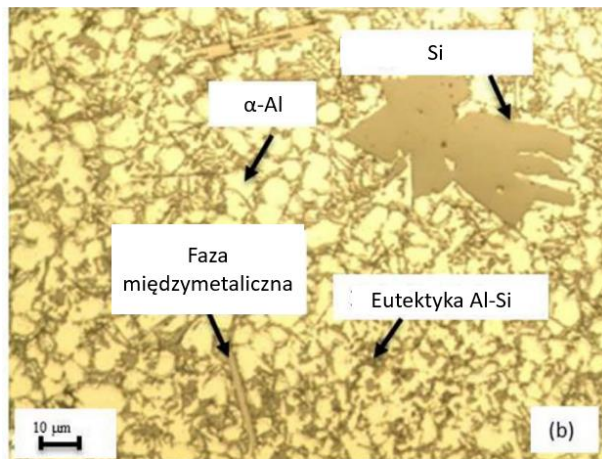
Wpływ pierwiastków stopowych na właściwości stopu AlSi9Cu3(Fe) przedstawiono w Tab. 6.

Tab. 6. Wpływ pierwiastków stopowych w stopie na właściwości stopu AlSi9Cu3(Fe).

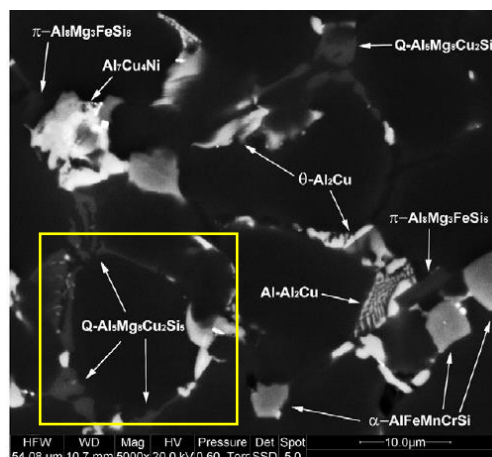
Pierwiastek	Rola i wpływ
Krzem	Zapewnia dobrą lejność stopu, zwiększa odporność na pękanie na gorąco oraz obniża ryzyko powstawania porowatości skurczowej w czasie krzepnięcia. Zwiększa twardość stopu kosztem jego plastyczności. Zwiększa odporność na ścieranie [49, 67]
Żelazo	Żelazo jest dodawane do odlewanych ciśnieniowo stopów Al, aby ułatwić uwalnianie odlewu z matrycy i zapobiec zjawisku solderingu. Razem z Cr oraz Mn może tworzyć szkodliwe, kruche fazy obniżające właściwości mechaniczne. Przyspiesza procesy erozji formy [37, 49, 50]
Miedź	Zwiększa wytrzymałość stopu, zwłaszcza po obróbce cieplnej. Wykazuje dużą rozpuszczalność w aluminium tworząc roztwór stały. Zwiększa korozyjność stopu, zmniejsza spawalność, wydłużenie oraz skurcz odlewniczy [37, 67]
Mangan	Podobnie jak Fe zmniejszą podatność stopu na „klejenie” formy. Mangan jest dodawany w celu kontrolowania morfologii faz bogatych w Fe i sprzyja tworzenie fazy α -Fe o mniej szkodliwej morfologii. Stosunek Mn/Fe określa ryzyko powstawanie szkodliwych faz mogących obniżyć właściwości mechaniczne [37, 49, 50]
Magnez	Zwiększa wytrzymałość stopu, w wyniku wydzielania fazy Mg ₂ Si. Zmniejsza wydłużenie stopu [49, 67].
Chrom	Dodawany w niewielkich ilościach może niwelować negatywny wpływ Fe, podobnie jak Mn i nieznacznie zwiększać właściwości wytrzymałościowe stopu [37, 49].
Nikiel	Może podwyższyć wytrzymałość i twardość, zwiększa odporność korozyjną. Jednakże może razem z Fe może powodować zwiększenie ilości powstawania niebezpiecznych faz międzymetalicznych i obniżyć wytrzymałość stopu. [49, 67].
Cynk	Zwiększa wytrzymałość odlewów i podwyższa skłonność stopu do utwardzenia wydzieleniowego [67].
Ołów, Cyna	Pierwiastki niskotopliwe o wysokiej gęstości, będące zanieczyszczeniami w stopie. Nie tworzą faz, ale występują jako osobne cząsteczki. W objętości odlewu nie są jednorodnie rozłożone co, powoduje niejednorodność właściwości mechanicznych i ich obniżenie. Ołów i Cyna poprawiają skrawalność i lejność. Cyna może zwiększyć efekt umocnienia wydzieleniowego. [49, 67, 68].
Tytan	Wykorzystywany jest głównie do rozdrobnienia ziarna stopu i zwiększenia właściwości wytrzymałościowych. Jednak przy dużych szybkościach chłodzenia w odlewnictwie ciśnieniowym, efekt rozdrobnienia jest niewielki [49]
Sr, Na	Pełnią funkcje modyfikatorów, zmieniając morfologię wydzieleni krzemu i powodując wzrost właściwości mechanicznych. Niestety pierwiastki te zwiększają również tendencję stopu do utleniania, co może powodować zwiększenie porowatości gazowej w stopie i obniżanie właściwości mechanicznych [69]

2.3.4 Mikrostruktura stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) odlewu ciśnieniowego

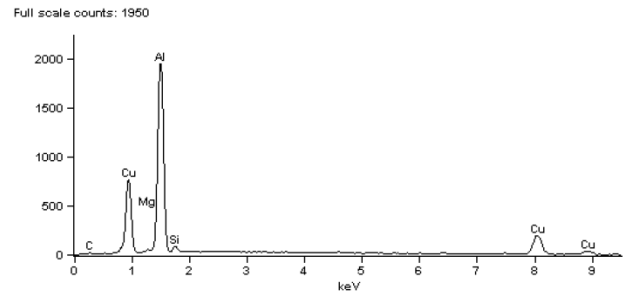
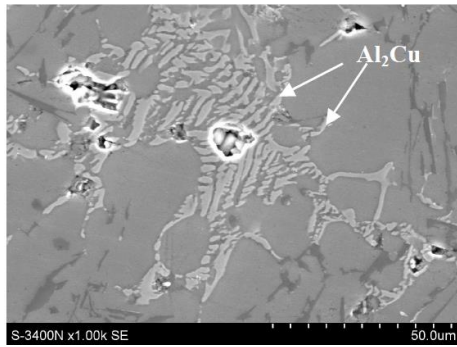
W literaturze mikrostruktura stopu AlSi9Cu3(Fe) po odlewaniu ciśnieniowym jest szeroko opisana. Na Rys. 20 przedstawiono przykładową mikrostrukturę stopu po odlewaniu ciśnieniowym. Składa się ona dendrytów roztworu stałego $\alpha(\text{Al})$, eutektyki $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$ oraz faz międzymetalicznych. Z powodu wysokich szybkości chłodzenia w czasie krzepnięcia, składniki struktury odlewów ciśnieniowych są znacznie drobniejsze niż w przypadku odlewów z form piaskowych. Ze względu na zawartość różnych pierwiastków i warunków krystalizacji, powstają fazy międzymetaliczne o zróżnicowanej morfologii. Najczęściej w stopie AlSi9Cu3(Fe) występują fazy: $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ (Rys. 22), $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_5$ (Rys. 21), $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ (Rys. 23), oraz $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ (Rys. 24) [67, 69, 71].



Rys. 20. Mikrostruktura stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) odlewu ciśnieniowego [67].



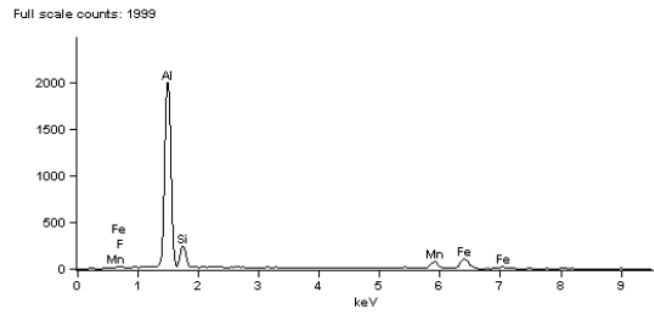
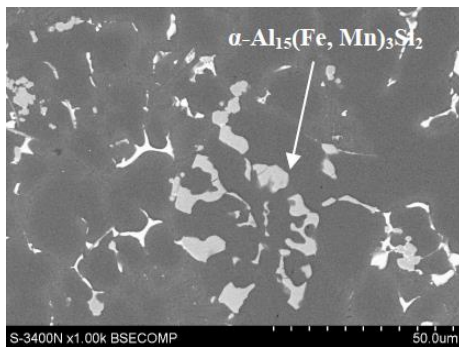
Rys. 21. Wydzielenia fazy $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_5$ w stopie, a) SEM i b) EDS [71].



a)

b)

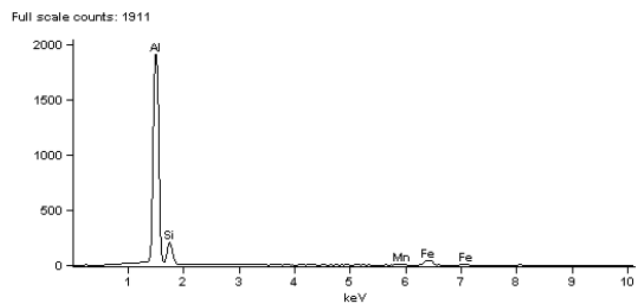
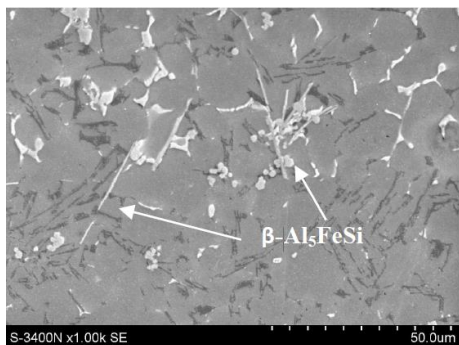
Rys. 22. Wydzielenia fazy Al_2Cu w stopie, a) SEM i b) EDS [69].



a)

b)

Rys. 23. Wydzielenia fazy $\alpha-Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ w stopie, a) SEM i b) EDS [69].



Rys. 24. Wydzielenia fazy $\beta-Al_5FeSi$ w stopie, a) SEM i b) EDS [69].

3 Geneza problemu

Firma NemaK Polska jest producentem odlewanych elementów konstrukcyjnych dla przemysłu samochodowego: nowoczesnych bloków silników, obudów układów napędowych, komponentów pojazdów elektrycznych oraz odlewów strukturalnych. Specjalizuje się w rozwoju technologii odlewania wysokociśnieniowego (HPDC) ze stopów aluminium, osiągając czołowe miejsce w tej branży na globalną skalę (Rys. 25).

Odlewy strukturalne:

- elementy konstrukcyjne podwozia
- ramy konstrukcyjne

Odlewy ukł. napędowych:

- głowice oraz
- korpusy silników spalinowych
- obudowy skrzyń biegów

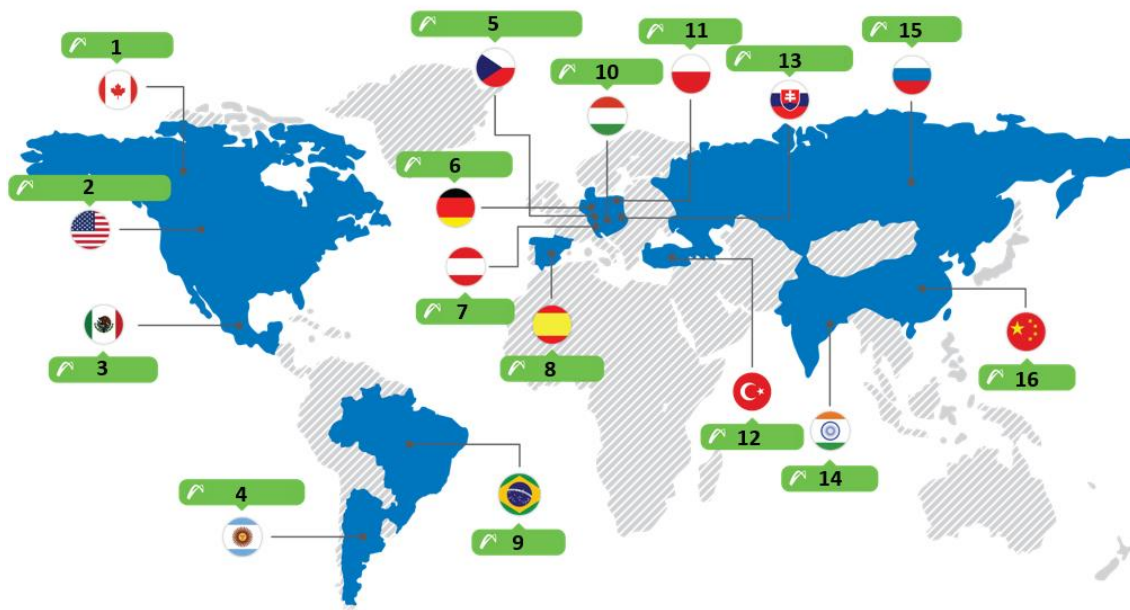


Odlewy aut elektrycznych:

- korpusy silników
- obudowy baterii

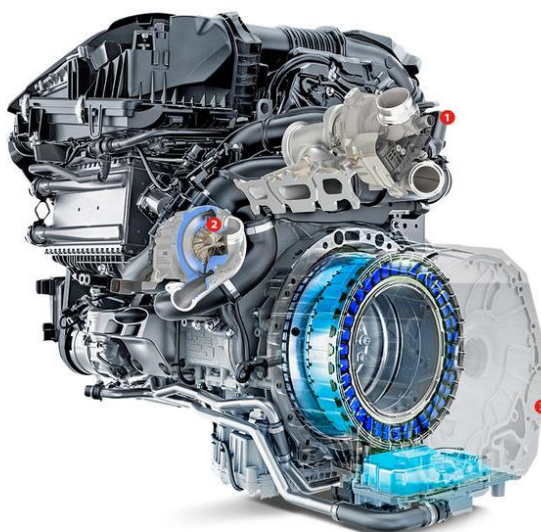
Rys. 25. Przykładowe elementy pojazdów samochodowych będące produktami firmy NemaK [72].

Biuro rozwoju procesu odlewania wysokociśnieniowego, będące częścią NemaK Polska, odpowiedzialne jest za implementację opracowanych procesów technologicznych do produkcji seryjnej w oddziałach Firmy zlokalizowanych w Europie, Azji, Ameryce Płn., czy Ameryce Płd. (Rys. 26). Firma NemaK jest strategicznym partnerem wiodących na świecie producentów pojazdów samochodowych oraz liderem w dziedzinie innowacyjnych rozwiązań dla globalnego przemysłu motoryzacyjnego.



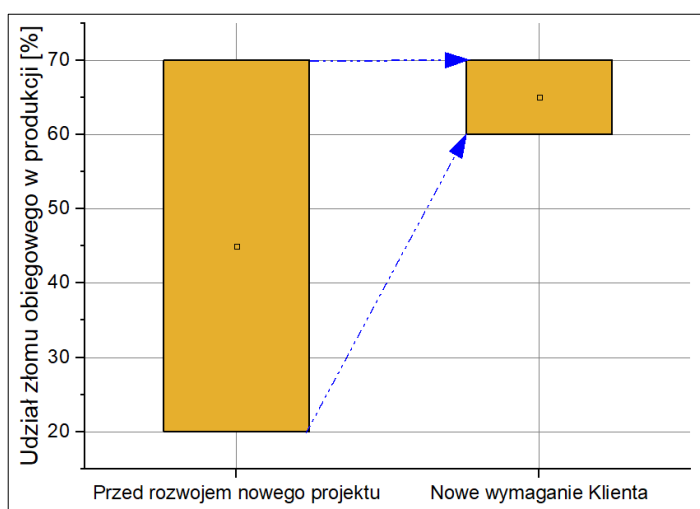
Rys. 26. Oddziały firmy Nemak w 16 krajów świata, zatrudniające ponad 23000 pracowników [73].

W ostatnich latach przedsiębiorstwo zostało wybrane przez klienta z branży motoryzacyjnej do realizacji nowego projektu. Zadaniem Nemak Polska było opracowanie procesu technologii odlewania wysokociśnieniowego oraz produkcji seryjnej obudowy korpusu (bloku) silnika spalinowego (Rys. 27). Odlew miał zostać wykonany z podeutektycznego stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)). Nowa konstrukcja była zbliżona do poprzedniej wersji produkowanej już jednostki w Firmie.

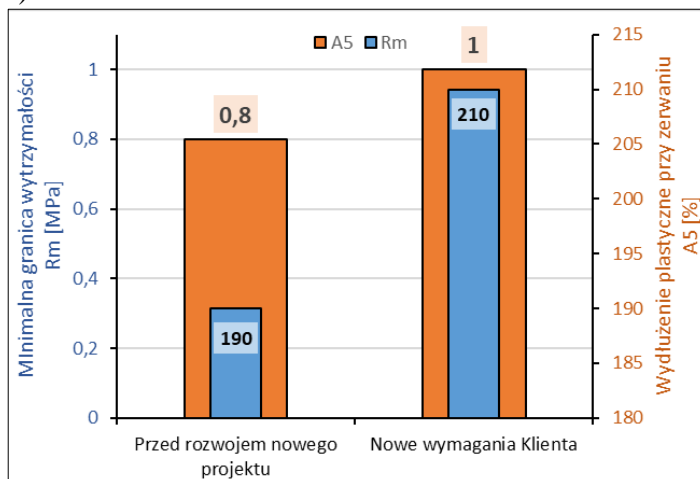


Rys. 27. Model silnika z zastosowaniem wysokociśnieniowego odlewu bloku silnika spalinowego [74].

W celu spełnienia wymagań Klienta konieczne było rozwiązanie dwóch problemów. Pierwszy problem dotyczył zwiększonego minimalnego udziału złomu obiegowego (własnego), który będzie wykorzystywany w produkcji seryjnej. Obowiązującym standardem na wydziale topialni, w tamtym okresie, był zakres 20-70%, który miał zostać ograniczony do restrykcyjnych 60-70% wg nowego kryterium Klienta (Rys. 28a). Drugi warunek dotyczył zwiększenia właściwości mechanicznych w określonych strefach odlewu wg uzgodnionej metodyki badawczej. Dotychczasowo, dla podobnych geometrii bloku silnika, minimalna wytrzymałość na rozciąganie wynosiła $R_m = 190$ MPa, natomiast minimalne wydłużenie wynosiło $A_5 = 0,8\%$. Wartości te miały zostać zwiększone do $R_m = 210$ MPa i $A_5 \geq 1\%$ (Rys. 28b).



a)



b)

Rys. 28. Wymagania klienta dla nowego bloku silnika dotyczące: a) zawartości złomu obiegowego w produkcji, b) właściwości mechanicznych odlewów wysokociśnieniowych.

Firma NemaK Polska od dłuższego czasu zakładała, że producenci pojazdów samochodowych będą kierować do niej podobne zapytania. Przewidywania opierano na publicznie ogłaszanych strategiach i wizjach biznesowych wiodących przedstawicieli przemysłu motoryzacyjnego. Zwracają oni coraz większą uwagę na ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych i zwiększeniu udziału materiału pochodzącego z recydingu w ich ogólnej produkcji. Jednocześnie, niezmiennie, najważniejszy dla nich jest końcowy użytkownik pojazdu. Z tego powodu najwięksi producenci muszą zwiększać swoją konkurencyjność cenową na rynku globalnym, dbając o coraz wyższą jakość i nowoczesność produktów. Wyższe wymagania wytrzymałościowe są związane ze zwiększeniem mocy jednostki napędowej oraz zmniejszaniem masy elementów. Wyższy udział złomu obiegowego w procesie związany jest więc głównie z kwestiami ekonomiczno-środowiskowymi.

Nowe, wyższe wymagania właściwości mechanicznych (R_m oraz A), bazując na dotychczasowym doświadczeniu, stanowiły duże wyzwanie, nawet przy założeniu braku zmiany w ilości złomu obiegowego w ciekłym stopie. Dodatkowo nie posiadano wiedzy na temat możliwego wpływu zwiększania ilości złomu obiegowego w ciekłym stopie na właściwości wytrzymałościowe. Dane dostępne w światowej literaturze, wskazują negatywny wpływ stosowania złomu na jakość produkowanego odlewu, co jeszcze utrudniało przedsięwzięcie. Skuteczne wdrożenie projektu do produkcji wymagało analizy wpływu złomu obiegowego na właściwości elementu oraz zastosowania technologii redukującej potencjalny negatywny wpływ tego czynnika. Powyższe zagadnienia stanowią główną tematykę pracy dyplomowej.

4 Analiza stanu faktycznego

4.1 Opis procesu produkcyjnego

Do produkcji odlewów wysokociśnieniowych stosowany jest podeutektyczny stop aluminium $AlSi9Cu3(Fe)$. Normy wewnętrzne ściśle określają jego skład chemiczny w stanie ciekłym (Tab. 7).

Tab. 7. Skład chemiczny stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ wg normy wewnętrznej POL-QAS-ST-0010 [%*mas.*].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Al
8.0-9.5	0.7-1.0	3.0-3.5	0.2-0.4	0.2-0.3	max. 0.1	Reszta

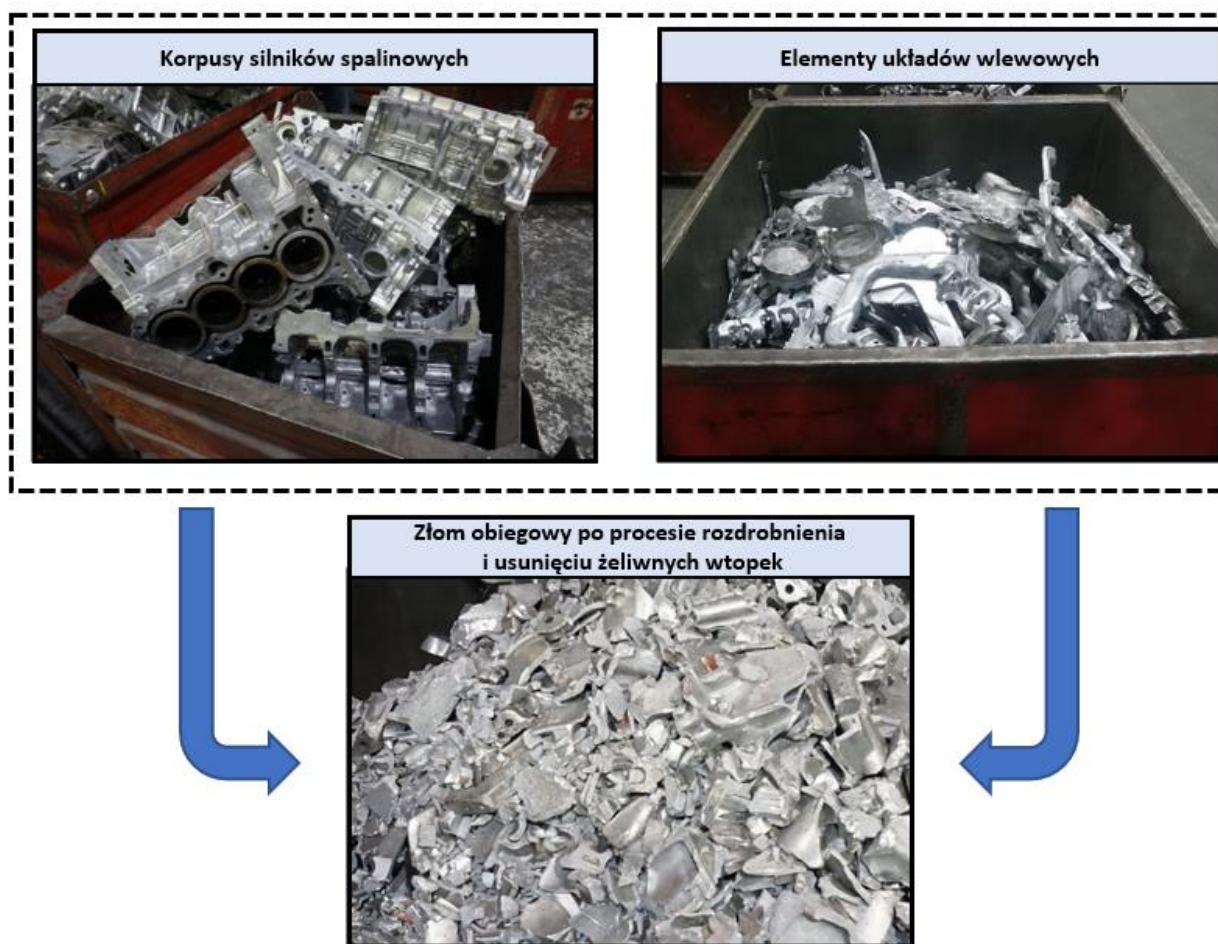
Ciekły stop $AlSi9Cu3(Fe)$ do produkcji seryjnej jest przygotowany w piecu topialnym StrikoWestofen z dwóch materiałów wejściowych: stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ dostarczanego przez dostawców zewnętrznych w stanie ciekłym (Rys. 29) oraz złomu obiegowego pochodzącego z produkcji własnej (Rys. 30). Ciekły stop wlewany jest bezpośrednio do komory podtrzymującej pieca topialnego, podczas gdy złom obiegowy topiony jest w szybie topialnym. Stopiony materiał grawitacyjnie przepływa do komory podtrzymującej.



Rys. 29. Kadzie transportowe z ciekłym stopem $AlSi9Cu3(Fe)$ dostarczonym od zewnętrznego dostawcy.

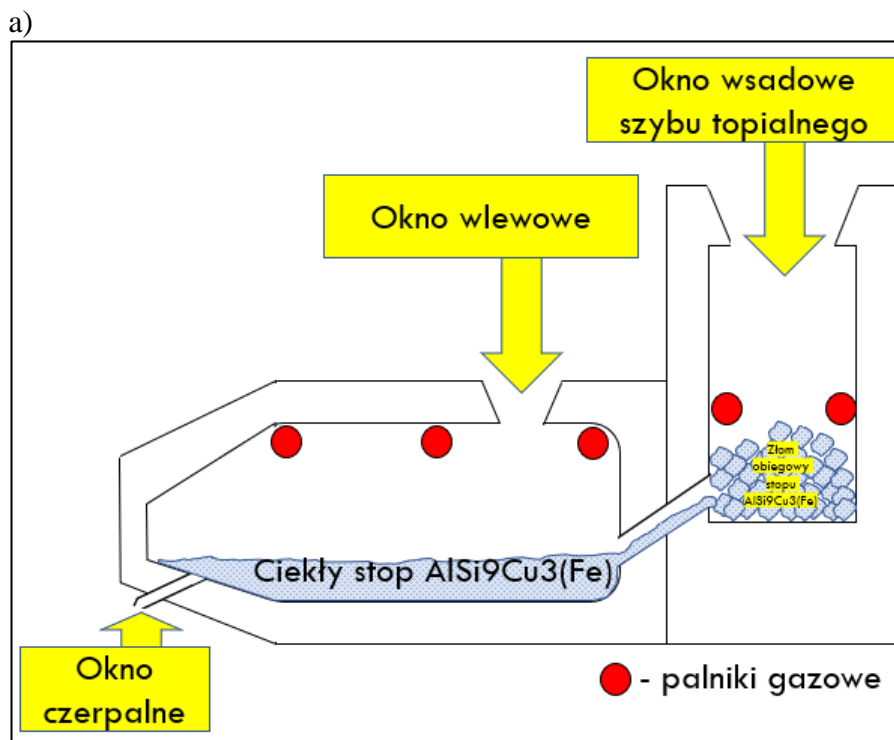
Każda dostawa ciekłego stopu jest badana pod kątem wymogów norm wewnętrznych i nie może zostać dopuszczona do produkcji bez uzyskania zgody działu kontroli jakości oraz zarządzającego pracą pieca topialnego. Kontroli podlega skład chemiczny stopu, jego temperatura oraz indeks gęstości.

Złom obiegowy składa się z odlewów wysokociśnieniowych zaklasyfikowanych jako elementy niezgodne ze specyfikacją jakościową lub jako odlewy rozruchowe. W przypadku odlewów z zalanymi żeliwnymi wkładkami elementy są kruszone, po czym żeliwo jest odseparowywane. Ponadto przetwarzane są również elementy układu technologicznego – układy wlewowe i inne grubościennie części. Przed każdym załadunkiem złom jest czyszczony i selekcionowany zgodnie z wewnętrznymi instrukcjami produkcyjnymi.



Rys. 30. Gotowy złom obiegowy po procesie rozdrobnienia i kontroli jakości.

Badania prowadzono na jednym z pięciu pieców topialnych (Rys. 31). Piec charakteryzuje się wysokim stopniem automatyzacji oraz ma możliwość rejestracji danych procesowych. Archiwizowane są informacje dot. m.in. temperatur w różnych strefach, masy stopu w komorze podtrzymującej, a także masy złomu obiegowego wprowadzanego do szybu topialnego.

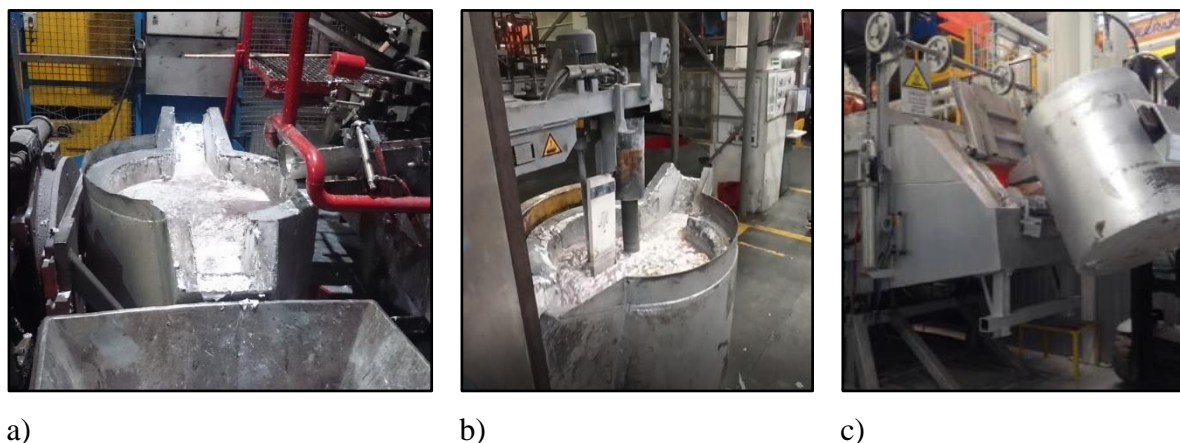


b)

Rys. 31. Schemat pieca topialnego StrikoWesthofen o pojemności 20 ton do przygotowywania ciekłego stopu AlSi9Cu3(Fe).

Złom transportowany jest do komory topialnej w pojemnikach transportowych, których masa każdorazowo jest mierzona. W zależności od masy wlewanego ciekłego stopu od dostawców dozowana jest odpowiednia ilość złomu wprowadzanego do szybu. Masa ciekłego stopu, jak i złomu obiegowego, który trafia do komory topialnej jest rejestrowana przez zintegrowany system monitorowania parametrów produkcyjnych. Kontrola udziału złomu obiegowego pozwala na przygotowanie wybranych wariantów ciekłego stopu.

Transport ciekłego stopu z pieca topialnego do pieców podgrzewczych odbywa się w dedykowanych kadziach transportowych. Metal zlewany jest z komory podtrzymującej (Rys. 32a), po czym kadź przewożona jest na stanowisko odgazowania (Rys. 32b). Proces odbywa się w ustalonych, ściśle określonych instrukcjami stanowiskowymi warunkach. Po odgazowaniu stop przelewany jest do pieca podgrzewczego maszyny odlewniczej (Rys. 32c).

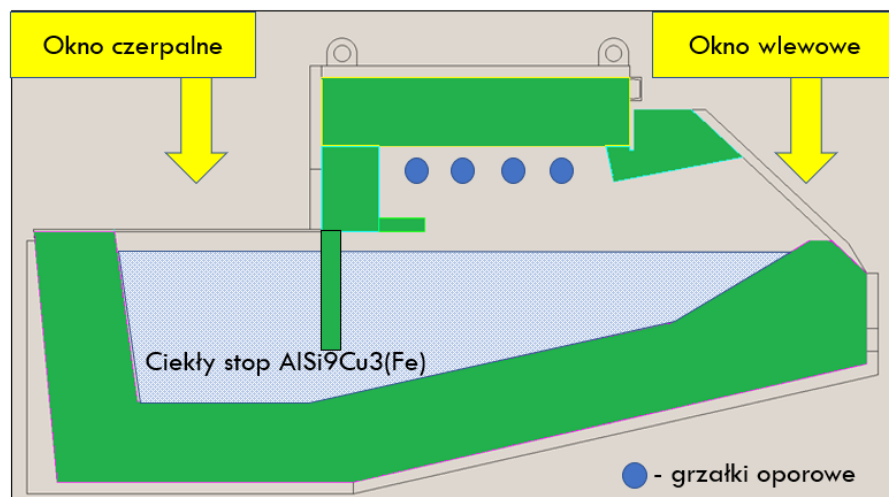


Rys. 32. Procesy pozapiecowe ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$: a) proces napelniania kadzi transportowej z kontrolą temperatury spustu stopu, b) automatyczny proces odgazowania ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ wg norm wewnętrznych, c) napelnianie pieca podgrzewczego wg procedury zakładowej.

Główną rolą pieca podgrzewczego zintegrowanego z maszyną ciśnieniową jest podtrzymanie temperatury dostarczonego we wcześniejszym etapie ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$. Widok i schemat jego budowy przedstawiono na Rys. 33. Piec posiada dwa okna technologiczne: wlewowe odpowiedzialne za lokalizację uzupełnienia ciekłego stopu w piecu oraz czerpalne, z którego system dozowania pobiera ciekły stop i transportuje go do komory strzałowej maszyny odlewniczej.



a)



b)

Rys. 33. Piec podgrzewczy: a) zintegrowany z maszyną wysokociśnieniową, b) schemat.

Piec podgrzewczy jest zintegrowany z maszyną wysokociśnieniową za pośrednictwem systemu dozowania. Dostarczenie określonej porcji ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ odbywało się do roku 2019 za pomocą automatycznej łyżki zalewowej (Rys. 30).



Rys. 34. Przykładowy system dozowania: „automatyczna łyżka zalewowa” zintegrowana z maszyną wysokociśnieniową oraz piecem podgrzewczym.

Proces napelnienia łyżki zalewowej ciekłym stopem z pieca podgrzewczego został przedstawiony na Rys. 35. Łyżka, po otrzymaniu sygnału ze strony jednostki sterującej maszyny wysokociśnieniowej, rozpoczyna ruch w stronę lustra metalu, do momentu osiągnięcia zaprogramowanej wysokości w ciekłym stopie. Z przyczyn konstrukcyjnych zanurzenie w stopie nie może być niższe niż wysokość czerpaka.



Rys. 35. Etapy pobierania ciekłego stopu przez automatyczną łyżkę zalewową z pieca podgrzewczego.

Następnie łyżka zmienia pozycję o kąt zaprogramowany w programie produkcyjnym, aby ją napęlić określoną ilością stopu. Po tym procesie łyżka jest transportowana do komory strzałowej maszyny wysokociśnieniowej, gdzie następuje wtrysk metalu do formy (Rys. 36).



Rys. 36. Pozycja łyżki zalewowej przy komorze strzałowej maszyny wysokociśnieniowej.

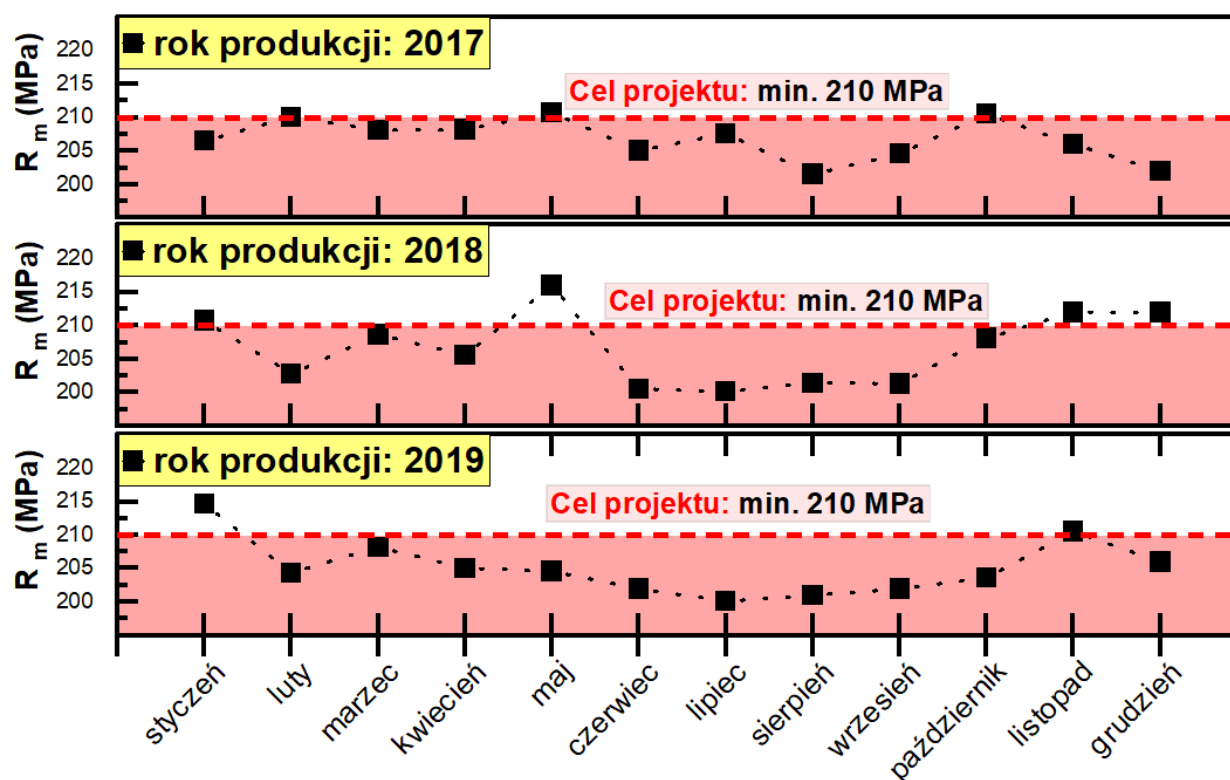
Jakość ciekłego stopu jest monitorowana i ściśle kontrolowana, przed i w trakcie produkcji. Uruchomiana maszyna wysokociśnieniowa o sile zwarcia 2500 ton (Rys. 37), rozpoczyna cykl produkcyjny wg ustalonych parametrów procesowych nadzorowanych w czasie rzeczywistym przez system kontroli urządzenia, inżyniera procesu oraz operatora maszyny.



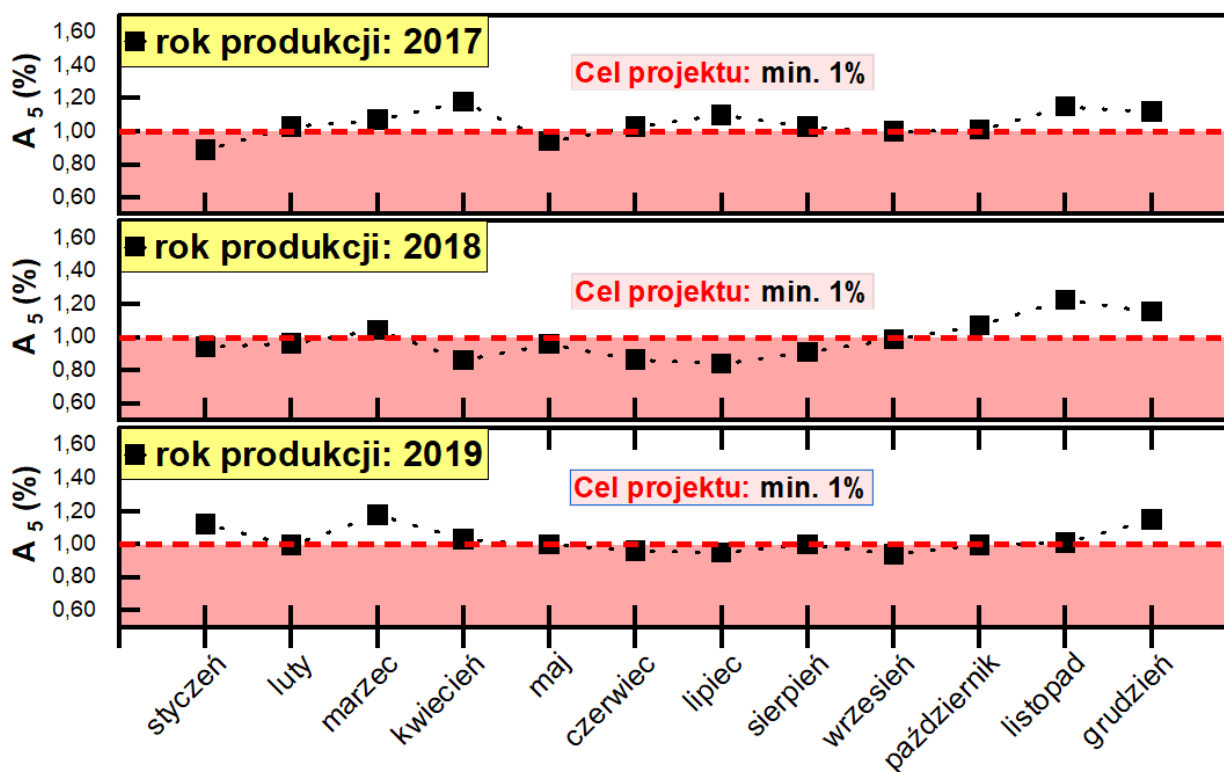
Rys. 37. Maszyna wysokociśnieniowa o sile zwarcia 2500 ton dedykowana do produkcji seryjnej korpusów silników spalinowych ze stopu $AlSi9Cu3(Fe)$.

4.2 Analiza danych jakościowych

W celu określenia możliwości spełnienia przyszłych wymagań przeprowadzono analizę stanu faktycznego procesu produkcyjnego. Zaawansowany system kontroli i rejestracji wyników jakościowych wdrożony w Nemark Polska pozwala na zestawienie wybranych aktualnych i archiwalnych właściwości wytrzymałościowych. Wartości mierzone dla odlewów korpusu silnika spalinowego, o zbliżonej geometrii konstrukcyjnej z docelowego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$, przedstawiono na Rys. 38 oraz Rys. 39. Zgromadzone dane z lat 2017-2019 pokazują, że produkowane odlewy nie spełniały nowych wymagań narzuconych ze strony Klienta. Należy jednak zauważyć, że okresowo właściwości spełniały narzucone wartości. Świadczy to o technicznej wykonalności narzuconego zagadnienia. Zakresy przedstawionych wartości średnich dla wytrzymałości na rozciąganie (R_m) wynoszą 200-216 MPa, natomiast dla wydłużenia (A_5) 0,86-1.25%.



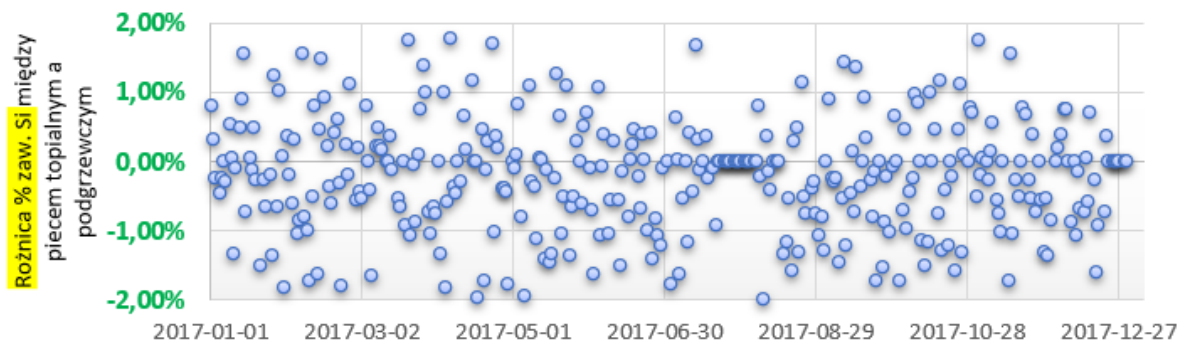
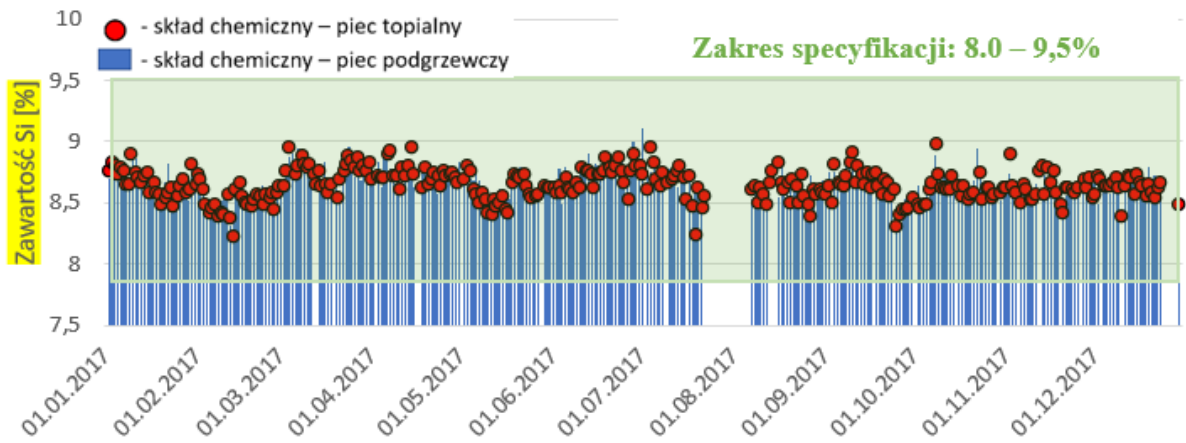
Rys. 38. Przykładowe zmiany wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa] wysokociśnieniowych odlewów korpusów silników spalinowych ze stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ w ciągu 12 miesięcy seryjnej produkcji dla lat 2017, 2018, 2019.



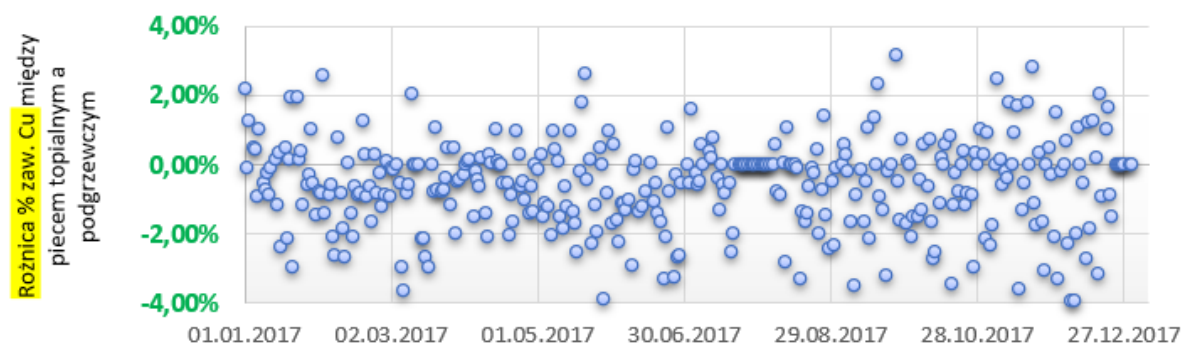
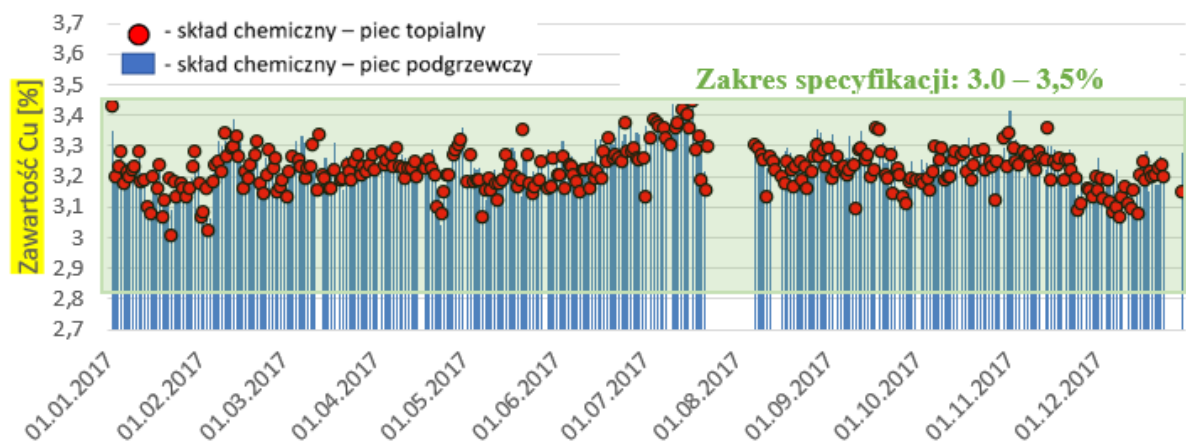
Rys. 39. Przykładowe zmiany wydłużenia A_5 [%] wysokociśnieniowych odlewów korpusów silników spalinowych ze stopu $AlSi_9Cu_3(Fe)$ w ciągu 12 miesięcy seryjnej produkcji dla lat 2017, 2018, 2019.

Skład chemiczny ciekłego stopu $AlSi_9Cu_3(Fe)$, mierzony na próbkach pobranych z pieca topialnego w roku 2017, zestawiono z wynikami analogicznych pomiarów realizowanych na próbkach pobranych z pieca podgrzewczego (Rys. 40a - Rys. 42a). Dodatek złomu obiegowego realizowany jest w piecu topialnym, natomiast do pieca podgrzewczego trafia ciekły stop po procesie rafinacji.

Mierzona zawartość składników stopowych w obu piecach, w każdym analizowanym przypadku, zgodna jest z wymaganiami dla każdego z pierwiastków. Niemniej, stwierdzono występowanie różnic pomiędzy składem chemicznym stopu w piecu topialnym oraz w piecu podgrzewczym (Rys. 40b - Rys. 42b). Względna, procentowa różnica między mierzonymi zawartościami głównych pierwiastków stopowych zawiera się w zakresie $Si \pm 2.0\%$, $Cu \pm 2.0\%$, $Fe \pm 4.0\%$, $Mn \pm 6.0\%$, $Mg \pm 6.0\%$. Największe różnice stwierdzono w przypadku zawartości ołowiu (Rys. 42b), wynoszące nawet $\pm 25.0\%$.

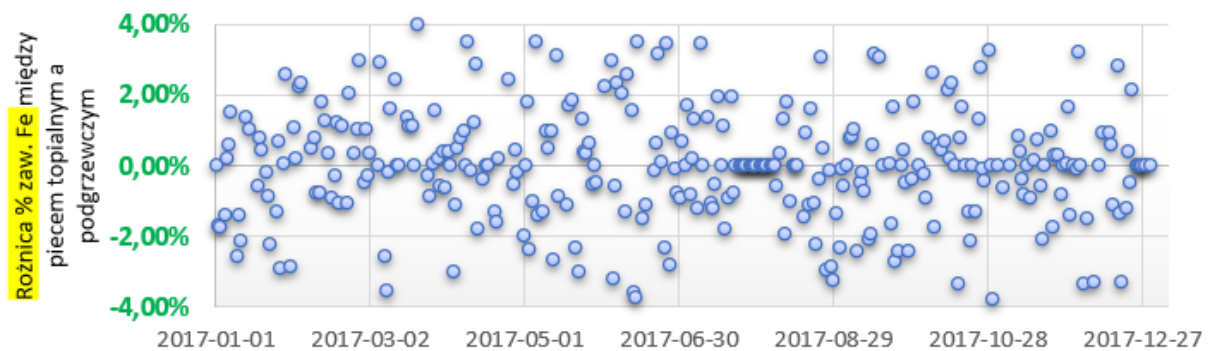
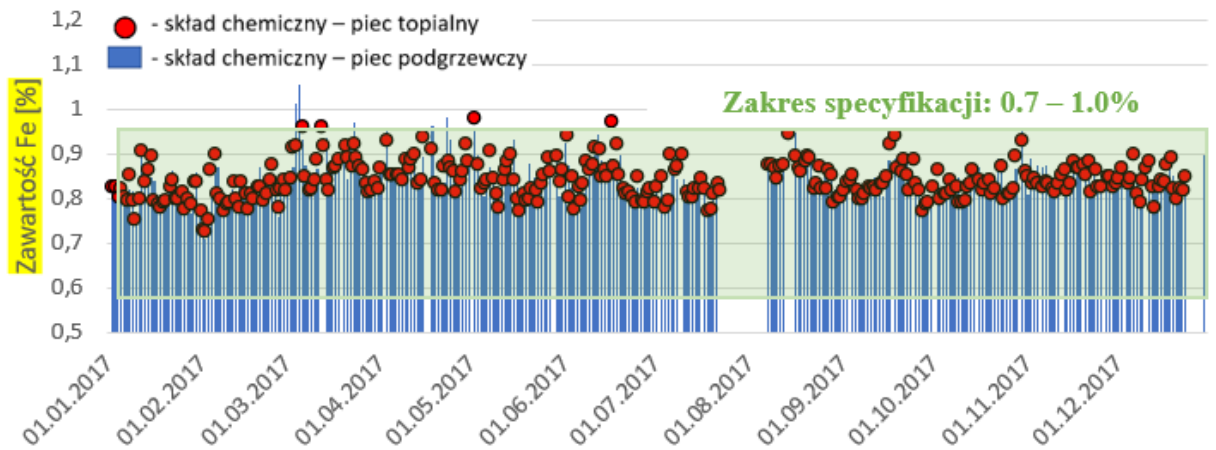


a)

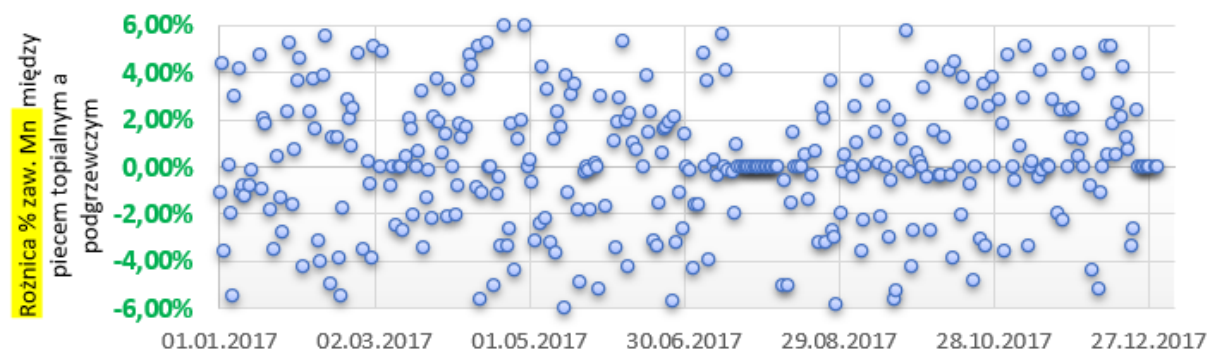
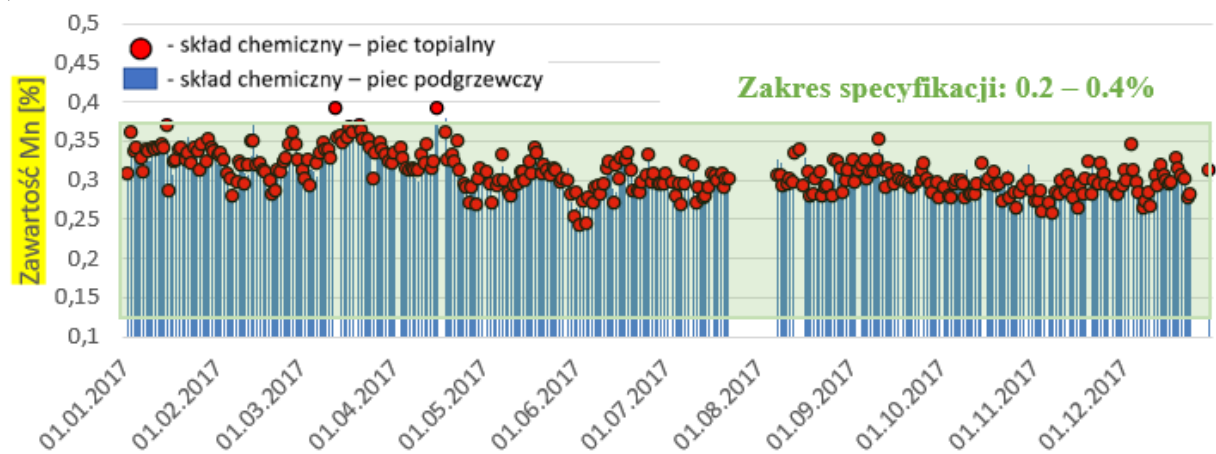


b)

Rys. 40. Zawartość wybranych pierwiastków stopowych w stopie $AlSi9Cu3(Fe)$ pobranym z pieca topialnego i podgrzewczego: a) miedź, b) krzem.

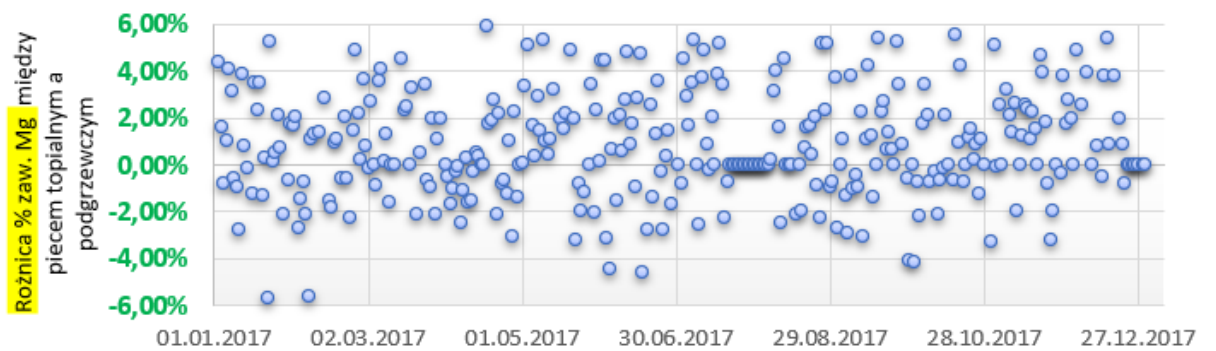
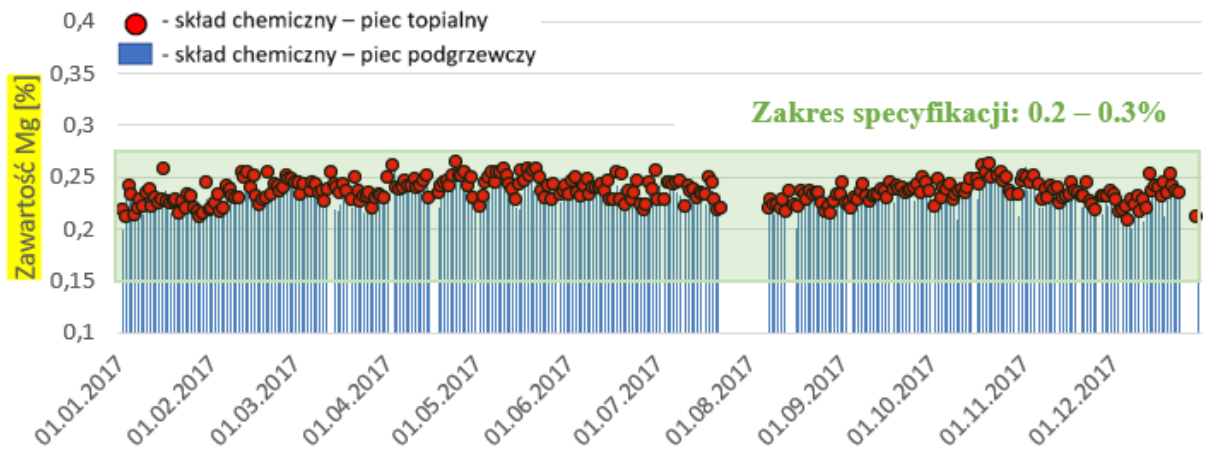


a)

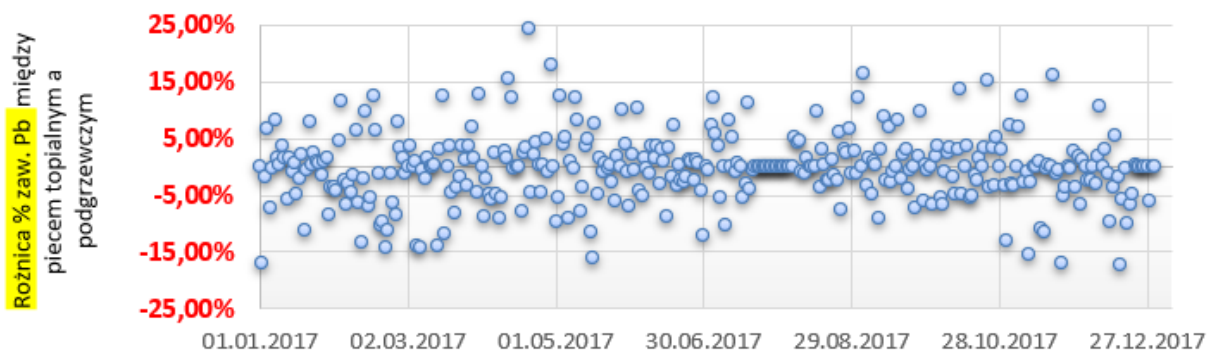
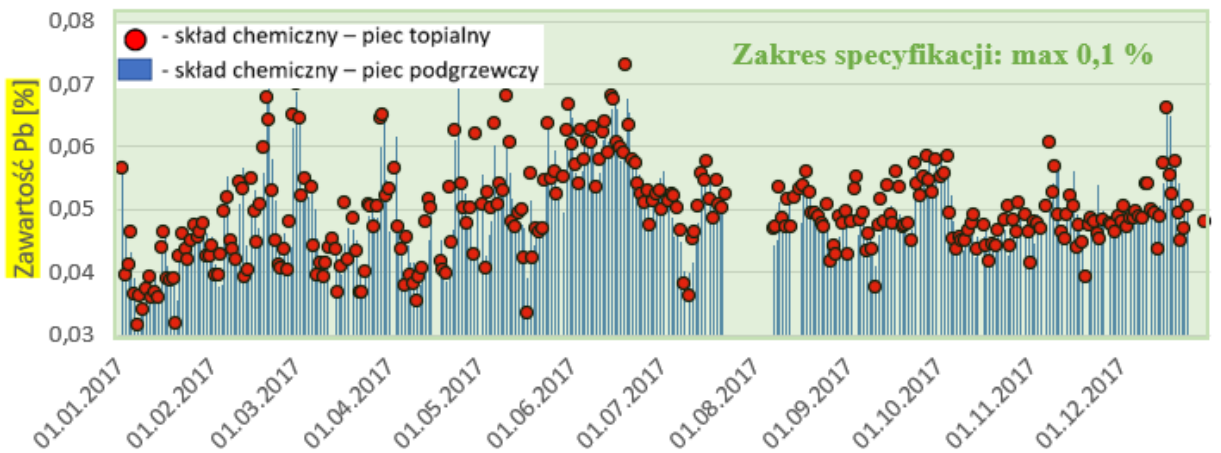


b)

Rys. 41. Zawartość wybranych pierwiastków stopowych w stopie $AlSi9Cu3(Fe)$ pobranym z pieca topialnego i podgrzewczego: a) żelazo, b) mangan.



a)

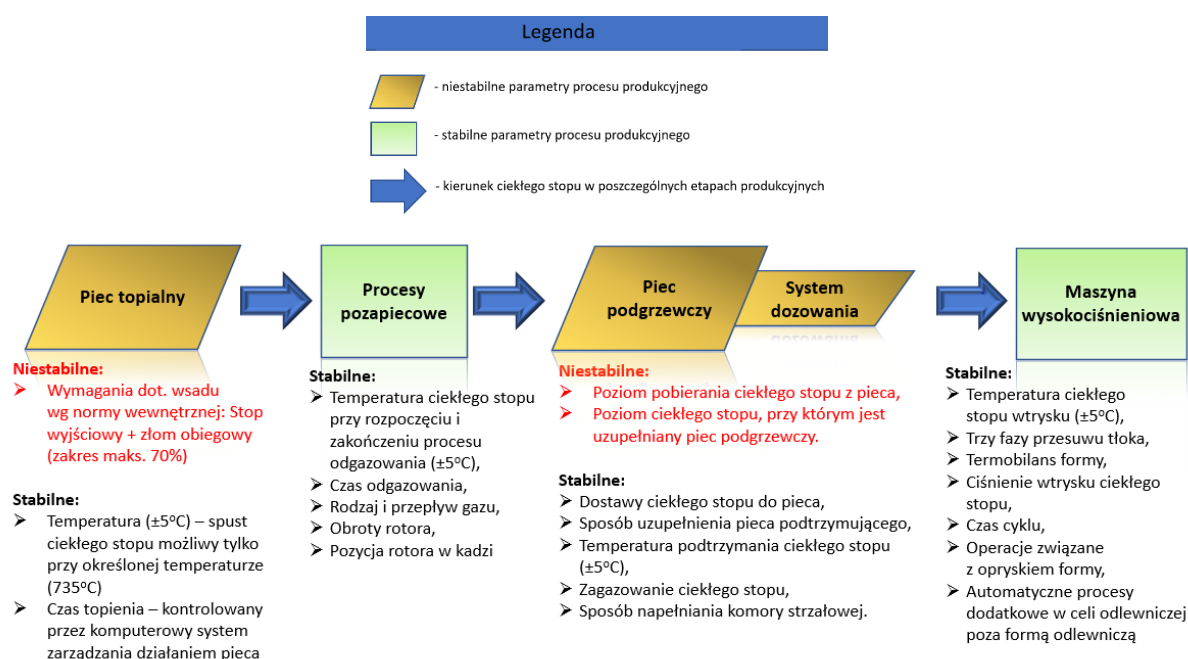


b)

Rys. 42. Zawartość wybranych pierwiastków stopowych i zanieczyszczeń w stopie $AlSi_9Cu_3(Fe)$ pobranym z pieca topialnego i podgrzewczego: a) magnez, b) ołów.

4.3 Analiza modelu produkcyjnego

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu faktycznego rejestrowanych parametrów technologicznych przepływu ciekłego stopu AlSi9Cu3(Fe) w procesie produkcyjnym, opracowano uproszczony model produkcyjny wraz ze wstępną oceną stabilności rejestrowanych parametrów na poszczególnych etapach procesu – Rys. 43. Umożliwiło to analizę ich potencjalnego wpływu na właściwości mechaniczne produkowanych odlewów wysokociśnieniowych.



Rys. 43. Uproszczony model produkcyjny opracowany na podstawie przeprowadzonej analizy stanu faktycznego przepływu ciekłego stopu AlSi9Cu3(Fe) w procesie produkcyjnym odlewów wysokociśnieniowych korpusów silników spalinowych.

Ewaluacja na podstawie modelu produkcyjnego wykazała, że próby poprawienia jakości ciekłego stopu, w tym szczególnie mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych, powinny być skupione na dwóch newralgicznych etapach produkcyjnych:

1. przygotowanie ciekłego stopu w piecu topialnym (ilość złomu obiegowego) oraz
2. sposób pobierania metalu z pieca podgrzewczego zintegrowanego z maszyną wysokociśnieniową (poziom ciekłego metalu w piecu).

Zgromadzone dane pozwoliły na określenie zakresu prac realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej. Została ona podzielona na trzy etapy: ocena wpływu złomu obiegowego na strukturę i właściwości stopu, opracowanie zmian konstrukcyjnych/technologicznych oraz eksperymenty przemysłowe.

5 Teza, cele pracy

Na podstawie przeglądu literatury, analizy stanu istniejącego oraz wyników badań wstępnych sformułowano następującą tezę pracy:

Odpowiednio dobrane parametry technologiczne ciekłego stopu AlSi9Cu3(Fe) w piecu podgrzewczym zintegrowanym z maszyną wysokociśnieniową mają istotny wpływ na strukturę i poprawę właściwości mechanicznych wysokociśnieniowych odlewów korpusów silników spalinowych.

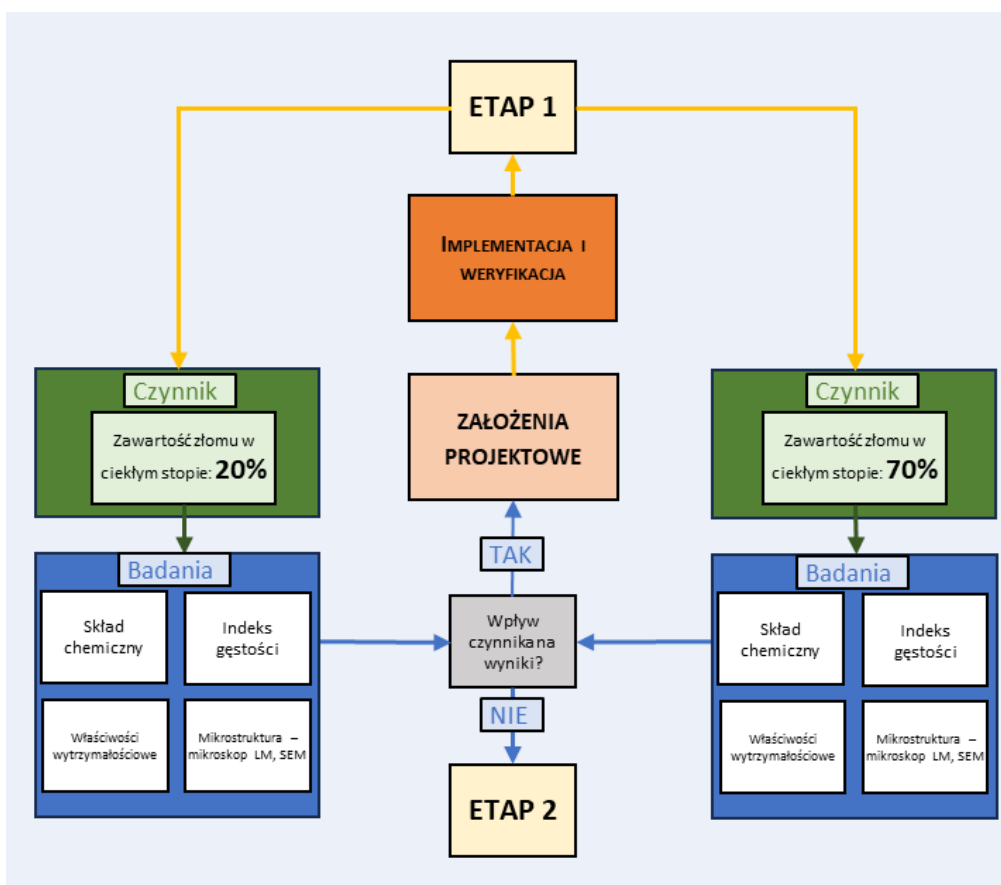
Dla udowodnienia w/w tezy przyjęto następujące cele pracy:

- Cel naukowy: określenie wpływu złomu obiegowego w ciekłym stopie (20% i 70%) na strukturę i właściwości odlewów ciśnieniowych ze stopu AlSi9Cu3(Fe).
- Cel technologiczny: określenie wpływu zmiany poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym przy maszynie odlewniczej na właściwości wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę odlewów wysokociśnieniowych.
- Cel konstrukcyjny: zastosowanie innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjno-technologicznego zwiększającego jakość odlewów poprzez redukcję wpływu ciężkich pierwiastków stopowych (głównie ołów).

6 Plan badań

Zweryfikowanie postawionej tezy pracy oraz osiągnięcie sformułowanych celów było możliwe poprzez realizację badań podzielonych na trzy etapy (Rys. 44, Rys. 45, Rys. 46). Sekwencja taka umożliwia zweryfikowanie czynników determinujących jakość odlewów oraz przeprowadzenie próby przemysłowej po wprowadzeniu opracowanych parametrów korygujących.

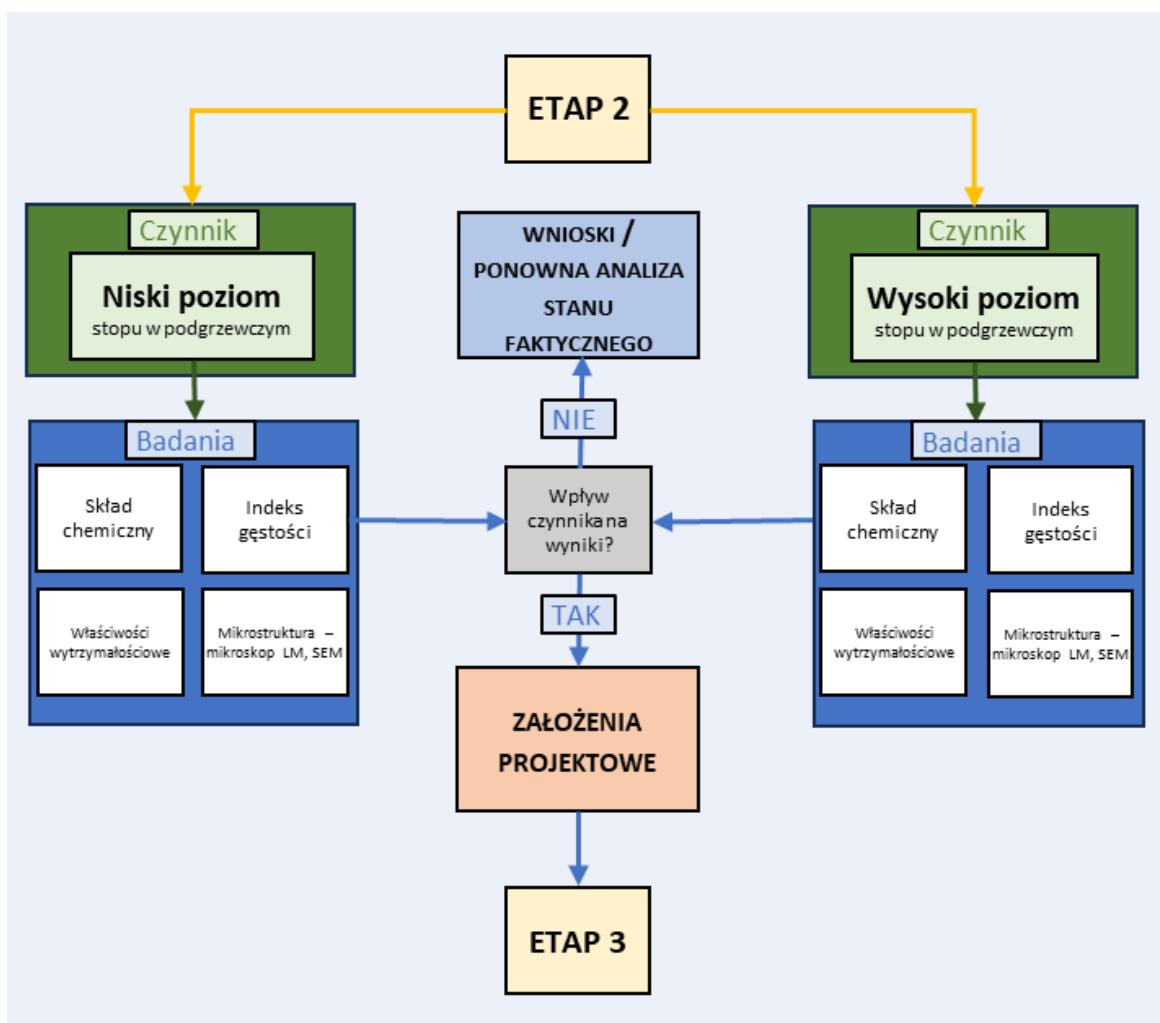
Celem pierwszego etapu (Rys. 44) była ocena wpływu skrajnych ilości złomu obiegowego w ciekłym stopie (20% i 70%) na jakość odlewów. Badania były realizowane w dwóch osobnych próbach technologicznych. Na ocenę składały się badania składu chemicznego, indeksu gęstości ciekłego stopu, statycznej próby rozciągania i badań mikrostrukturalnych prowadzonych na próbkach pobranych z odlanych elementów. Wyniki statycznej próby rozciągania odniesiono do jednego z głównych celów rozprawy – uzyskania wytrzymałości na rozciąganie $R_m = \text{min. } 210 \text{ MPa}$ oraz wydłużenia $A = \text{m.in. } 1\%$.



Rys. 44. Schemat planu badań oraz eksperymentu przemysłowego w etapie 1 skupiającym się na wpływie zawartości złomu w ciekłym stopie.

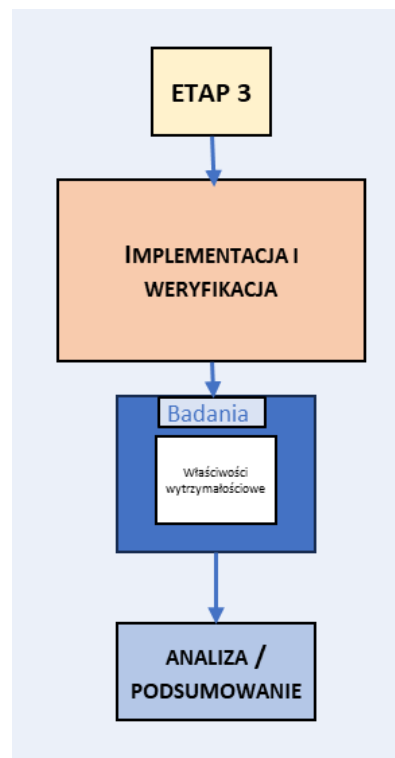
Celem drugiego etapu (Rys. 45) było określenie wpływu zmiany poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym przy maszynie odlewniczej na właściwości wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę odlewów wysokociśnieniowych. Analiza objęła badania składu chemicznego oraz indeksu gęstości ciekłego stopu w piecu podgrzewczym. Próby odlewnicze, realizowane w ramach drugiego etapu prowadzone były przy użyciu maksymalnego, narzuconego przez Klienta udziału złomu obiegowego w ciekłym stopie.

Na podstawie wyników badań uzyskanych w ramach realizacji etapu 1 i 2 zdefiniowano parametry brzegowe umożliwiające wykonanie odlewów wysokociśnieniowych ze stopu EN AC-46000 AlSi9Cu3(Fe) spełniających założone wymagania Klienta.



Rys. 45. Schemat planu badań oraz eksperymentu przemysłowego w etapie 2 skupiającym się na poziomie pobierania ciekłego stopu z pieca podgrzewczego przy maszynie wysokociśnieniowej.

Ostatni, trzeci etap przewidziany w planie badań (Rys. 46), dotyczy wdrożenia przygotowanego rozwiązania oraz jego weryfikacji w odlewaniu seryjnym. Odlewy wysokociśnieniowe przygotowano z ciekłego stopu o maksymalnym udziale złomu obiegowego w jego objętości (70%). Badania prowadzone w ramach etapu 3 obejmowały analizę składu chemicznego stopu oraz weryfikację właściwości mechanicznych wykonanych elementów.



Rys. 46. Schemat planu badań oraz końcowej oceny wdrożonego rozwiązania technologicznego w etapie 3.

7 Materiał oraz metodyka badań

Badania prowadzone były na stopie EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)) przeznaczonym dla odlewnictwa wysokociśnieniowego. Skład chemiczny stopu przedstawiony został w Tab. 7. Analizę składu chemicznego przeprowadzono na próbkach pobranych z pieca topialnego. Próbki pobierano po zakończeniu przygotowania ciekłego stopu w piecu topialnym i z pieca podgrzewczego przed rozpoczęciem procesu odlewania. Próbki zostały odlane do pogrzonej wcześniej kokili. Badania składu chemicznego wykonano na optycznym spektrometrze emisyjnym Thermo Scientific ARL 3460 Advantage. Procedura zakładowa określa pomiar jako uśredniony wynik z trzech osobnych pomiarów składu chemicznego na jednej powierzchni próbki.

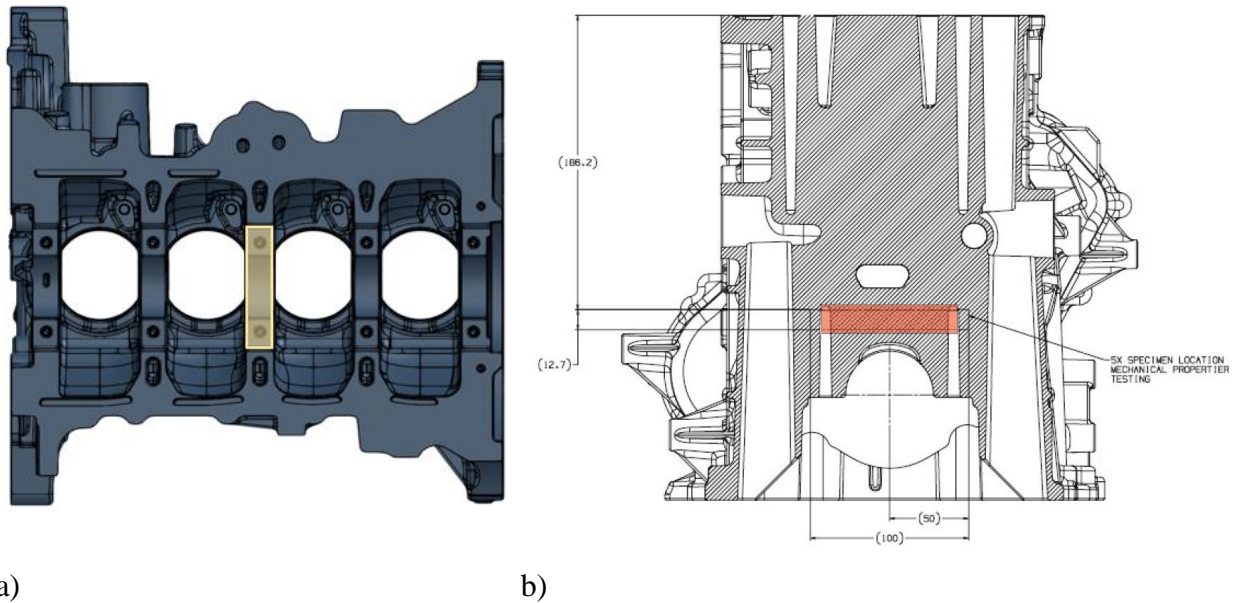
Indeks gęstości (DI) wyznaczono za pomocą mobilnej stacji MK ALSP plus. Zasada pomiaru polegała na porównaniu gęstości próbki ciekłego stopu krzepnącego przy ciśnieniu atmosferycznym oraz krzepnącego przy obniżonym ciśnieniu (80 mbar). Wymaganiem wewnętrznym Nemak Polska jest indeks gęstości na poziomie 2-2.5 %. Próbki do badań indeksu gęstości oraz składu chemicznego stopu pobierane były w tym samym czasie.

Obróbkę cieplną bloków przeprowadzono na piecu przemysłowym, typu przelotowego EKELUND model 1.562.05.132 – Rys. 47. Obróbka cieplna była wykonana zgodnie z parametrami klienta, których nie można udostępnić. Można ją sklasyfikować jako T5 i jej głównym celem jest zmniejszenie naprężeń wewnętrznych w odlewie korpusu powstałych w czasie procesu odlewania. Odlewy testowe były obrabiane w grupach po 1-5 odlewów.



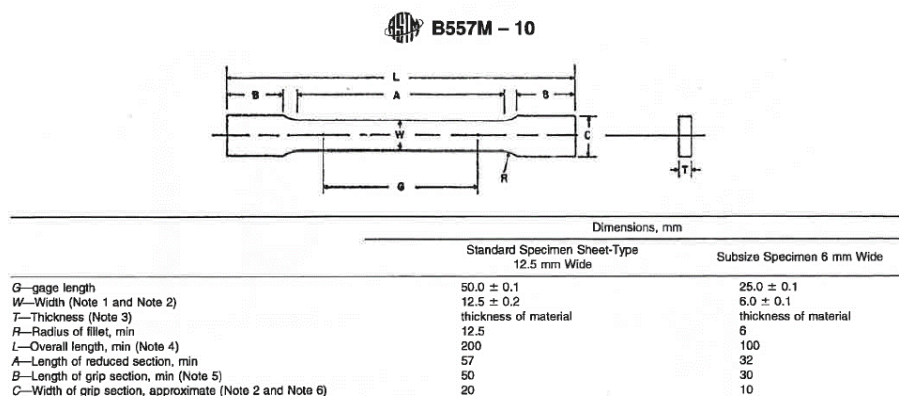
Rys. 47. Piec przelotowy Ekelund do obróbki cieplej T5 odlewów ciśnieniowych.

Badania właściwości mechanicznych oraz analizę mikrostruktury prowadzono na fragmentach wyciętych z odlewów bloku silnika spalinowego. Próbki pobrane były ze wspornika wału korbowego (Rys. 48a). Obszar ten jest standardowym miejscem badań jakości odlewów w praktyce przemysłowej. Grubość ścianki odlewu w miejscu analizy wynosi 25 mm. Próbki zostały wycięte ze środka wspornika, w równej odległości od każdej ze ścianek odlewu (Rys. 48b).



Rys. 48. Lokalizacja próbek wytrzymałościowych w korpusie bloku silnika spalinowego.

Do analizy właściwości mechanicznych wykonano próbki wytrzymałościowe o geometrii przedstawionej na Rys. 49, zgodnie z normą ASTM B557M. Dla każdego eksperymentu wykonano 5-10 próbek. Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona w temperaturze pokojowej na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z050 wg normy PN-EN ISO 6892 z zastosowaniem ekstensometru.



Rys. 49. Wymiary próbki (6mm) do statyczną próbę rozciągania zgodnie z normą ASTM B557M.

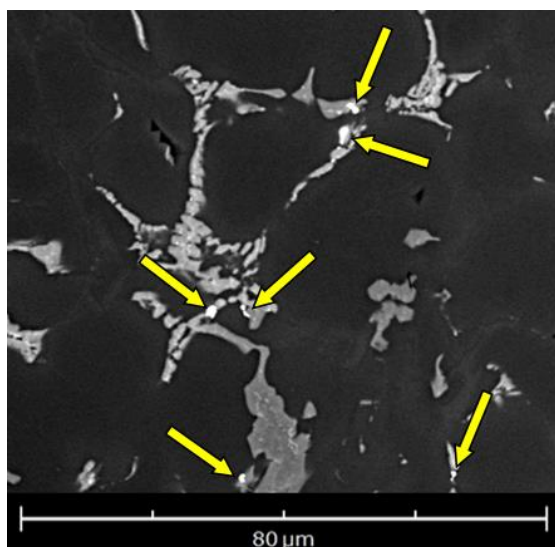
Materiał do analizy mikrostruktury pobrany został z części chwytowych próbek po statycznej próbie rozciągania. Preparatyka zgładów metalograficznych obejmowała inkludowanie w żywicy termoplastycznej, przewodzącej prąd elektryczny. Metodyka przygotowania zgładów metalograficznych obejmowała szlifowanie na papierach ściernych SiC o gradacji 120, 1200 oraz 2400, oraz polerowanie na zawieszinach diamentowych o średniej wielkości ziarna 9 μ m i 3 μ m. Polerowanie końcowe prowadzone było na zawieszinie SiO₂ o średniej wielkości ziarna 0,04 μ m.

Analiza mikrostruktury stopu prowadzona była przy pomocy mikroskopu świetlnego Olympus DSX10-SZH przy powiększeniach od 300x do 1000x w technice pola jasnego. Badania realizowano również przy pomocy skaningowej mikroskopii elektronowej (FEI Quanta 3D FEG-SEM oraz ThermoFisher Scientific Phenom XL) przy powiększeniach od 5000x do 16000x. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach prowadzona była za pomocą metody spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDXS - Apollo 40, firma EDAX).

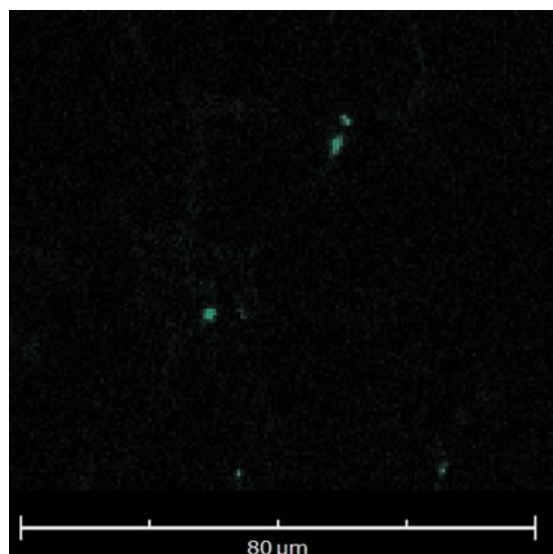
W ramach realizacji rozprawy doktorskiej przeprowadzono ilościową ocenę cząstek ołowiu. Ocena prowadzona była na obrazach zarejestrowanych przy pomocy powierzchniowej analizy EDS. Przeprowadzono 15 pomiarów na 3 próbkach dla każdego wariantu. Obrazy rejestrowane były przy powiększeniu 2000x, wykonane zostały na mikroskopie SEM ThermoFisher Scientific Phenom XL.

Analizę zarejestrowanych obrazów przeprowadzono przy użyciu oprogramowania ImageJ v1.54g.

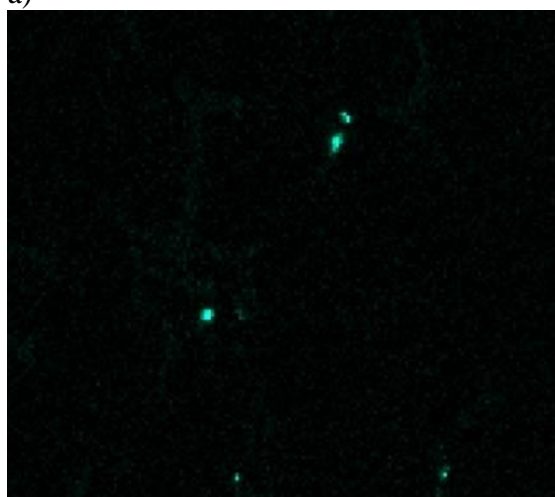
Procedura (Rys. 25) opisu ilościowej mikrostruktury rozpoczyna się od wczytania rozkładu powierzchniowego zawartości ołowiu w mikroobszarach (Rys. 50b). Po przeprowadzeniu skalowania wykonano operację zwiększenia kontrastu (Rys. 50c). Następnie przeprowadzono automatyczną detekcję obszarów zawierających Pb (Rys. 50d), bazując na algorytmie RenyiEntropy (wybranego na podstawie manualnych prób). Ostatnim etapem było wykonanie automatycznej analizy cząstek, biorąc pod uwagę ich ilość oraz udział objętościowy.



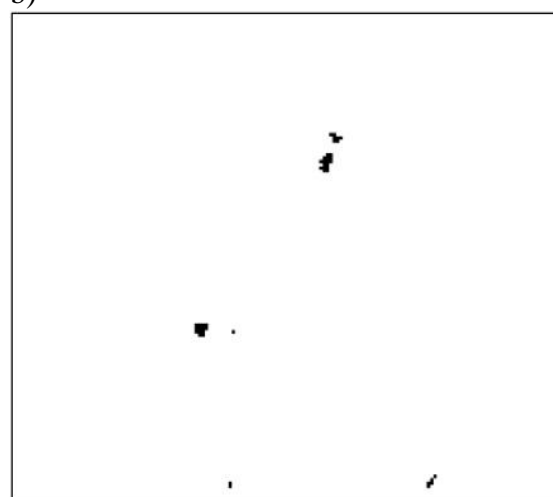
a)



b)



c)



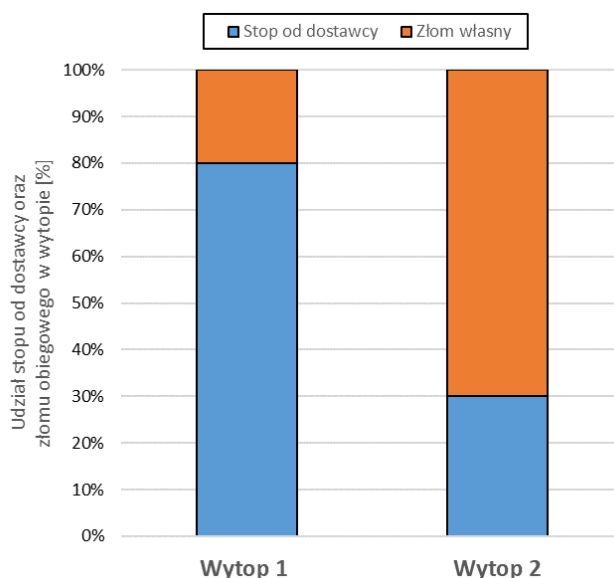
d)

Rys. 50. Przyjęta metodyka detekcji cząstek Pb w programie ImageJ v1.54g.

8 Wyniki badań i ich analiza

8.1 ETAP 1 – ocena wpływu zawartości złomu obiegowego w ciekłym stopie na jakość odlewów

Eksperymenty przemysłowe rozpoczęto od przygotowania dwóch osobnych wytopów (Rys. 51) w piecu topialnym StrikoWestofen. Masa każdego z wytopów wynosiła ~15 ton i stanowiła ~80 % pojemności pieca. Pierwszy wytop zawierał 20 % złomu obiegowego oraz 80 % ciekłego stopu dostarczonego od dostawcy. Wariant ten odpowiada minimum udziału złomu obiegowego, jakie było dopuszczone przed rozpoczęciem nowego projektu produkcyjnego. Drugi wytop zawierał 70 % złomu obiegowego, czyli maksymalny udział, jaki jest nowym wymogiem Klienta dla nowego produktu. Temperatura ciekłego stopu podczas zlewania z pieca topialnego wynosiła 750+/-5 °C. Skład chemiczny wytopów przedstawiono w Tab. 8



Rys. 51. Udział masowy złomu obiegowego w ciekłym stopie w piecu topialnym StrikoWestofen.

Tab. 8. Skład chemiczny oraz indeks gęstości stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ dla dwóch wytopów z różnym udziałem złomu obiegowego z pieca topialnego [wt.%].

Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Wytop 1 - udział złomu 20%	86,75	8,64	0,80	3,26	0,26	0,25	0,04	4,57
Wytop 2 - udział złomu 70%	86,68	8,65	0,83	3,27	0,27	0,25	0,05	5,06

Nie zaobserwowano istotnych różnic składu chemicznego pomiędzy wytopami. Indeks gęstości był o około 0,5 % wyższy w wytopie drugim i wynosił ~5 %. Oba stopy wyjściowe zostały poddane takiej samej obróbce barbotażowej wg standardowych parametrów Nemak Polska. Następnie ciekły metal został przetransportowany i wlany do wygrzanego pieca podgrzewczego przy maszynie wysokociśnieniowej. W obu próbach, po około 15 min od uzupełnienia pieca w 100 % pobrano próbkę na pomiar składu chemicznego - Tab. 9.

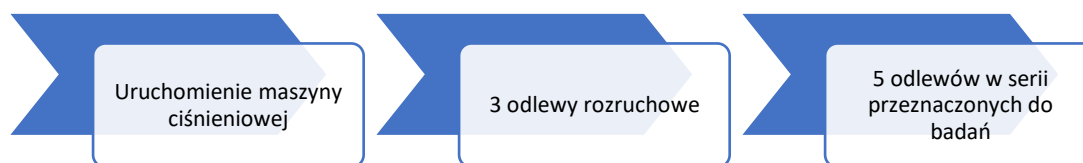
Tab. 9. Wyniki składu chemicznego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ oraz indeksu gęstości z pieca podgrzewczego dla dwóch wytopów z różnym udziałem złomu obiegowego [wt.%].

Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Wytop 1 - udział złomu 20%	86,72	8,62	0,83	3,26	0,28	0,24	0,05	2,14

Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Wytop 2 - udział złomu 70%	86,7	8,65	0,84	3,25	0,29	0,23	0,04	2,11

Podobnie jak w przypadku pieca topialnego, skład chemiczny w piecu podtrzymującym maszyny odlewniczej nie różnił się pomiędzy wytopami. Nie zaobserwowano również różnic między piecem topialnym a podgrzewczym. Indeks gęstości po obróbce barbotażowej został obniżony odpowiednio do 2,11 i 2,14 %, spełniając tym samym wymagania zakładowe.

Odlewanie realizowane było w dwóch seriach następujących bezpośrednio po sobie z zastosowaniem identycznych parametrów procesu. Do badań wykorzystano próbki z 5 odlewów wykonanych podczas stabilnego odlewania w serii, bez zatrzymywania maszyny ciśnieniowej (Rys. 52). Pierwsze odlewy badawcze pobrano każdorazowo po wykonaniu co najmniej 3 wtrysków rozruchowych. Właściwości mechaniczne odlewów przedstawiono w Tab. 10 i na Rys. 53.



Rys. 52. Procedura odlewania i pobrania odlewów przeznaczonych do badań.

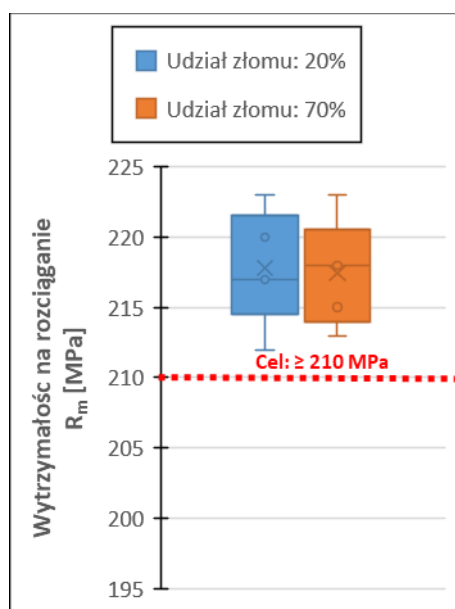
Tab. 10. Wyniki statycznej próby rozciągania dla dwóch wytopów z różnym udziałem złomu obiegowego: a) 20 i b) 70%.

Udział złomu: 20%			
Próbka	R _m [MPa]	A [%]	
1	223	1,03	
2	217	1,12	
3	217	1,14	
4	220	1,23	
5	212	1,13	
Wartość średnia		218	1,13
Wartość MIN		212	1,03
Wartość MAX		223	1,23
Odchylenie standardowe		3,7	0,06

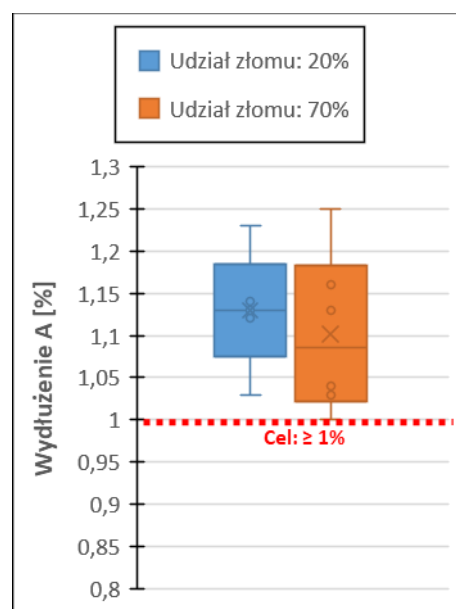
Udział złomu: 70%			
Próbka	R _m [MPa]	A [%]	
1	215	1,13	
2	213	1,16	
3	218	1,03	
4	218	1,25	
5	223	1,04	
Wartość średnia		217	1,12
Wartość MIN		213	1,03
Wartość MAX		223	1,25
Odchylenie standardowe		3,4	0,08

a)

b)



a)



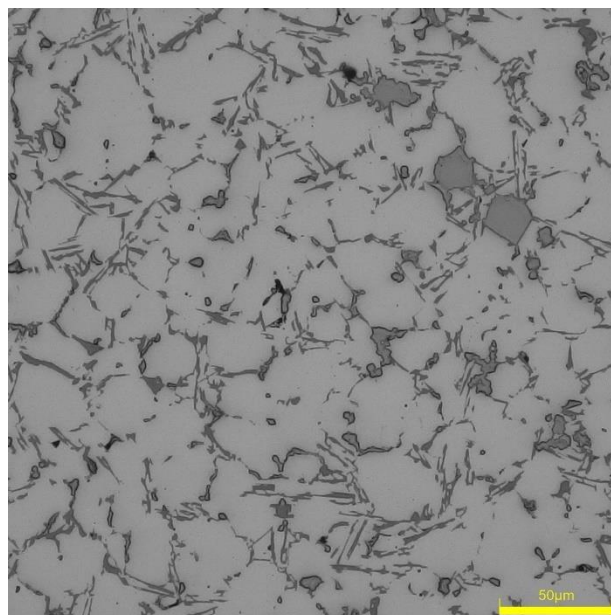
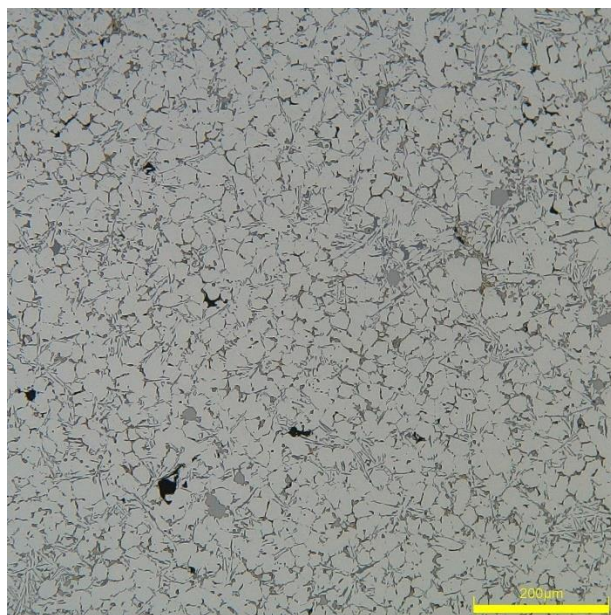
b)

Rys. 53. Wyniki statycznej próby rozciągania dla dwóch wytopów z różnym udziałem złomu obiegowego: a) R_m i b) A₅.

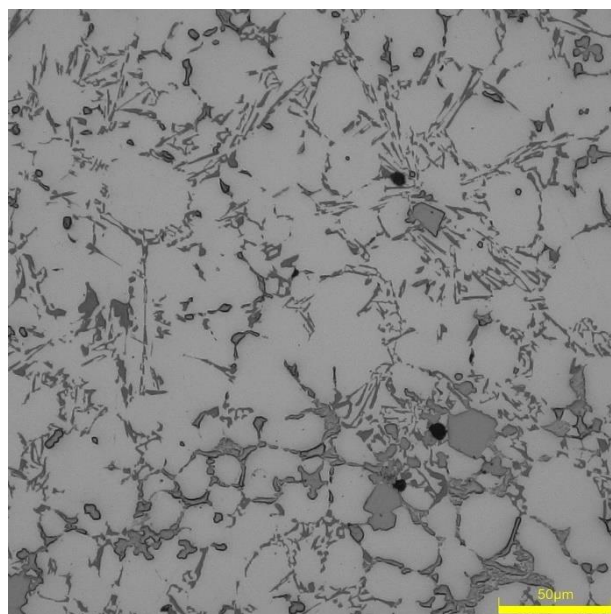
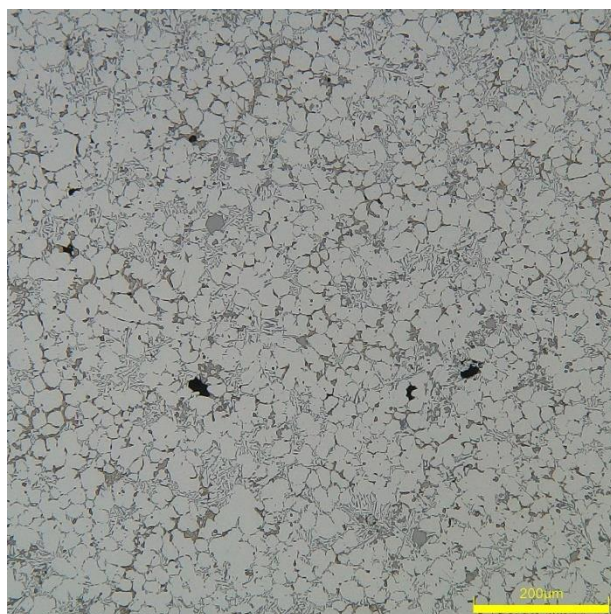
Porównując właściwości mechaniczne (R_m oraz A₅) odlewów wysokociśnieniowych z obu wytopów, nie zaobserwowano istotnych różnic. Dla wytopu z udziałem 20 % złomu obiegowego w ciekłym stopie średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wynosi R_m = 218 MPa, natomiast dla wytopu z udziałem 70 % złomu obiegowego w ciekłym stopie, średnia wartość wytrzymałości

na rozciąganie wynosi $R_m = 217$ MPa. W przypadku wydłużenia wartości średnie dla obu wytopów wynoszą odpowiednio $A_5 = 1,13$ % oraz $A_5 = 1,12$ %.

W obu analizowanych wariantach stwierdzono występowanie podobnych składników strukturalnych (Rys. 54). Mikrostruktura stopu składa się głównie z dendrytów roztworu stałego α -Al oraz mieszaniny eutektycznej α -Al+ β -Si zlokalizowanej w przestrzeniach międzydendrytycznych. Krzem eutektyczny przyjmuje morfologię płytkowych lub iglastych wydzieli, charakterystyczną dla stopów niemodyfikowanych Na lub Sr [67, 71].



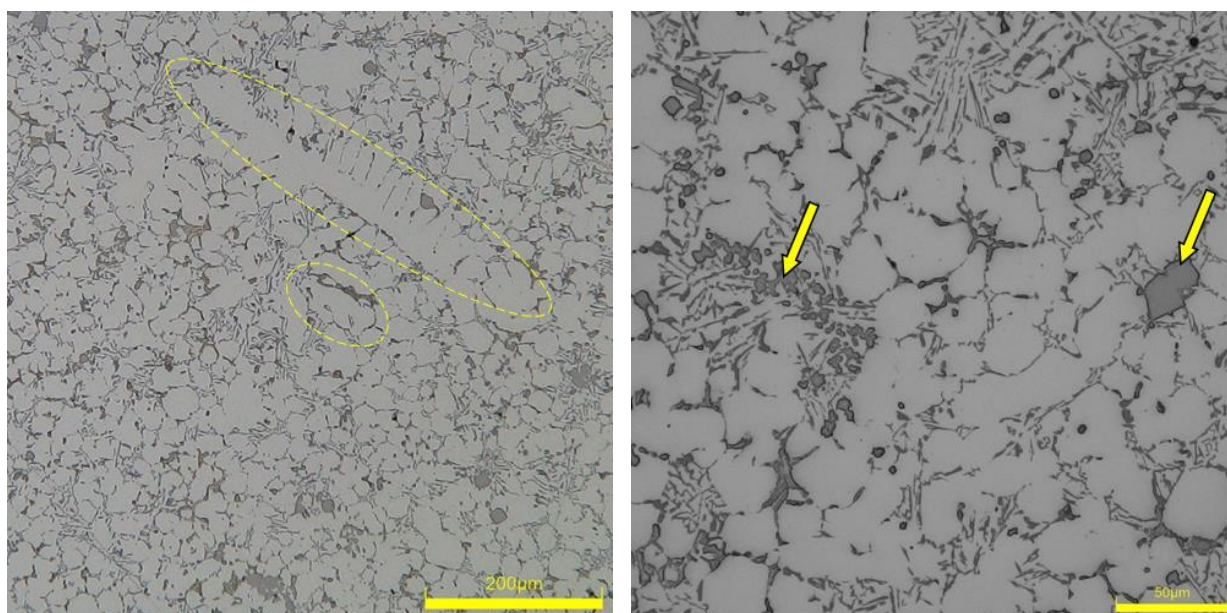
a)



b)

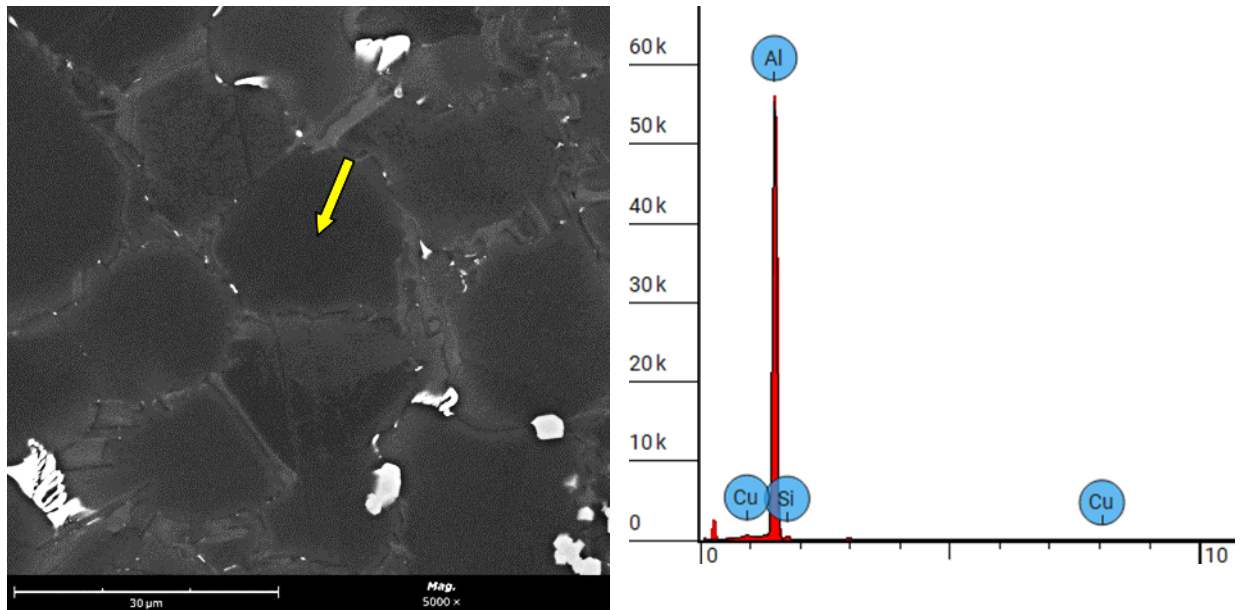
Rys. 54. Mikrostruktura stopu $AlSi_9Cu_3(Fe)$ z dodatkiem złomu obiegowego w ilości: a) 20%, b) 70%. Zgląd nietrawiony, LM.

Ponadto, w mikrostrukturze stopu AlSi9Cu3(Fe) w stanie lanym stwierdzono występowanie licznych faz międzymetalicznych o zróżnicowanej morfologii. Fazy te występują zazwyczaj w przestrzeniach międzydendrytycznych. Niektóre fazy występowały w stopie w formie zarówno mniejszych, jak i większych wydzielen. Większe fazy znacząco różnią się wielkością od otaczających je składników struktury. Świadczy to o zróżnicowanych warunkach krzepnięcia poszczególnych elementów bloku. Najczęściej spotykanymi fazami tego typu są pojedyncze dendryty roztworu stałego α -Al (Rys. 55a) oraz fazy o morfologii regularnych wieloboków/poligonów (Rys. 55b). Są to fazy pierwotne powstałe bezpośrednio w ciekłym metalu przed procesem krzepnięcia w formie (np. w komorze strzałowej lub piecu podtrzymującym). Wydzielenia te powstają w wyniku lokalnego spadku temperatury (np. przy ściance komory strzałowej) lub segregacji składu chemicznego. Mikroanaliza składu chemicznego dendrytów roztworu stałego α -Al (Rys. 56a) potwierdza obecność Al oraz niewielkie ilości Si oraz Cu [67, 69, 70].

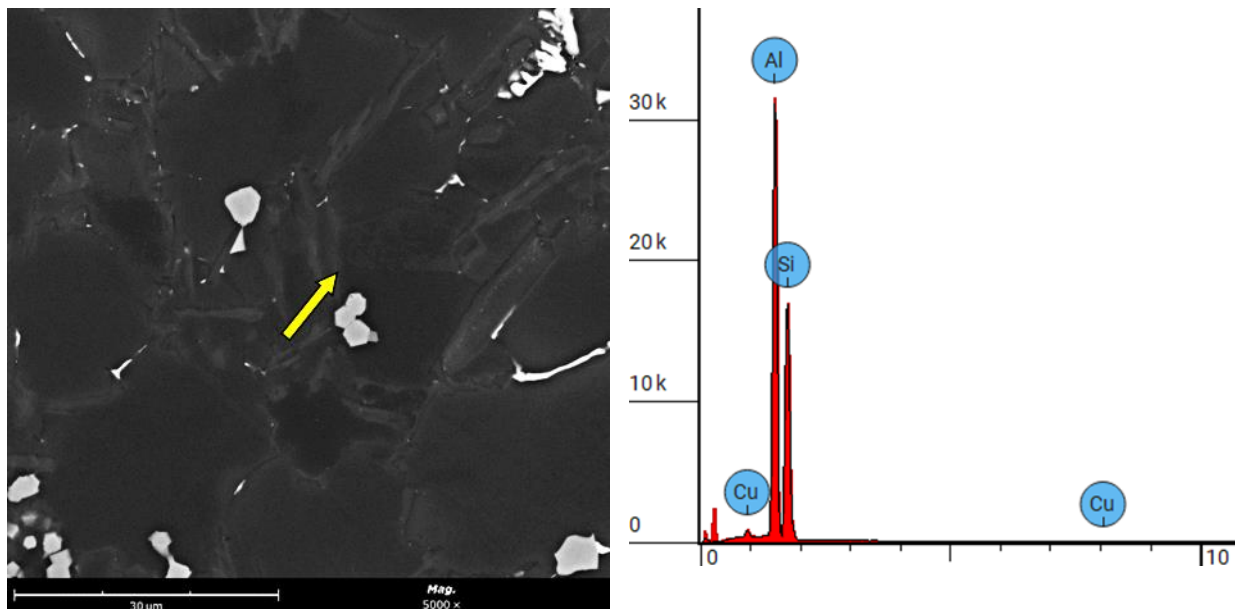


a)

Rys. 55. Fazy występujące w stopie w stanie lanym: a) pojedyncze dendryty, b) wydzielenia o kształcie wieloboków. Zgląd nietrawiony, LM.



a)



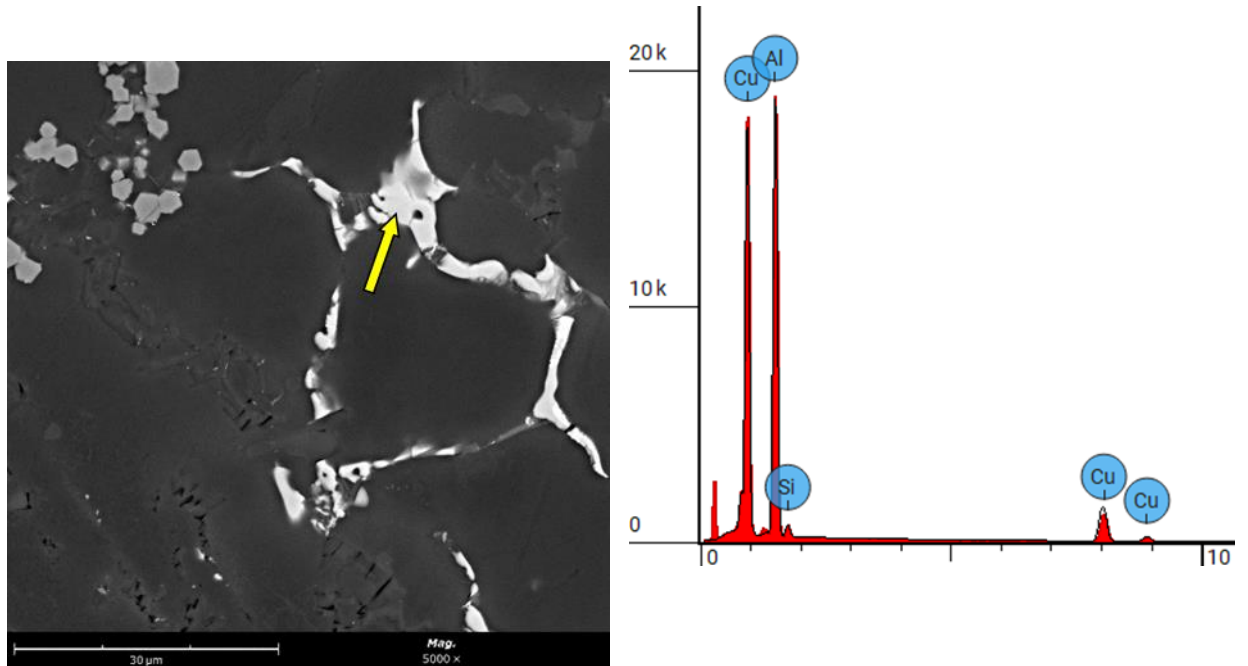
b)

Rys. 56. Mikrostruktura stopu $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3(\text{Fe})$: a) dendryty roztworu stałego $\alpha\text{-Al}$, b) wydzielenia krzemu $\beta\text{-Si}$. Zgłady nietrawione, SEM-BSD, EDS.

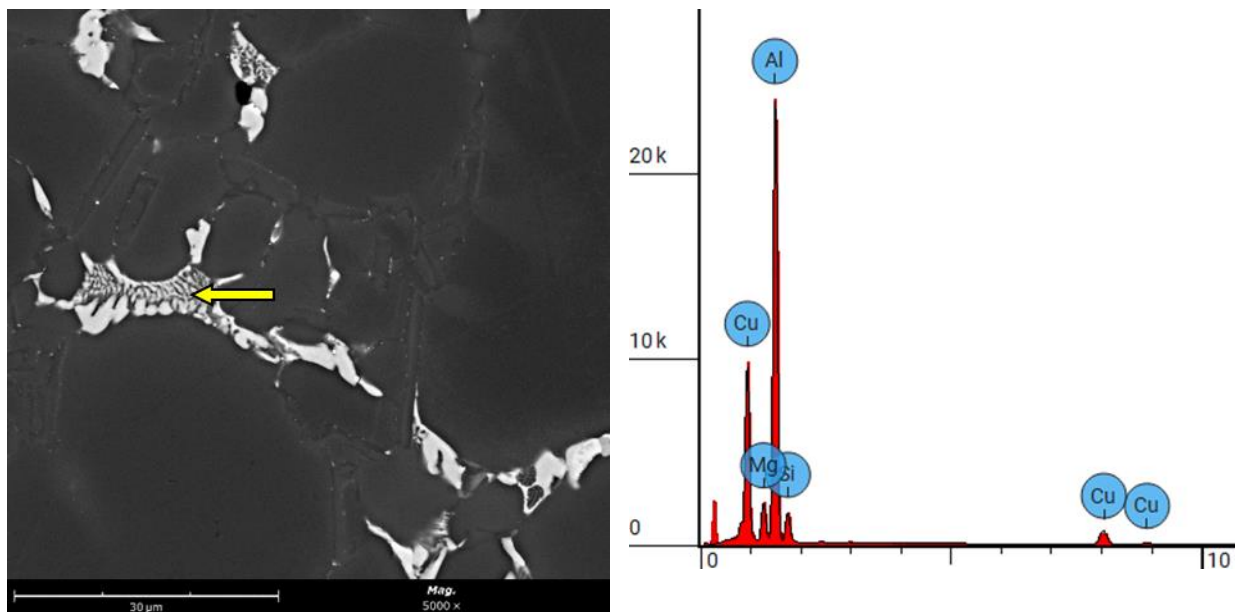
W przestrzeniach międzydendrytycznych stwierdzono występowanie licznych faz międzymetalicznych. Ich występowanie jest związane z obecnością dodatków stopowych lub zanieczyszczeń w stopie. Wydzielenia te można podzielić na kilka rodzajów.

Pierwsza z nich to faza o nieregularnej morfologii – Rys. 57a, zawierająca Al i Cu. Jest to najprawdopodobniej faza $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ [71]. W mikrostrukturze zaobserwowano również fazę

o morfologii chińskiego pisma (Rys. 57b), zawierającą Al, Mg, Si oraz Cu. Jest to prawdopodobnie faza $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_5$ [71]



a)

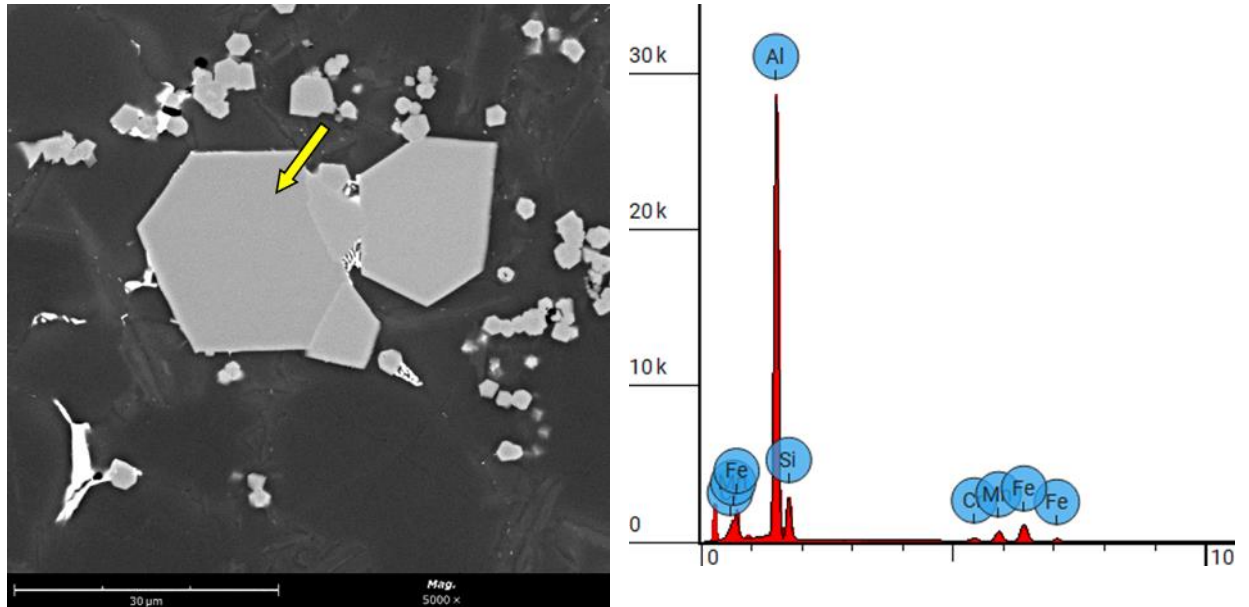


b)

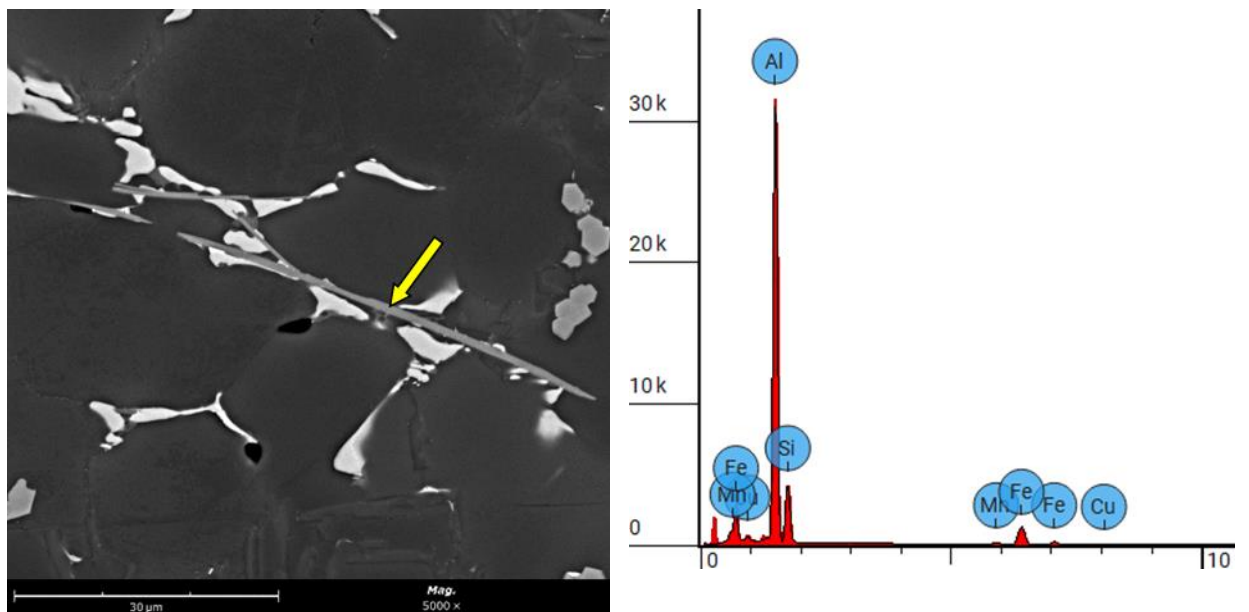
Rys. 57. Wydzielenia faz międzymetalicznych o morfologii: a) nieregularnej - $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$, b) chińskiego pisma – zawierające Al, Mg, Si oraz Cu. Zgłady nietrawione. SEM-BSD, EDS.

Ponadto stwierdzono obecność wydzielań w formie regularnych wieloboków/poligonów zawierających Al, Si, Fe, Mn oraz Cr – Rys. 58a oraz fazy o morfologii iglastej/płytkowej

(Rys. 58b) zawierającej Al, Si, Fe oraz Mn i Cu. Analiza składu chemicznego wydzielań oraz ich morfologia, najprawdopodobniej wskazuje, że mogą być to odpowiednio fazy $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ oraz $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ [69].



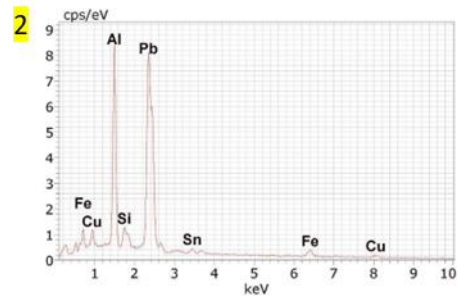
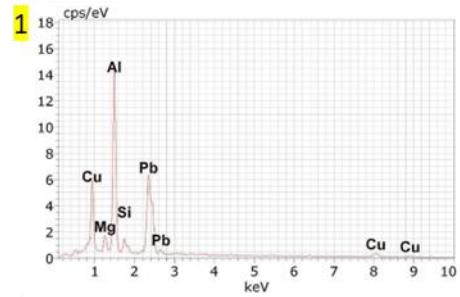
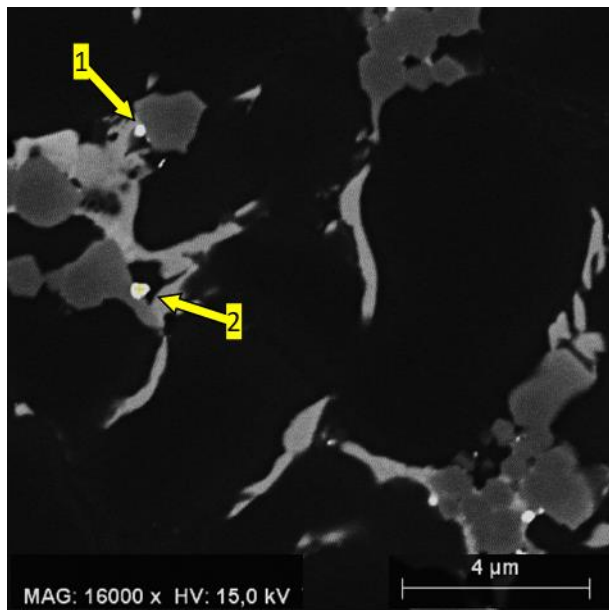
a)



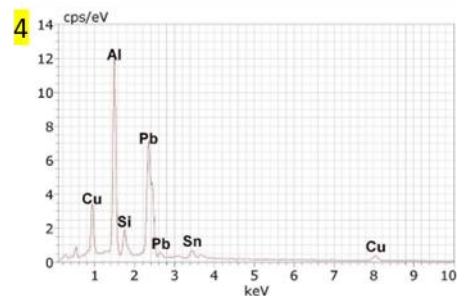
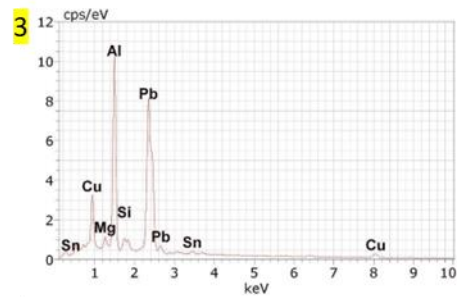
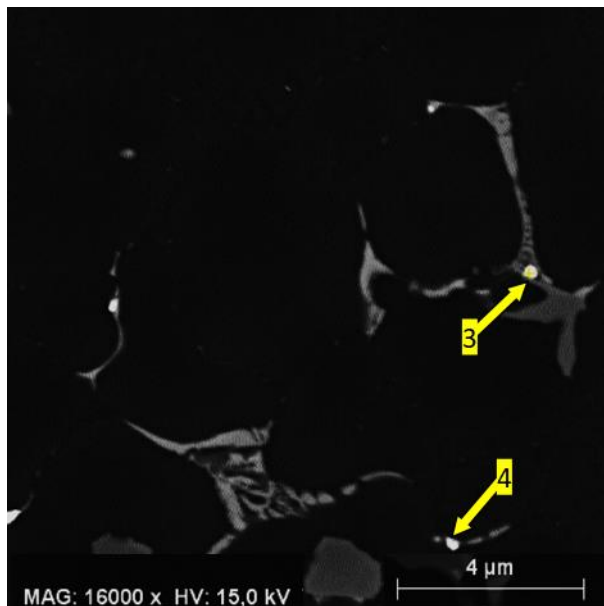
b)

Rys. 58. Wydzielenia faz międzymetalicznych o morfologii: a) wieloboków - zawierające Al, Si, Fe, Mn, Cr b) igłowej - zawierającej Al, Si, Fe oraz Mn i Cu. Zgłady nietrawione. SEM-BSD, EDS.

Stwierdzono również obecność drobnych cząstek, graniczących z innymi fazami międzymetalicznymi. Analiza składu chemicznego wykazała zawartość ołowiu, jednak ze względu na niewielki rozmiar cząstek $<2\mu\text{m}$, na widmie zarejestrowano również inne pierwiastki tj. Al, Cu, Si, Mg oraz Sn. Cząstki te najczęściej występowały w okolicy faz Al_2Cu - Rys. 59a i faz o morfologii chińskiego pisma (Rys. 59b).



a)



b)

Rys. 59. Wydzielenia o morfologii kulistej/włóknistej: a), b) ołów. Zgłady nietrawione. SEM-BSD, EDS.

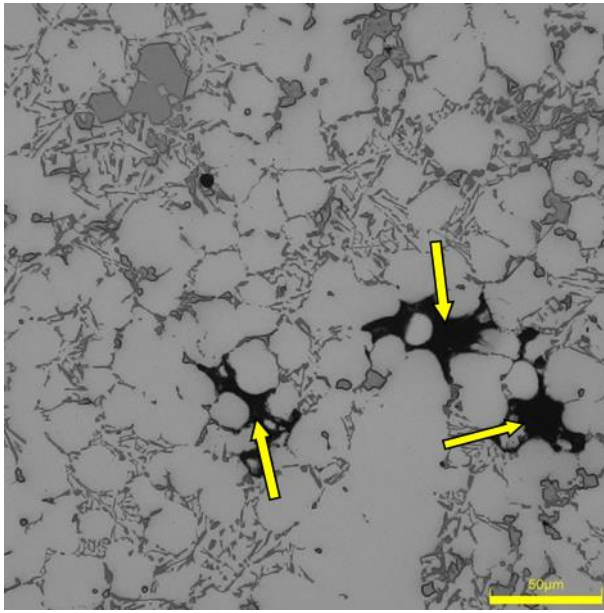
W strukturze stopów stwierdzono również obecność porów skurczowych i gazowych (Rys. 60). Porowatość w odlewach wysokociśnieniowych wykonanych ze stopów aluminium jest cechą charakterystyczną tej techniki odlewniczej. Jej obecność powoduje pogorszenie właściwości mechanicznych i powodowana jest różnorodnymi czynnikami technologicznymi.

Porowatość skurczowa charakteryzuje się nieregularnym kształtem pustki zlokalizowanej w przestrzeniach międzydendrytycznych. Zjawisko to skutkuje brakiem zasilania stref w węzłach ciepłych, które krzepną jako ostatnie. Węzły ciepłe wynikają z geometrii odlewianego elementu i różnic grubości ścianek (przekrojów). Ich wpływ można zredukować poprzez:

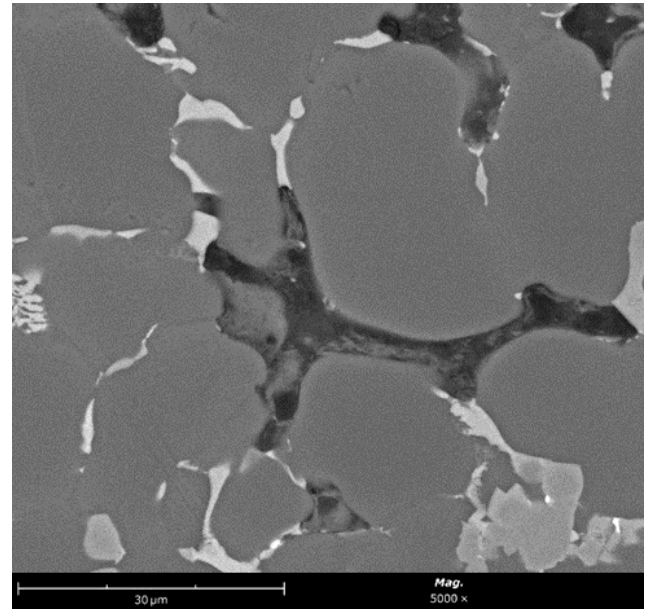
- odpowiednio zaprojektowany układ wlewowy i modyfikacja geometrii odlewu,
- kontrolowany proces chłodzenia formy za pomocą urządzeń grzewczo-chłodzących i doboru odpowiednich materiałów na wnękę formy,
- prawidłową aktywację ostatniej fazy ruchu tłoka lub jej brak (doprasowanie stopu we wnęce),
- zastosowanie elementów doprasowujących w formie (squeeze), które redukują lokalnie wielkość danej wady odlewniczej [75-76].

Porowatość gazowa charakteryzuje się najczęściej morfologią kulistą, a ich kształt może ulec deformacji na skutek wysokiego ciśnienia procesu technologicznego (>300bar). Ścianki porowatości są gładkie. Najczęstszymi przyczynami powstawania danej wady są:

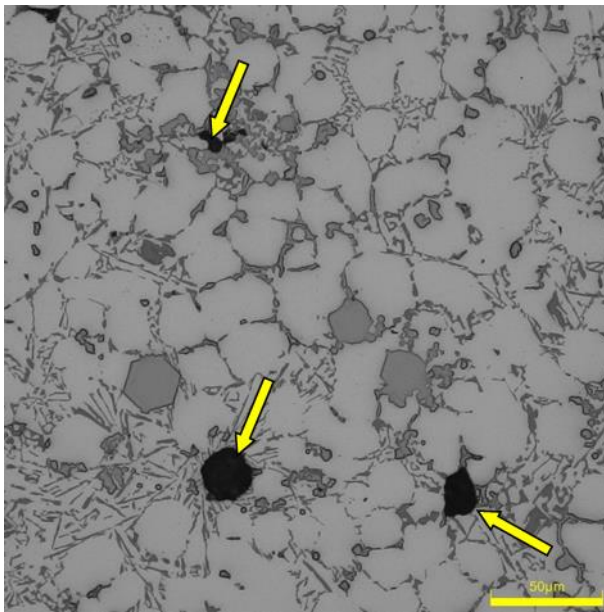
- rozpuszczone gazy (np. H_2) w ciekłym stopie (technologią przygotowania i przetrzymywania ciekłego stopu), wydzielające się w czasie krzepnięcia,
- nieprawidłowo zaprojektowany lub sterowany układ wlewowy oraz odpowietrzenia/próżniowy w formie,
- pozostałości smarów lub wody z procesów smarowania i oprysków, które ulegają wypaleniu na skutek wysokich temperatur,
- nieprawidłowa prędkość tłoka w pierwszej lub/i drugiej fazie w komorze strzałowej (efekt okluzji – 1 faza ruchu tłoka, gwałtowne, turbulентne wypełnienie wnęki – druga faza),
- zużyta powierzchnia formy z pęknięciami, z których możliwe są wycieki wody/oleju z układów chłodzenia/grzania,
- przyczyną mogą być również nieszczelne układy hydrauliczne sterujące ruchem elementów formujących lub tłoka [75-76, 78].



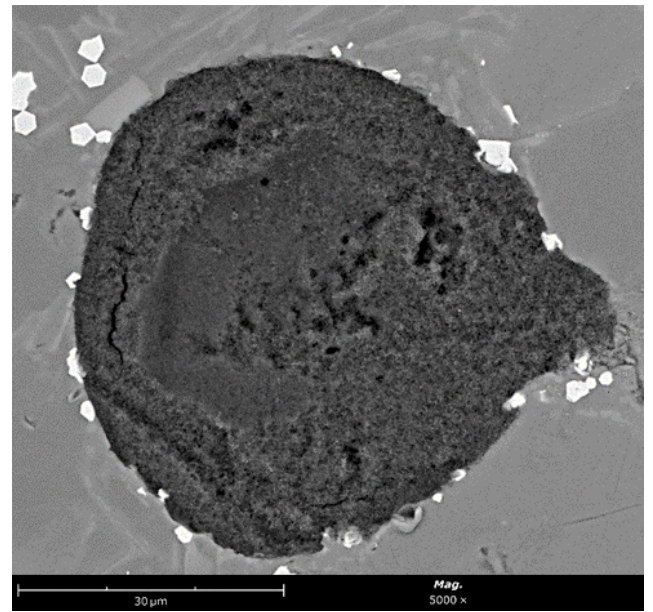
a)



b)



c)



d)

Rys. 60. Przykłady porowatości w stopie $AlSi9Cu3(Fe)$: a) b) skurczowa, c) d) gazowa. Zgląd nietrawiony, LM oraz SEM-BSD.

Następnie przeprowadzono weryfikację, czy obróbka cieplna wykonana wg wymagań Klienta, może mieć wpływ na niespełnienie wymagań właściwości mechanicznych. Porównano właściwości mechaniczne (R_m oraz A_5) odlewów wysokociśnieniowych z tego samego wytopu z udziałem 70% złomu po obróbce do odlewów, które nie zostały poddane obróbce cieplnej. Właściwości mechaniczne odlewów przedstawiono na w Tab. 11 oraz na Rys. 61.

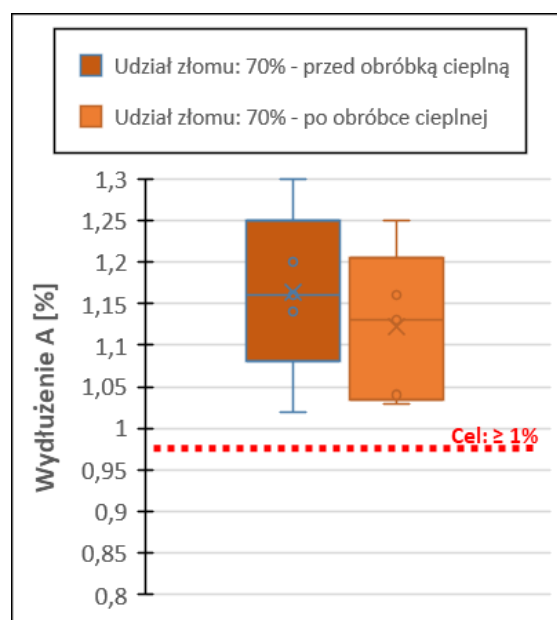
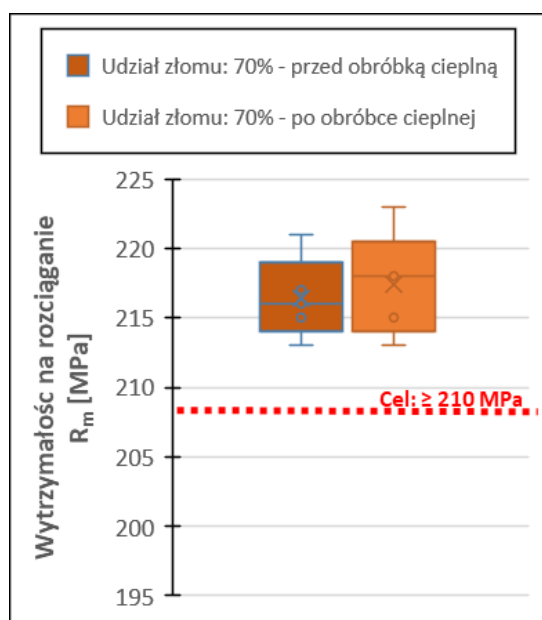
Tab. 11. Wyniki statycznej próby rozciągania dla grupy odlewów z udziałem złomu obiegowego: 70%: a) przed b) po obróbce cieplnej.

Udział złomu: 70% - przed obróbką cieplną			
	Próbka	R_m [MPa]	A [%]
	1	217	1,2
	2	216	1,16
	3	221	1,3
	4	215	1,14
	5	213	1,02
Wartość średnia		216	1,16
Wartość MIN		213	1,02
Wartość MAX		221	1,30
Odchylenie standardowe		2,7	0,09

Udział złomu: 70% - po obróbce cieplnej			
	Próbka	R_m [MPa]	A [%]
	1	215	1,13
	2	213	1,16
	3	218	1,03
	4	218	1,25
	5	223	1,04
Wartość średnia		217	1,12
Wartość MIN		213	1,03
Wartość MAX		223	1,25
Odchylenie standardowe		3,4	0,08

a)

b)



a)

b)

Rys. 61. Wyniki statycznej próby rozciągania dla grupy odlewów z udziałem złomu obiegowego: 70%: a) R_m i b) A_5 .

Dla odlewów przed obróbką cieplną średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wynosi $R_m = 216$ MPa, natomiast dla odlewów po obróbce cieplnej, średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wynosi $R_m = 217$ MPa. W przypadku wydłużenia wartości średnie dla obu wytopów wynoszą odpowiednio $A_5 = 1,16$ % oraz $A_5 = 1,12$ %. Obróbka cieplna wg parametrów klienta nie wpływa znacząco na własności mechaniczne tj R_m oraz A_5 , w obu przypadkach spełniono zakładane minimalne wymagania.

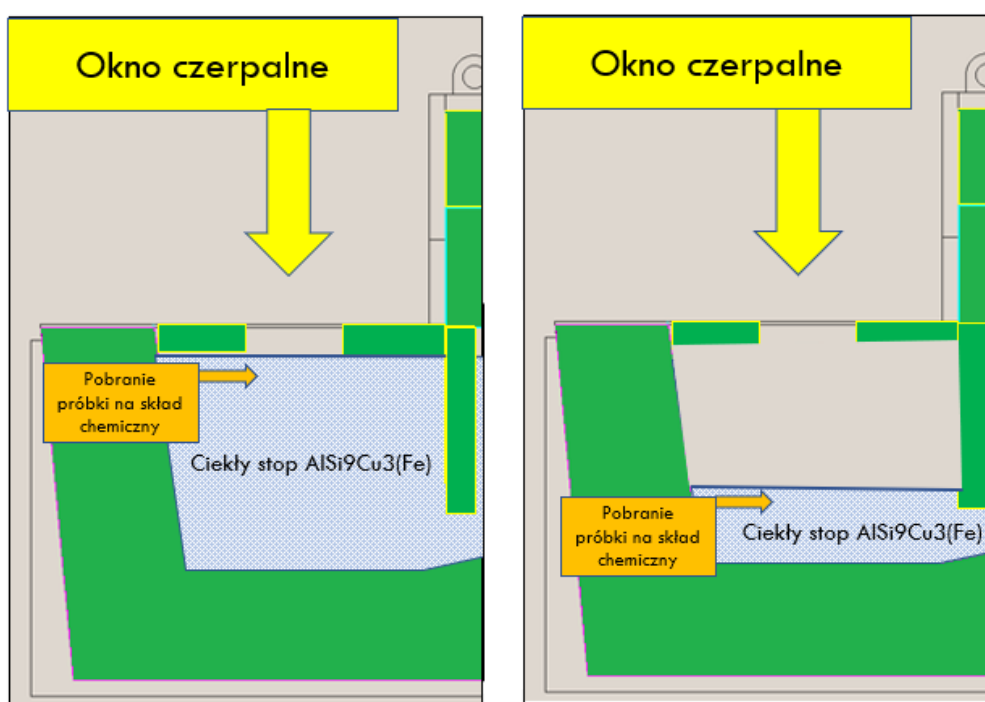
Uzyskane właściwości mechaniczne przy maksymalnym udziale złomu obiegowego spełniają nowe wymagania Klienta $R_m > 200$ MPa oraz $A_5 > 1\%$ w danym eksperymencie.

Nie wykazano zależności między zawartością złomu obiegowego, a jakością odlewów wykonanych ze stopu AlSi9Cu3(Fe). Nie zaobserwowano różnic w składzie chemicznym oraz indeksem gęstości. Mikrostruktura odlewów wykonanych w ramach obu wytopów testowych nie różni się. Można więc wyciągnąć wniosek, iż **zawartość złomu obiegowego w wytopie nie wpływa na właściwości mechaniczne odlewów bloku silnika**. Najprawdopodobniej wynika to z wysokiej jakości złomu, który pochodzi tylko wyłącznie z produkcji Nemark Polska. Ścisła selekcja oraz stabilność składu chemicznego złomu zapewniają niewielkie ryzyko wpływu złomu na strukturę odlewów, niezależnie od jego ilości. Nie stwierdzono również istotnego wpływu obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne odlewów.

Przyczyna zaniżonych właściwości mechanicznych, która została stwierdzona podczas analizy wstępnej, musi więc mieć inną przyczynę. Prawdopodobnie jest związana z drugim parametrem, jaki określono jako niestabilny, a mianowicie zmieniającym się poziomem ciekłego stopu w piecu podgrzewczym w czasie odlewania oraz przestojami w produkcji. W związku z tym przystąpiono do realizacji drugiego etapu badań polegającego na symulacji przestoju produkcyjnego przy pełnym piecu podgrzewczym.

8.2 ETAP 2 – sposób pobierania metalu z pieca podgrzewczego (poziom ciekłego metalu w piecu).

Realizację etapu 2 badań rozpoczęto od weryfikacji składu chemicznego oraz indeksu gęstości w piecu podgrzewczym w momencie uruchomienia maszyny ciśnieniowej (Tab. 12). Objętość pieca wypełniona była w 100 % ciekłym stopem o zawartości ok. 70 % złomu obiegowego (Rys. 62a). Pomiary zrealizowano po 10 godzinach od napełnienia pieca podgrzewczego, odzwierciedlając możliwe warunki pracy wynikające z planowanych przeglądów bądź przestojów awaryjnych. Próbę technologiczną realizowano do zatrzymania się maszyny ze względu na minimalny poziom stopu w piecu podgrzewczym, szacowany na 15 % (Rys. 62b).



Rys. 62. Proces pobierania próbek do badań składu chemicznego z pieca podgrzewczego w momencie, gdy poziom ciekłego stopu wynosi: a) 100 %, b) ~15 %.

Po zakończeniu odlewania powtórzono badania składu chemicznego oraz indeksu gęstości stopu. Stwierdzono różnice w zawartości ołowiu pomiędzy pomiarami realizowanymi w pełnym piecu oraz po zakończeniu próby. Zawartość ołowiu w ciekłym stopie pobranym z dna pieca była wyższa niż podczas analizy składu chemicznego stopu znajdującego się w pełnym piecu. Zawartość zmieniła się z 0,03 % do 0,07 %. Zawartość pozostałych pierwiastków oraz indeks gęstości były na podobnym poziomie.

Tab. 12. Skład chemiczny wraz z indeksem gęstości ze skrajnych poziomów ciekłego stopu w piecu podgrzewczym.

Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Wysoki poziom stopu	86,71	8,64	0,85	3,24	0,3	0,23	0,03	2,12
Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Najniższy poziom stopu	86,7	8,63	0,84	3,23	0,29	0,24	0,07	2,09

Zawartość pozostałych pierwiastków stopowych nie różniła się znacząco pomiędzy analizowanymi przypadkami. Skład chemiczny w obu przypadkach zgodny był ze specyfikacją normy wewnętrznej POL-QAS-ST-0010.

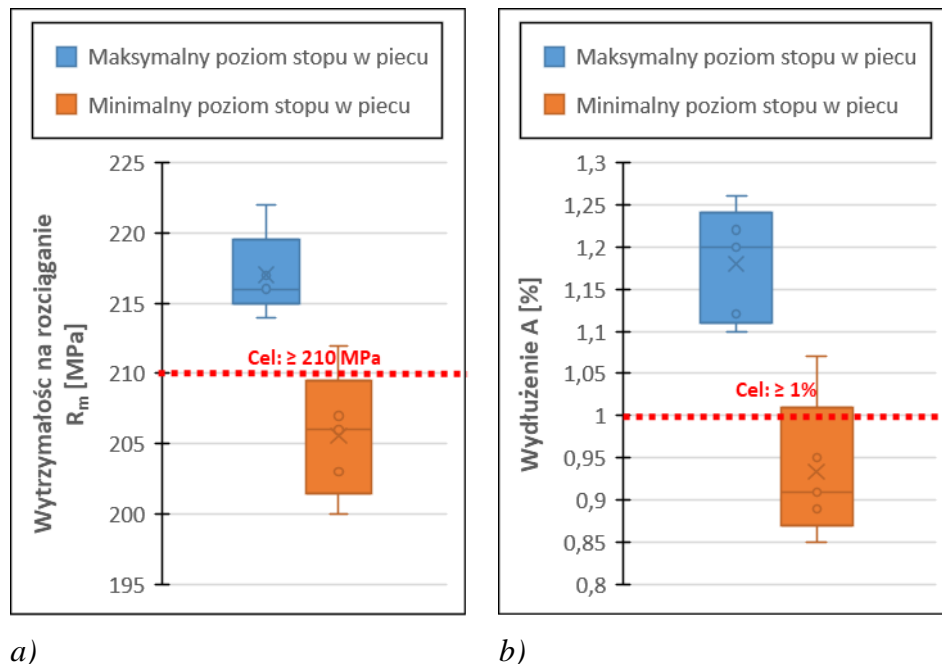
Wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie partii odlewów wyprodukowanych na początku próby wynoszą odpowiednio $R_m = 214-222$ MPa oraz $A_5 = 1,10-1,26$ %. Natomiast w przypadku odlewów z końca próby R_m zmniejsza się i wynosi $R_m = 200-212$ MPa, podobnie jak wydłużenie, które osiąga wartość w zakresie $A_5 = 0,85-1,07$ % (Tab. 13). Zarówno wytrzymałość na rozciąganie, jak i wydłużenie w końcowym etapie eksperymentu nie spełniają nowych wymagań Klienta $R_m > 200$ MPa oraz $A_5 > 1$ % (Rys. 63).

Tab. 13. Wyniki statycznej próby rozciągania: a) na początku oraz b) na końcu próby.

Maksymalny poziom stopu w piecu				Minimalny poziom stopu w piecu					
	Próbka	Rm [MPa]	A [%]		Próbka	Rm [MPa]	A [%]		
	1	222	1,12		1	203	0,85		
	2	216	1,22		2	212	1,07		
	3	216	1,26		3	206	0,95		
	4	214	1,2		4	207	0,91		
	5	217	1,1		5	200	0,89		
	Wartość średnia		217	1,18		Wartość średnia		206	0,93
	Wartość MIN		214	1,10		Wartość MIN		200	0,85
	Wartość MAX		222	1,26		Wartość MAX		212	1,07
	Odchylenie standardowe		2,7	0,06		Odchylenie standardowe		4,0	0,08

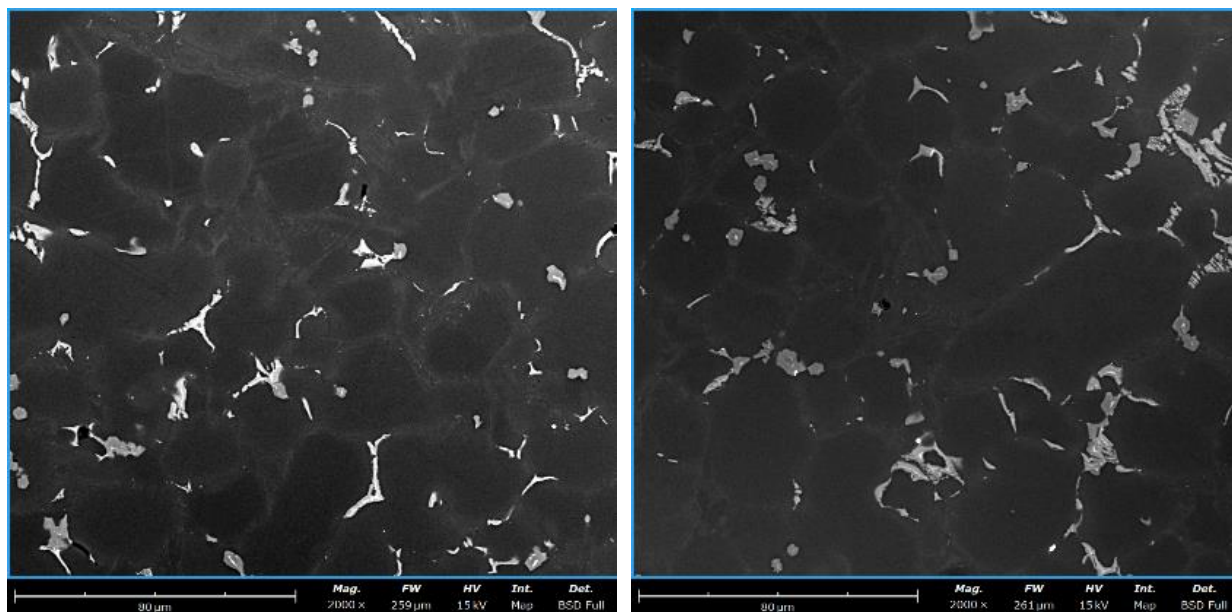
a)

b)



Rys. 63. Wyniki statycznej próby rozciągania dla dwóch wytopów: a) R_m i b) A_5 .

W celu szczegółowego zbadania potencjalnego czynnika/czynników, jakie mogły wpłynąć na różnice we właściwościach mechanicznych stopów, zdecydowano się na wykonanie badań metalograficznych próbek przygotowanych z odlewów dla dwóch odlanych partii odlewów. Mikrostruktura stopu składa się z typowych dla analizowanego stopu składników - Rys. 64. Nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy wytopami.

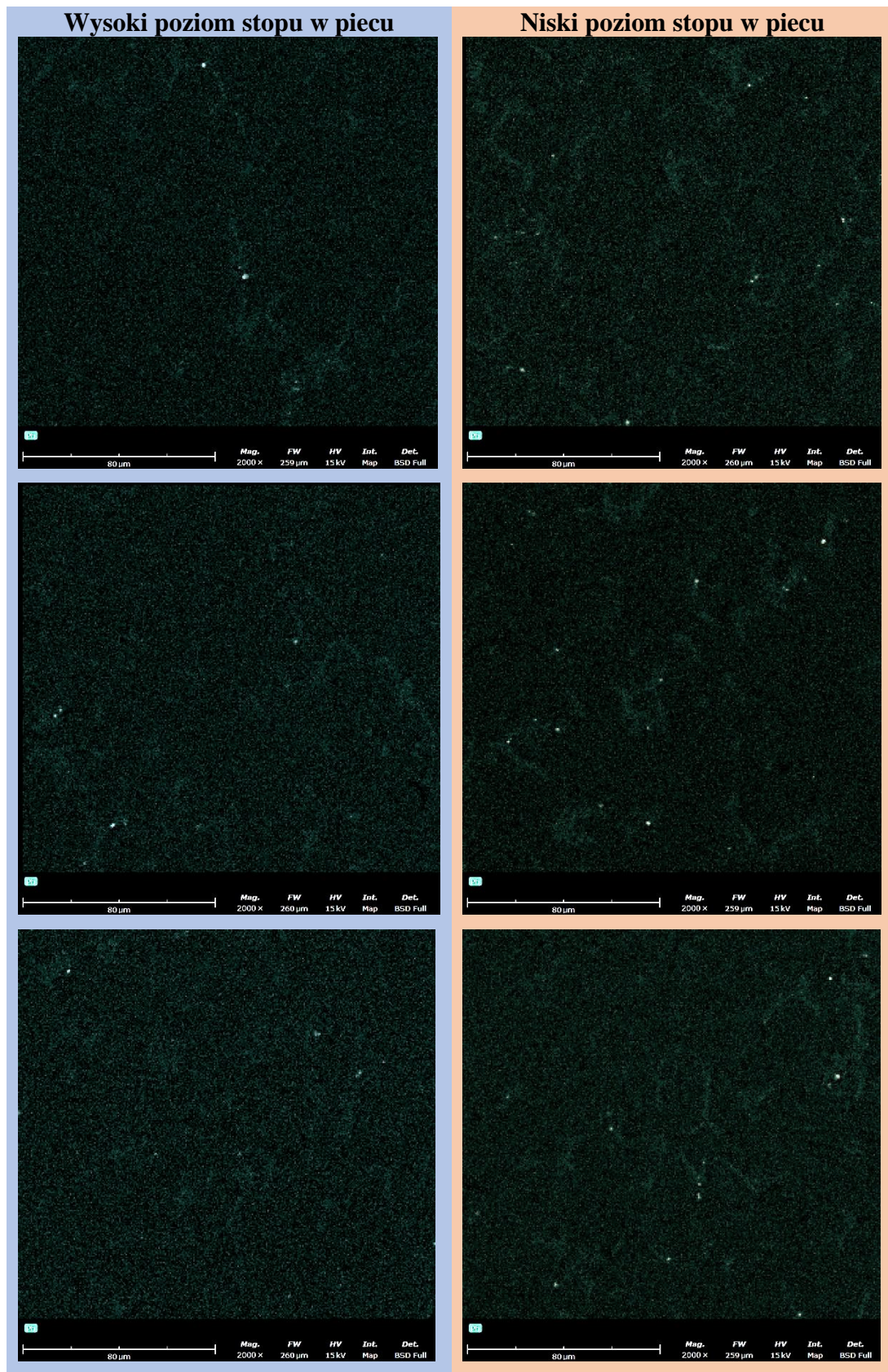


a)

b)

Rys. 64. Mikrostruktura stopu $AlSi_9Cu_3(Fe)$ z dodatkiem 70% złomu obiegowego: a) na początku próby, b) na końcu próby. Zgląd nietrawiony, SEM/BSD.

Następnie wykonano mapping powierzchni próbek pod kątem wykrycia cząstek zawierających ołów. Porównanie przykładowych mikrostruktur zarejestrowanych przedstawiono na Rys. 65. Jaskrawe, punktowe obszary to rozkład cząstek ołowiu w analizowanym mikroobszarze próbki. W celu oceny ich ilości wykonano badania ilościowe bazujące na cyfrowej analizie wykonanych obrazów wg procedury opisanej w rozdziale 7. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tab. 14.



a) b)
 Rys. 65. Rozmieszczenie Pb w stopie $AlSi_9Cu_3(Fe)$: a) początek próby – wysoki poziom stopu, b) koniec próby – niski poziom stopu w piecu. Zglady nietrawiony, SEM.

Tab. 14. Wyniki badań ilościowych cząstek zawierających Pb: a) początek próby, b) koniec próby.

Maksymalny poziom stopu w piecu			
óbką	Średnia liczba cząstek Pb	Średnia całkowita powiechnia cząstek [mm ²]	Średni udział objętościowy [%]
1	19	13,800278	0,032766
2	20	15,99798	0,038237
3	20	26,469385	0,062845
4	16	13,864916	0,033139
5	18	21,233683	0,050414
6	17	15,125363	0,036151
7	17	13,671001	0,032459
8	18	16,77364	0,039825
9	18	8,435299	0,020028
10	17	18,324959	0,043508
11	16	13,380129	0,03198
12	20	21,815427	0,051796
13	20	27,148088	0,064887
14	23	14,252746	0,03384
15	20	17,161469	0,041018

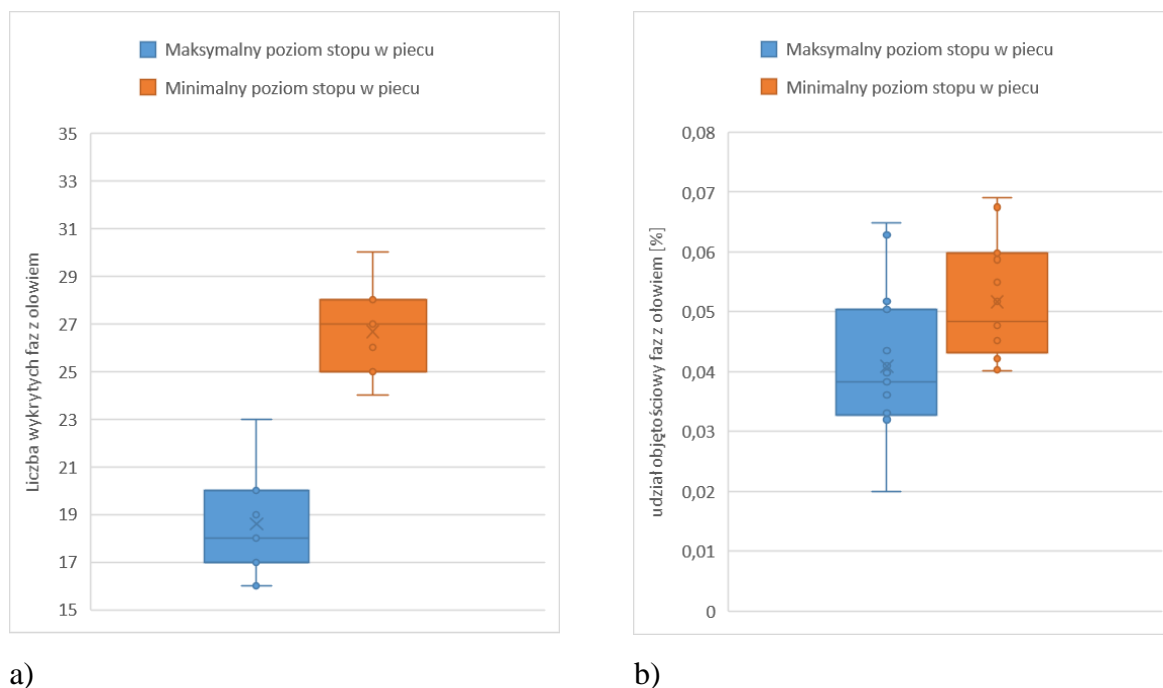
a)

Minimalny poziom stopu w piecu			
óbką	Średnia liczba cząstek Pb	Średnia całkowita powiechnia cząstek [mm ²]	Średni udział objętościowy [%]
1	27	16,77364	0,040091
2	28	22,978917	0,054922
3	27	19,197576	0,045884
4	25	17,743214	0,042127
5	26	16,870597	0,040323
6	26	25,305895	0,060083
7	26	20,361065	0,048343
8	30	24,724151	0,058702
9	27	21,815427	0,051796
10	25	18,906704	0,045189
11	25	25,015023	0,059789
12	28	20,070193	0,047652
13	28	29,087236	0,069061
14	24	18,034087	0,043103
15	28	28,214619	0,067436

b)

W mikrostrukturze stopu na początku próby stwierdzono średnią liczbę cząstek zawierających ołów, w zakresie między 16-23. Natomiast na końcu próby, wartości te mieściły się w przedziale 24-30 i były wyższe o około 70 % w odniesieniu do początku próby. Średni udział objętościowy cząstek z ołowiem dla maksymalnego poziomu stopu w piecu podgrzewczym na początku próby wynosił 0,020-0,065 %. Pod koniec próby (w pobliżu dna pieca), udział

objętościowy cząstek z ołowiem wzrósł do poziomu 0,040-0,069 %. Natomiast całkowita średnia powierzchnia cząstek właściwie nie zależała od poziomu stopu w piecu i wynosiła 8,44-27,15 mm² (na początku próby), 16,77- 29,09 mm² (na końcu próby) - Rys. 66.



Rys. 66. Wyniki badań ilościowych cząstek zawierających Pb: a) liczba cząstek z ołowiem, b) udział objętościowy cząstek z ołowiem [%].

Udział objętościowy i liczba cząstek ołowiu jest prawie dwukrotnie większy w pobliżu dna pieca przy minimalnym poziomie stopu w piecu (koniec próby). Zauważalny jest trend spadku właściwości mechanicznych, wraz ze zmniejszaniem się poziomu ciekłego stopu w piec, co skutkuje obniżeniem wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia poniżej wymaganych przez Klienta wartości.

Tak więc bardzo istotne znaczenie dla stabilności właściwości mechanicznych odlewów wysokociśnieniowych ze stopu AlSi9Cu3(Fe) ma poziom ciekłego stopu w piecu.

Przestój pieca z ciekłym stopem, brak jakiegokolwiek ruchu mieszającego, niski poziom stopu oraz niska temperatura stopu 660 ± 5 °C spowodowały zwiększenie udziału objętościowego cięższych, cząstek ołowiu. Ponieważ gęstość ołowiu wynosi $11,34$ g/cm³ i jest czterokrotnie wyższa niż gęstości samego stopu AlSi9Cu3(Fe), nastąpiła ich sedymentacja do niższych stref pieca.

Ołów jest dodawany do niektórych stopów aluminium w celu poprawy skrawalności. Cząstki ołowiu mają niższą temperaturę topnienia niż aluminium, więc w temperaturze cięcia

cząstki te topią się i zmniejszają tarcie. Jednak ołów ma nie tylko pozytywny wpływ na stopy aluminium, ale jest również określany jako zanieczyszczenie. Ołów zmniejsza wytrzymałość, plastyczność, przewodność cieplną i sprzyja korozji międzykrystalicznej. W przypadku stopów Al z dodatkiem Pb powinny być stosowane specjalne metody odlewnicze, ponieważ istnieje bardzo duża różnica gęstości między aluminium i ołowiem, co komplikuje osiągnięcie równomiernego rozkładu cząstek za pomocą konwencjonalnych technik odlewania [68].

Identyfikacja przyczyny obniżonych właściwości mechanicznych stopu umożliwia przejście do przygotowania założeń projektowych mających na celu redukcję wpływu ciężkich pierwiastków stopowych na właściwości wytrzymałościowe stopu.

8.3 Założenia projektowe

8.3.1 Wybór rozwiązania

We wcześniejszych rozdziałach wykazano, że jest możliwe spełnienie minimalnych wymagań Klienta. Problemem jest jednak zbyt duża zawartość ołowiu w piecu podgrzewczym przy minimalnym poziomie ciekłego stopu. Ten problem można rozwiązać poprzez redukcję wpływu ciężkich pierwiastków stopowych, głównie ołowiu. Zmniejszenie zawartości takich składników może być zrealizowane poprzez:

1. Ograniczenie ilości zanieczyszczeń w ciekłym stopie (kontrola składu chemicznego).
2. Ograniczenie zjawiska sedymentacji lub jego skutków.

Bazując na wnioskach z eksperymentów, powinno to skutkować osiągnięciem założonych wartości R_m oraz A_5 wymaganych przez Klienta.

Prace rozpoczęto od wyselekcjonowania propozycji rozwiązań technologicznych w Nemark polska, bazujących na dostępnej literaturze naukowej oraz wewnętrznych kalkulacjach. Ograniczenie zawartości pierwiastków takich jak ołów można osiągnąć poprzez [39, 79]:

1. Ograniczenie udziału złomu obiegowego.
2. Zmiana specyfikacji składu chemicznego stopu dostarczanego przez dostawców.

Zjawisko sedymentacji lub jego skutków, można ograniczyć dzięki następującym rozwiązaniom [39, 51]:

3. Zmiana typu lub konstrukcji pieca podtrzymującego.
4. Wprowadzenie systemu mieszania stopu w piecu.
5. Pobieranie stopu z jednej określonej wysokości z pieca (z pominięciem dna i powierzchni lustra stopu w piecu).

Pierwsze cztery opcje zostały przeanalizowane pod kątem technicznym i finansowym. Według Nemark Polska, każde rozwiązanie dotyczące zmiany specyfikacji stopu byłoby nierentowne. Zmiany konstrukcyjne dotyczące pieca nie otrzymają zezwolenia, ze względu na niedawną inwestycję w jego odnowienie (warunki gwarancji). Dodatkowo każdy remont pieca wiąże się z długotrwałym przestojem. Dlatego, zrezygnowano z proponowanych rozwiązań. Argumentację przedstawiono w Tab. 15.

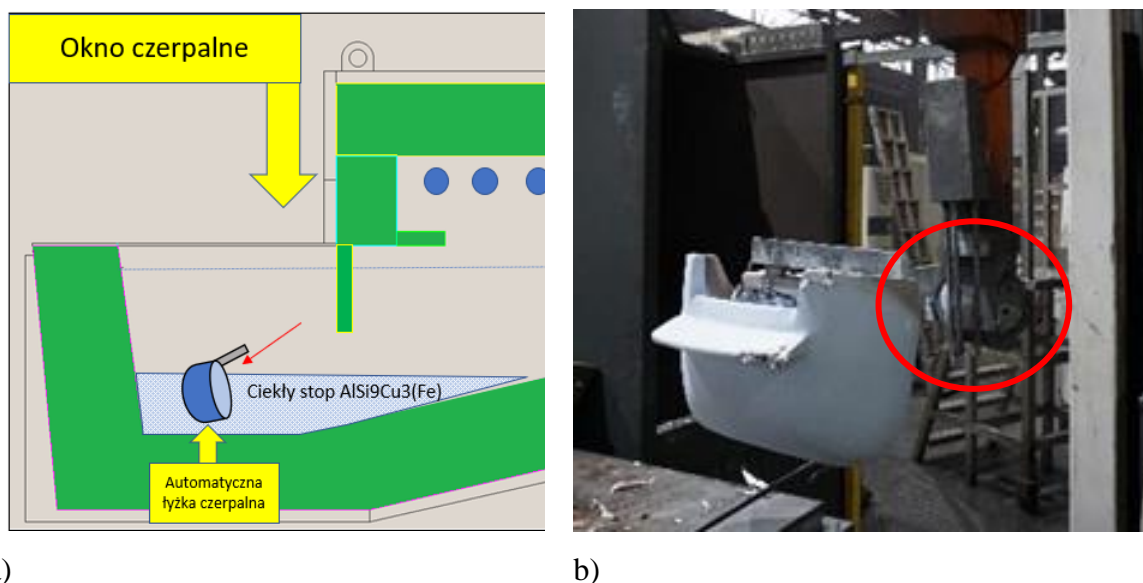
Tab. 15. Argumenty będące podstawą do odrzucenia wstępnych propozycji rozwiązań ograniczenia wpływu sedymentacji.

Propozycja	Powód odrzucenia rozwiązania
Ograniczenie udziału złomu obiegowego w ciekłym stopie	<p>Nie spełnia warunku narzuconego przez Klienta dotyczącego zwiększenia udziału stopów pochodzenia wtórnego.</p> <p>Model biznesowy związany z zamawianiem ciekłego stopu od dostawców ze zwiększoną ilością złomu podwyższa znacząco koszty całej produkcji.</p> <p>Wpływa na produkcję wszystkich produktów w przedsiębiorstwie. Koszty dodatkowe z przetwarzaniem złomu poza przedsiębiorstwem.</p>
Zmiana typu lub konstrukcji pieca podgrzewczego, lub zakup innego.	<p>Wysoki koszt inwestycyjny. Aktualny piec jeszcze nie uległ amortyzacji. Brak zgody, ze względu na warunki gwarancji. Znaczący przestój w produkcji przy remoncie wymurówki.</p>
Wprowadzenie systemu mieszania stopu w piecu	<p>Wymagana zmiana konstrukcji pieca (brak zgody), brak danych związanych z wpływem procesu mieszania na żywotność wymurówki pieca. Ryzyko przedostawania się tlenków z powierzchni, obniżenie jakości stopu.</p>
Zmiana specyfikacji składu chemicznego	<p>Znaczący koszt przedsięwzięcia.</p>

W związku z tym pomysł z pobieraniem stopu z pomięciem rejonów w okolicy dna pieca oraz lustra stopu przyjęto jako jedyną opłacalną opcję. Brakowało jednak dostępnych informacji technicznych i komercyjnych dostępności gotowego rozwiązania, które wyklucza zastosowanie innego typu pieca np. dozującego. Najpierw zdecydowano się na przeprowadzenie ogólnej analizy systemu dozowania stopu za pomocą łyżki automatycznej. Następnie podjęto próbę znalezienia alternatywny danego systemu, który w założeniu mógłby ograniczyć wpływ zjawiska sedymentacji w piecu podgrzewczym.

8.3.2 Automatyczna łyżka zalewowa i ograniczenia

Podstawowym ograniczeniem automatycznej łyżki dozującej w Nemark Polska jest jej zależność od lustra i poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym. Wraz ze zmieniającym się poziomem w piecu, łyżka za każdym razem pobiera stop zlokalizowany blisko powierzchni. Czerpak nie ma możliwości głębszego zanurzenia, ze względu na ryzyko uszkodzenia 7 osi robota, czyli mechanizmu sterującego kątem zanurzenia - Rys. 67. Wada będzie występować, nawet przy zmianie geometrii łyżki. Niski poziom ciekłego stopu utrudnia pobieranie stopu w studzience przy większych rozmiarach czerpaka.



Rys. 67. Pobieranie automatycznej łyżki zalewowej: a) jest zależne od poziomu stopu w piecu podgrzewczym, b) ryzyko uszkodzenia 7 osi robota dozującego.

Ponadto system posiada szereg innych wad, które dodatkowo mogą wpływać na stabilność procesu produkcyjnego, zwłaszcza przez zwiększone ryzyko przedostania się tlenków z powierzchni stopu. Dodatkowo zaobserwowano wysokie straty cieplne wynikające z geometrii łyżki oraz brak uniwersalności przy zmianie wartości pobieranej masy stopu. Równocześnie wraz z większym rozmiarem łyżki, wymaganym przy większych odlewach, precyzja i dokładność napełniania/dozowania maleje. Tab. 16 jest podsumowaniem dodatkowych czynników, które uzasadniały poszukiwania alternatywnego systemu dozowania ciekłego stopu.

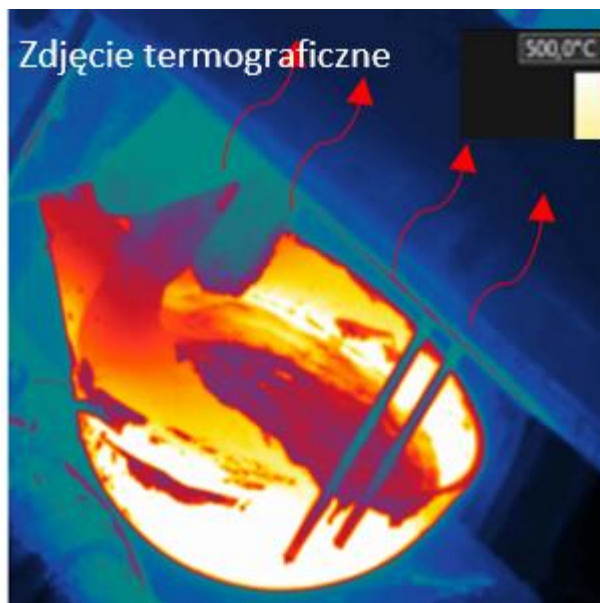
Tab. 16. Zidentyfikowane dodatkowe czynniki automatycznej łyżki zalewowej, jakie potencjalnie mogą mieć wpływ na jakość ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$, dostarczanego do komory prasowania maszyny wysokociśnieniowej.



Mała stabilność i precyzyjność nabierania ciekłego stopu z okna czerpanego. Przyczyną jest mało precyzyjny kąt napełniania i ograniczenie szybkości napełniania. Za duża szybkość, może wpłynąć na zagazowanie stopu. Brak możliwości pobierania stopu z głębszych partii pieca spod powierzchni lustra metalu – ograniczenie konstrukcyjne mocowania łyżki.



W czasie pobierania ciekłego stopu automatyczna łyżka zalewowa przebija utlenioną powierzchnię lustra ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$. Stwarza to ryzyko zaczerpnięcia tlenków z powierzchni lustra.



Wysokie straty ciepłe w ciekłym stopie występują już w czasie nabierania go z pieca podgrzewczego oraz w czasie transportu do komory prasowania maszyny wysokociśnieniowej. Powodem jest duża powierzchnia stopu mająca kontakt z powietrzem oraz wychłodzona łyżka powracająca ze stacji przedmuchu.



Brak uniwersalności. Wymagane różne pojemności czerpaków w celu zwiększenia szybkości napełniania i minimalizowania strat ciepłych. Wielkość i kształt czerpaków dobierana jest w zależności od masy wtrysku (odlewu) i robota dozującego.



Ograniczony ruch wewnątrz okna czerpalnego pieca związany z wielkością łyżki. Robot wykonuje ruchy w płaszczyźnie poziomej, a następnie pionowej. Masa >40 kg i zaprojektowana łyżka może utrudnić wykonanie procedury napełniania (odgarnięcie tlenków).



Pozostałości ciekłego stopu w łyżce zalewowej po procesie dozowania, jak i utlenionych pozostałości stopu na ściankach łyżki zalewowej. Wymagane jest zabezpieczenie ceramiki dedykowanymi powłokami oraz dodatkowego systemu przedmuchu, powodującego wychładzanie łyżki.



Nieprecyzyjne dozowanie ciekłego stopu do komory prasowania maszyny wysokociśnieniowej. Manewrowanie łyżką zalewową w jest ograniczone dostępnym miejscem w pobliżu komory strzałowej. W pracy obliczona masa wymagana do pobrania z pieca wynosi 40 kg. Dany parametr wiązałaby się z ryzykiem zmiany konstrukcji komory strzałowej lub obszaru wokół komory strzałowej, aby móc zapewnić odpowiednią stabilność dozowania.



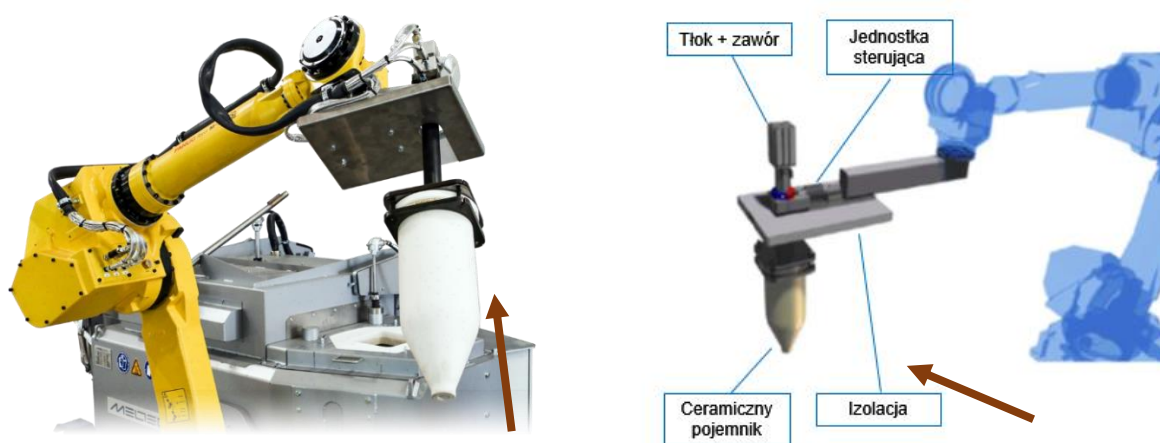
8.3.3 Innowacyjny system dozowania

Podsumowano dotychczasowe informacje, które powinny charakteryzować nowy system dozowania dla nowego projektu. Wymagania podzielono na cztery grupy:

- a) założenia dotyczące specyfikacji odlewu Klienta,
 - dozowanie stopu o masie do 40 kg
- b) założenia projektowe wynikające z eksperymentów przemysłowych,
 - uniknięcie pobierania ciekłego stopu z dna pieca
 - pobieranie stopu spod powierzchni stopu,
 - system powinien czerpać stop zawsze z określonej głębokości/ustalanego zakresu głębokości niezależnie od zmieniającego się poziomu stopu w piecu.
- c) wad aktualnego systemu dozowania
 - ograniczenie strat termicznych
 - zwiększenie precyzji i dokładności dozowania
- d) wymagań narzuconych przez Nemark Polska
 - minimalny wpływ na proces produkcyjny,
 - czas cyklu dozowania nie może ulec wydłużeniu,
 - rozwiązanie nie może wpływać na czynności wykonywane na piecu podgrzewczym,
 - niewielkie zaangażowanie obsługi,
 - limitowane miejsce przy maszynie,
 - ograniczenia związane ze zużyciem energii elektrycznej,
 - rozwiązanie ekonomiczne.

W ramach poszukiwań skonsultowano się z dostawcą nowatorskich systemów podciśnieniowego dozowania ciekłych stopów aluminium (AVD - Aluminium Vacuum Dosing). Urządzenia tego typu są dedykowane dla odlewnictwa grawitacyjnego oraz ciśnieniowego. Składają się z następujących elementów (Rys. 68) [80]:

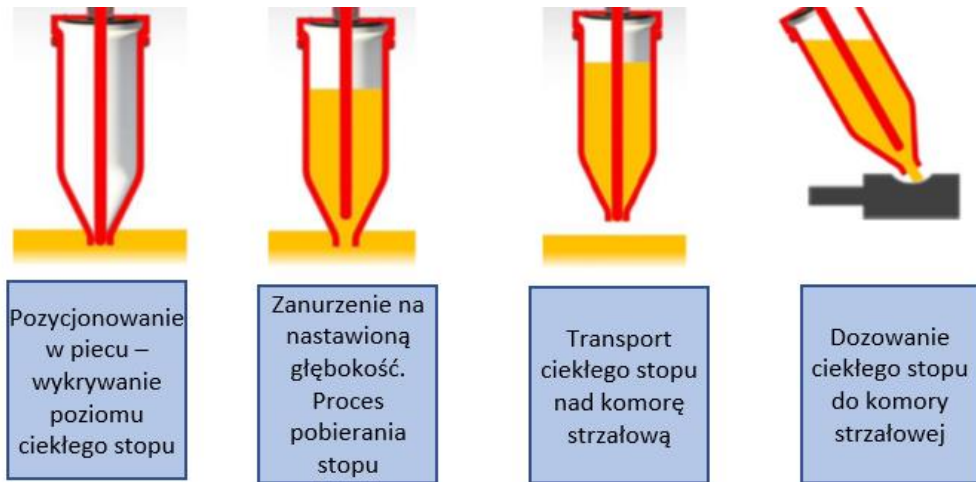
- ceramiczny zbiornik,
- zespół ruchu tłoka wewnątrz zbiornika,
- pneumatyczno-elektryczna jednostka sterująca,
- cyfrowy czujnik masy.



Rys. 68. Przykładowy system dozowania AVD z poszczególnymi elementami konstrukcyjnymi [60,80].

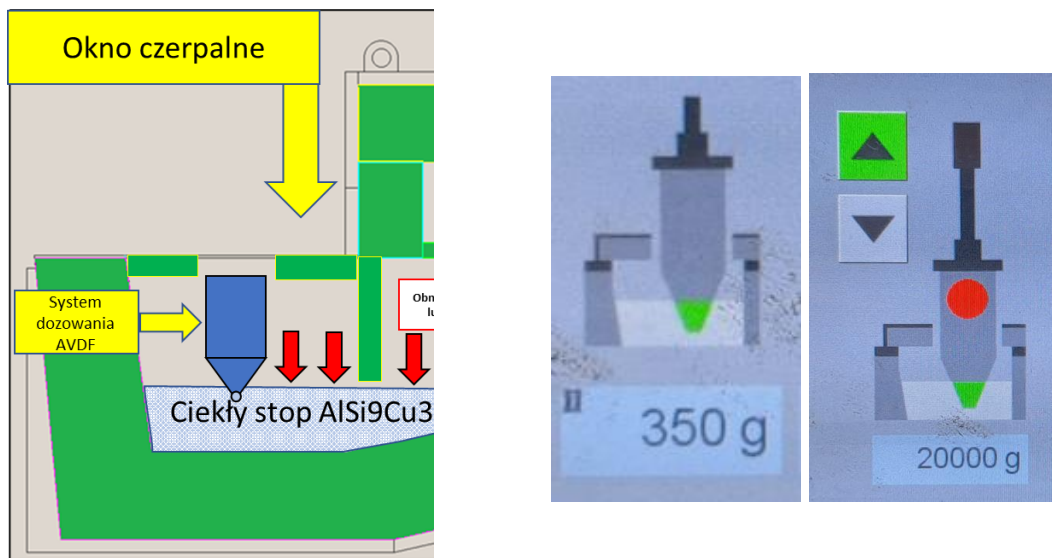
Uproszczona zasada działania systemu została przedstawiona na Rys. 69. Czerpak ceramiczny w kształcie cylindra jest zakończony stożkiem z otworem wlotowo-wylotowym. Zbiornik zamontowany na 6-osiowym manipulatorze rozpoczyna pozycjonowanie nad oknem czerpanym pieca, gdy otrzyma sygnał startu cyklu. Wylot czerpaka jest zasłonięty od wewnątrz przez sterowany w pionie tłok. Uniemożliwia on przedostanie się potencjalnych zanieczyszczeń z powierzchni lustra stopu do wnętrza pojemnika. Pojemnik zjeżdża w dół do momentu wykrycia lustra stopu, tym samym oszacowuje aktualną pojemność stopu w piecu. Jest to możliwe dzięki tensometrowi, spełniającego rolę wagi cyfrowej. Sygnał przeliczany jest przez jednostkę sterującą. Następuje zanurzenie czerpaka na ustaloną głębokość wyrażoną w gramach, która automatycznie jest korygowana na podstawie aktualnego poziomu stopu w piecu. Otwarcie tłoka oraz uruchomienie zaworu inicjują napełnianie czerpaka do ustalonej wcześniej masy wtrysku w programie maszyny. Proces kończy się, gdy czujnik masy zarejestruje zadaną wartość masy stopu w pojemniku. Kolejne etapy to zamknięcie tłoka w czerpaku, transport w stronę komory

prasowania maszyny wysokociśnieniowej. Dozowanie rozpoczyna się po otrzymaniu sygnału gotowości maszyny i za pozycjonowaniu strzykawki. Zostaje otwarty tłok z wylotu zbiornika, a system reguluje ciśnienie, zwiększając stopniowo jego wartość, gwarantując efektywne i precyzyjne dozowanie.



Rys. 69. Poszczególne etapy napełniania systemu ciśnieniowego i dozowania ciekłego stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ do komory prasowania maszyny wysokociśnieniowej [61].

System wg opisu producenta umożliwiłby pobieranie stopu z pieca z pominięciem strefy stopu z powierzchni, dzięki zamkniętemu wlotowi (Rys. 70a). Zmieniający się poziom ciekłego stopu jest każdorazowo monitorowany przez tensometr. Możliwe jest ustawienie pobierania z określonej wysokości pieca, pomijając dno (Rys. 70b) z parametrem wyrażonym w gramach.



Rys. 70. Brak kolizji przy zastosowaniu systemu AVDF przy minimalnym poziomie stopu w piecu podgrzewczym dzięki wlotowi umieszczonemu na dole czerpaka.

Dana cecha systemu spełnia główne założenie projektu. Dodatkowo zbiornik z otworem wlotowo-wylotowym, pobiera stop z komory czerpalnej pieca podgrzewczego w pozycji pionowej, ograniczając ruch w płaszczyźnie poziomej w komorze czerpanej. Nie wymaga to zmian w konstrukcji pieca, opcjonalnie samo okno czerpane może zostać zmniejszone przez dodatkową klapę w celu ograniczenia strat ciepłych.

Producent nie posiadał w ofercie systemu dozowania o wartości wtrysku 40 kg. Dostępne urządzenia producenta oferowały maksymalną pojemność dozowania do 25 kg. Zdecydowano się na współpracę i testowanie prototypowego systemu dozowania o pojemności 40 kg dedykowanego dla Nemak Polska. Zdecydowano o przeprowadzeniu testów pilotażowych. Główne elementy systemu producenta zostały zaprojektowane wg narzuconych wymogów Nemak Polska. Zmiana systemu z łyżki automatycznej na nowy system wg producenta nie wymagała żadnej zmiany konstrukcyjnej pieca ani lokalizacji w obrębie komory strzałowej. System miał możliwość podłączenia do istniejącego aktualnego 6-osioowego manipulatora wykorzystanego do systemu łyżki automatycznej.

System cechuje się większą złożonością pod kątem ilości elementów niż system automatycznej łyżki dozującej. Urządzenie, oprócz niewielkiej szafy pneumatycznej, nie wpływa na wymóg zmiany celi odlewniczej i nie utrudnia dostępu do pieca podgrzewczego. Obsługa systemu jest intuicyjna i umożliwi szybsze dobieranie masy wtrysku i zapisanie receptur dla projektów. Ponadto cały cykl dozowania jest kontrolowany w 5 etapach (pozycjonowanie zbiornika, proces napełniania, transport do i z pieca oraz dozowanie) - Rys. 71.

Podajnik metalu	Prędkość	Kąt
Pobranie	9.0 %	
Pobieranie automatyczne		-18.5 °
Pobieranie rozgrzewania		-18.5 °
Przesuw w przód	30.0 %	
Start przesuwu synch.		0.0 °
Wprowadzanie 1	90.0 %	
Wprowadzanie 2	20.0 %	35.0 °
Wprowadzanie 3	35.0 %	65.0 °
Stop wsadu		0.0 °
Przesuw w tył	50.0 %	



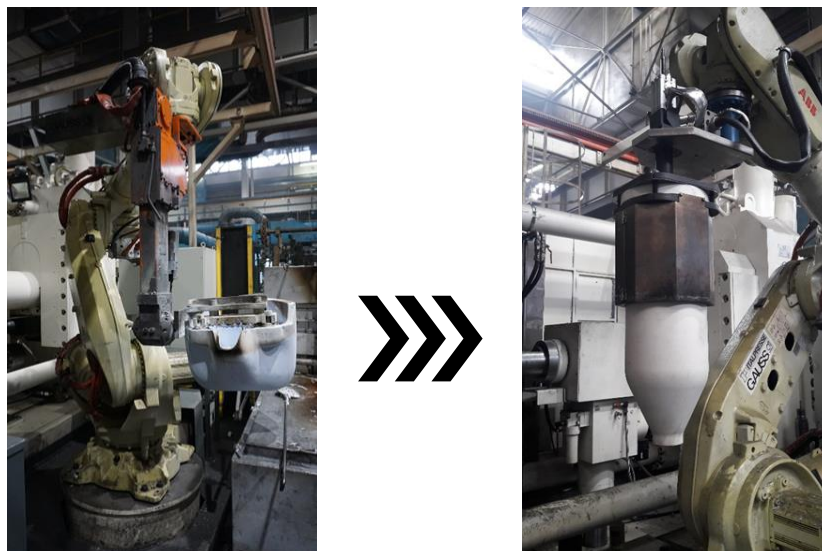
a)

b)

Rys. 71. Możliwości obsługi poszczególnych parametrów dla systemu dozowania: a) łyżki automatycznej (jedynie kąt przechyłu łyżki) b) AVD system (pozycjonowanie w piecu, pobieranie stopu, transport, dozowanie).

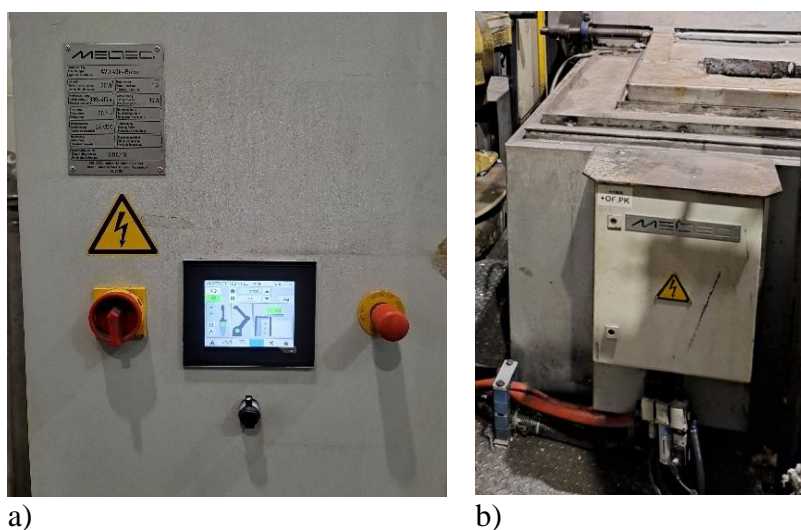
8.4 Instalacja systemu dozowania

Instalacja systemu rozpoczęła się od zamiany 7 osi robota dozującego (Rys. 72). Na miejsce automatycznej łyżki zalewowej, zamontowano czerpak do podciśnieniowego dozowania stopu o pojemności 40 kg.



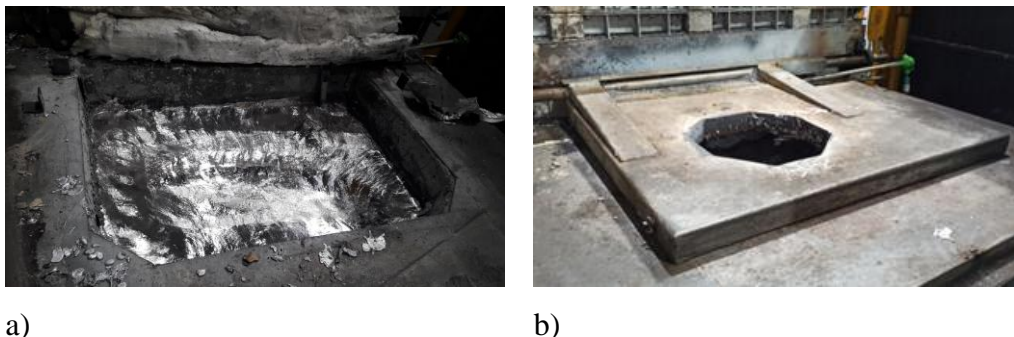
Rys. 72. Zamiana 7 osi robota z automatyczną łyżką zalewową na system czerpaka do podciśnieniowego dozowania stopu.

Na stanowisku celi maszyny odlewniczej ustawiono oraz podłączono szafę zasilającą z panelem kontrolnym systemu (Rys. 73a). Szafa została zintegrowana z szafą pneumatyczną sterującą tłoczyskiem czerpaka oraz sterującą ciśnieniem w czasie pobierania stopu z pieca, transportu oraz dozowania (Rys. 73b). Doprowadzono zasilanie elektryczne oraz sprężone powietrze. Wymianę sygnałów między maszyną odlewniczą, a systemem dozowania zrealizowano poprzez interfejs komunikacyjny Profinet.



Rys. 73. Szafy systemu dozowania: a) sterująca b) pneumatyczna.

Okno czerpalne pieca podgrzewczego zostało zmniejszone poprzez dedykowaną, izolowaną osłonę dopasowaną kształtem do nowego czerpaka, ponieważ system dozowania umożliwia ruch pionowy w czasie zanurzenia czerpaka w ciekłym stopie - Rys. 74. Dzięki temu rozwiązaniu ograniczono straty ciepłe.



Rys. 74. Okno czerpalne pieca podgrzewczego: a) przed modernizacją b) po modernizacji.

Gotowy system skalibrowano pod kątem tensometru (urządzenia ważącego) i zaprogramowano ścieżkę ruchu robota pomiędzy piecem, a komorą prasowania. Na Rys. 75 przedstawiono widok celi maszyny odlewniczej z obszarem dozowania stopu i gotowym systemem dozowania AVD.



Rys. 75. Gotowy system dozowania do kalibracji oraz testów zanurzania w piecu podgrzewczym.

Zweryfikowano sekwencje elementów systemu od procesu zanurzenia w piecu (Rys. 76a), po proces napełnienia (Rys. 76b), transport zbiornika w dwóch kierunkach i dozowanie nad komorę strzałową pieca (Rys. 76c). Wszystkie sygnały wymieniane pomiędzy maszyną odlewniczą a systemem dozowania zostały sprawdzone, przeprowadzono obowiązkowy test funkcjonowania systemów bezpieczeństwa.



a)



b)

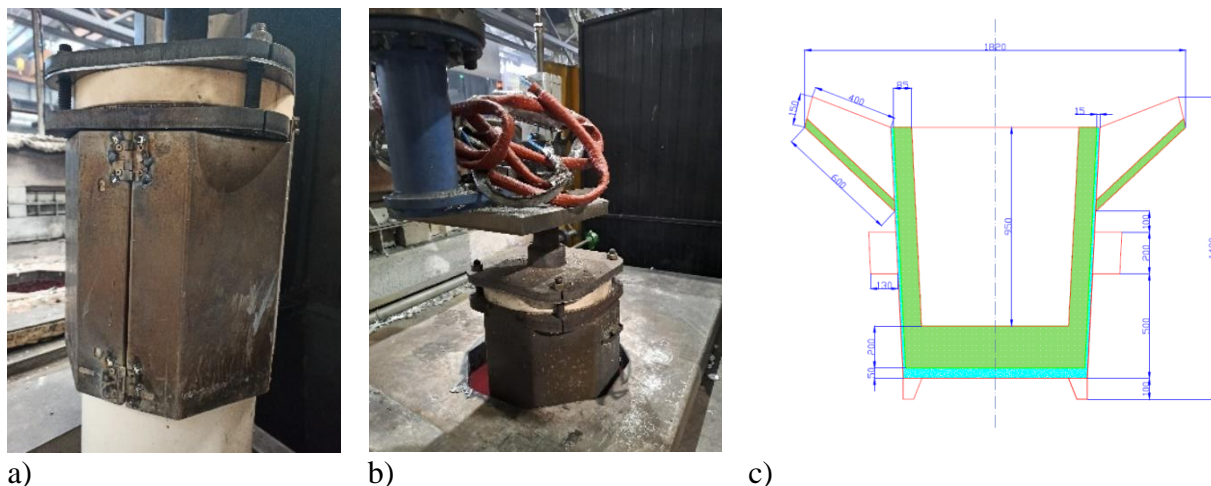


c)

Rys. 76. Programowanie i weryfikacja poszczególnych etapów procesu dozowania: a) pozycjonowanie systemu nad piecem, kalibracja jednostki ważącej, b) zanurzenie i proces napelniania c) transport oraz dozowanie stopu do komory strzałowej.

Gotowy system dozowania wymagał wyboru odpowiedniego zakresu głębokości, z jakiej będzie pobierany stop. Według ustaleń system ma możliwość pobierania ciekłego stopu zawsze z jednej wybranej głębokości/lub zakresu niezależnie od zmieniającego się poziomu stopu w piecu. Głębokość zanurzenia ustalano na 40-50% wysokości komory czerpalnej. Dany zakres głębokości wynikał z dwóch ograniczeń:

- a) 40% - kwestia logistyki i limitacji technicznej uzupełniania pieców podgrzewczych. Minimalny poziom objętości w piecu musiał wynosić całkowitą obojętność przynajmniej jednej całkowitej kadzi o pojemności <math><1000\text{ kg}</math>.
- b) 50% - konstrukcja zbiornika. Maksymalne zanurzenie zbiornika w ciekłym stopie, bez zanurzenia osłony termicznej (Rys. 77a) umożliwia zanurzenie zbiornika bez uszkodzenia osłony termicznej przy maksymalnym wypełnieniu pieca (Rys. 77b).



Rys. 77. Dobór zakresu głębokości dla procesu odlewania zależy od a) osłona termiczna na ceramicznej strzykawce AVD, b) max głębokość zanurzenia zbiornika przy maksymalnym poziomie stopu w piecu, c) pojemność kadzi $< 1000 \text{ kg}</math> determinująca maksymalne zanurzenie zbiornika przy zmieniającym się poziomie ciekłego stopu.$

8.5 Pierwszy test instalacji – ocena systemu dozowania

System na początku przetestowano w trybie manualnym. Wykonano test powtarzalności poboru ciekłego stopu (Rys. 78a). Masa wtrysku została zredukowana z 40 kg do 38 kg (optymalizacja układu wlewowego oraz konstrukcji odlewu). Wyniki 3 testów (12 cykli w serii) systemu wskazywały na powtarzalność $< \pm 60 \text{ g}</math> na wtrysk, co w porównaniu do łyżki jest 2 razy niższym wynikiem. Wyniki zweryfikowano na odlanych 4 testowych wlewkach (Rys. 78b). Polegało to dozowaniu stopu do komory strzałowej bez następującego wtrysku do formy (krzepnięcie nastąpiło w komorze strzałowej), jest to standardowa procedura Firmy. Prędkość pobierania ciekłego stopu z pieca ustawiono na 1-1.25 kg/s w celu uniknięcia zagazowania. Natomiast prędkość dozowania została oszacowana na $> 4 \text{ kg/s}</math>, co jest dwukrotnie wyższym wynikiem niż w przypadku konwencjonalnej łyżki dozującej.$$



Rys. 78. Weryfikacja dozowania: a) test powtarzalności, b) pomiary na odlanych wlewkach.

Stożkowy kształt strzykawki oraz dolne umiejscowienie wylotu (Rys. 79b), umożliwiło pozycjonowanie zbiornika bezpośrednio nad otworem wlewowym komory, a nie z boku jak w przypadku łyżki dozującej (Rys. 79a). Precyzja dozowania została zwiększona w czasie całego procesu dozowania. Stopniowo zwiększane ciśnienie wewnątrz zbiornika podczas dozowania zapewnia ciągłość strugi. Cały cykl dozowania został przyspieszony względem konwencjonalnego systemu o 30-50 % dla zakresu 25-40 kg.



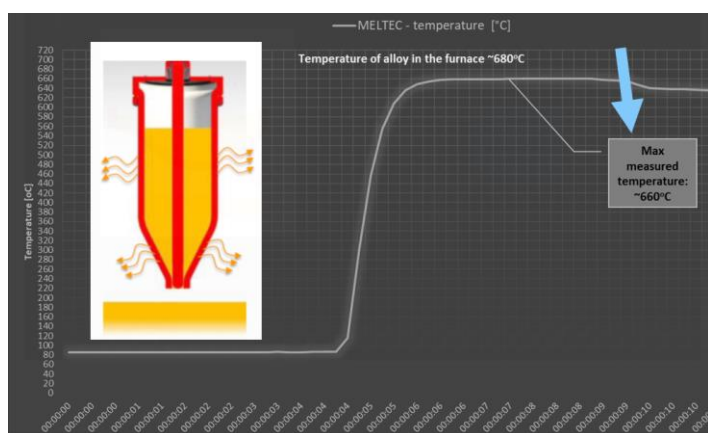
a)



b)

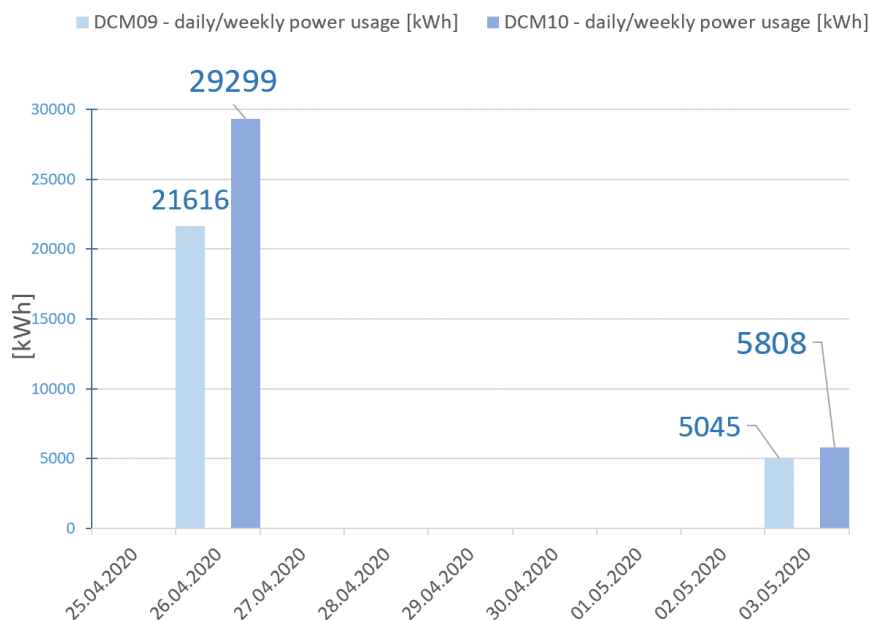
Rys. 79. Proces dozowania ciekłego stopu do komory strzałowej. Minimalna odległość między krawędzią komory a wylotem czerpaka: a) automatyczna łyżka dozująca, b) nowy system dozowania.

W celu uzyskania odpowiedniej temperatury startowej (przed pierwszą fazą ruchu tłoka), wykonano pomiar temperatury ciekłego stopu za pomocą termopary. Według danych technologicznych temperatura ciekłego stopu musiała zostać obniżona o 20 °C w celu uzyskania tych samych warunków jak w przypadku automatycznej łyżki dozującej (Rys. 80).



Rys. 80. Ograniczenie strat cieplnych w systemie dozowania AVD, dzięki zamkniętej konstrukcji czerpaka umożliwiło obniżenie temperatury ciekłego stopu o 20°C względem łyżki automatycznej [61].

Po zastosowaniu izolowanej pokrywy pieca i ograniczeniu powierzchni kontaktu z otoczeniem oraz zmniejszeniem temperatury na piecu podgrzewczym, zużycie energii elektrycznej zostało zredukowane o 10-25 % względem wcześniejszego rozwiązania - Rys. 81.



Rys. 81. Redukcja strat ciepłych w okresie: przerwy technologicznej oraz 3-dniowej przerwy pracy maszyny.

System nie wydłużył czas cyklu całego dozowania, ale dał realne możliwości jego skrócenia. Nie wykonano tego procesu ze względu na wpływ na inne procesy, wykonywane w tym samym czasie w celi odlewniczej. Każda zmiana mogłaby naruszyć stabilność procesu. Po odbiorze technicznym urządzenia przegotowano się do testów w standardowym procesie odlewniczym z naciskiem na badania jakości odlewów.

8.6 ETAP 3 – weryfikacja wdrożonego systemu dozowania w odlewaniu seryjnym

Po wdrożeniu nowego systemu dozowania wykonano kolejny eksperyment przemysłowy. Celem było sprawdzenie, czy dane rozwiązanie zwiększy stabilność właściwości mechanicznych stopu przy spełnieniu nowych wymagań Klienta. Stop wykorzystany do eksperymentu AlSi9Cu3(Fe), zawierał maksymalną dopuszczalną ilość złomu obiegowego w objętości 70 %. Po odczekaniu ~10 h i osiągnięciu parametrów produkcyjnych maszyny odlewniczej odlano 1 partię 23 odlewów. Był to moment, gdy system dozujący zaalarmował o osiągnięciu ustawionego minimum możliwego do pobrania z pieca, czyli 40-50 % wysokości komory czerpanej. Piec uzupełniono nową partią stopu i również odlano kolejne 23 odlewy. Daną procedurę powtórzono w sumie 5 razy, uzyskując 5 partii po 23 sztuki. Na początku oraz każdorazowo przed ponownym wypełnieniem pieca, pobrano próbkę na skład chemiczny oraz indeks gęstości – Tab. 17.

Tab. 17. Wyniki składu chemicznego stopu w piecu podgrzewczym w czasie eksperymentu.

Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Wysoki poziom stopu	86,73	8,64	0,8	3,27	0,3	0,23	0,03	2,15
Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Nowy najniższy poziom stopu - koniec partii 1	86,63	8,73	0,82	3,27	0,28	0,23	0,04	2,02
Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Nowy najniższy poziom stopu - koniec partii 2	86,83	8,61	0,8	3,22	0,27	0,23	0,04	2,2
Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Nowy najniższy poziom stopu - koniec partii 3	86,76	8,63	0,83	3,21	0,29	0,24	0,04	2,17
Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Nowy najniższy poziom stopu - koniec partii 4	86,65	8,72	0,83	3,23	0,28	0,25	0,04	2,15
Czynnik	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Pb	Indeks gęstości [%]
Nowy najniższy poziom stopu - koniec partii 5	86,71	8,61	0,84	3,26	0,29	0,25	0,04	2,11

Indeks gęstości dla wszystkich partii był zbliżony do poprzedniego testu i mieścił się w zakresie 2,02-2,2 %. Zawartość składników stopowych: Al, Si, Fe, Cu, Mn oraz Mg była na również na podobnym poziomie. Jedyna zaobserwowana różnica dotyczyła zawartości Pb i dotyczyła różnicy pomiędzy 1 partią (0,03 %), a pozostałymi partiami (0,04 %).

Tab. 18. Wyniki statycznej próby rozciągania dla pięciu odlewów z początku oraz zakończenia eksperymentu.

1 partia			
	Próbka	Rm [MPa]	A [%]
	1	215	1,11
	2	217	1,15
	3	223	1,26
	4	216	1,08
	5	217	1,11
Wartość średnia		218	1,14
Wartość MIN		215	1,08
Wartość MAX		223	1,26
Odchylenie standardowe		2,8	0,06

2 partia			
	Próbka	Rm [MPa]	A [%]
	1	218	1,28
	2	212	1,10
	3	215	1,20
	4	215	1,18
	5	219	1,23
Wartość średnia		216	1,20
Wartość MIN		212	1,10
Wartość MAX		219	1,28
Odchylenie standardowe		2,5	0,06

a)

3 partia			
	Próbka	Rm [MPa]	A [%]
	1	221	1,21
	2	213	1,04
	3	212	1,18
	4	217	1,15
	5	213	1,10
Wartość średnia		215	1,14
Wartość MIN		212	1,04
Wartość MAX		221	1,21
Odchylenie standardowe		3,4	0,06

b)

4 partia			
	Próbka	Rm [MPa]	A [%]
	1	218	1,11
	2	212	1,06
	3	217	1,13
	4	212	1,06
	5	214	1,19
Wartość średnia		215	1,11
Wartość MIN		212	1,06
Wartość MAX		218	1,19
Odchylenie standardowe		2,5	0,05

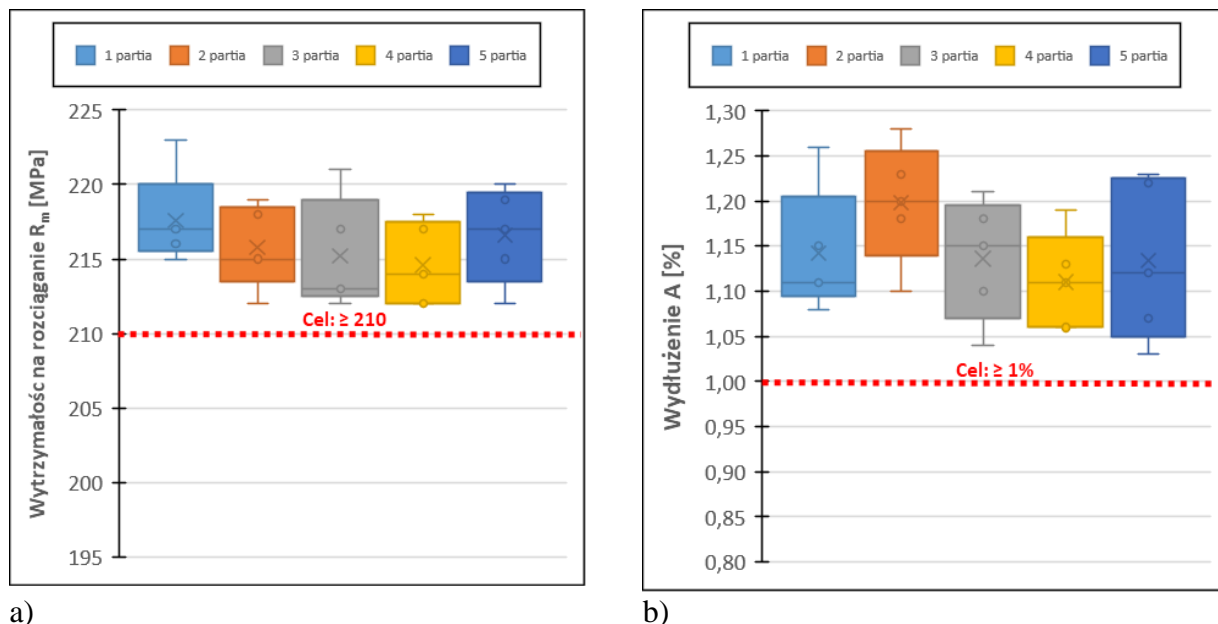
c)

d)

5 partia			
	Próbka	Rm [MPa]	A [%]
	1	220	1,22
	2	212	1,12
	3	217	1,23
	4	215	1,07
	5	219	1,03
Wartość średnia		217	1,13
Wartość MIN		212	1,03
Wartość MAX		220	1,23
Odchylenie standardowe		2,9	0,08

e)

Z każdej z 5 partii wyznaczono po 5 odlewów do statycznej próby rozciągania, aby zweryfikować cały zakres głębokości, na jaki system dozujący zastał zaprogramowany. Procedura przygotowania próbek, lokalizacja ich wycięcia oraz metoda badawcza została opisana w rozdziale 7. Po przeprowadzeniu badań zestawiono właściwości mechaniczne w Tab. 18 oraz na Rys. 82.



Rys. 82. Zestawienie wyników właściwości mechanicznych dla 5 kolejnych partii odlewów w czasie z nowym systemem dozowania: a) R_m , b) A_5 .

Każdy z zarejestrowanych wyników spełniał minimalne wymagania dla wytrzymałości oraz wydłużenia dla nowych wymagań.

Zastosowanie nowego systemu dozowania ograniczyło negatywny wpływ Pb i zapewniło wymagany przez Klienta poziom właściwości mechanicznych.

9 Podsumowanie i wnioski

Praca jest odpowiedzią na zapotrzebowanie Klienta Nemark Polska. Jej głównym celem było opracowanie procesu technologii odlewania wysokociśnieniowego oraz produkcji seryjnej obudowy korpusu (bloku) silnika spalinowego ze stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)). W odróżnieniu od dotychczas stosowanej technologii ww. odlewy miały być wykonywane z zastosowaniem 60-70 % złomu obiegowego oraz powinny się charakteryzować wytrzymałością na rozciąganie $R_m \geq 210 \text{ MPa}$ i wydłużeniem $A_5 \geq 1 \%$, wyższymi od dotychczas produkowanych.

Analiza danych z lat 2017-2019 wykazała, że produkowane w tym okresie odlewy nie spełniały nowych wymagań narzuconych ze strony Klienta. Zakresy przedstawionych wartości średnich dla wytrzymałości na rozciąganie (R_m) wynosiły 200-216 MPa, natomiast dla wydłużenia (A_5) 0,86-1,25 %. Oznaczało to, że jest możliwe uzyskanie ww. wymagań Klienta.

W niniejszej pracy zrealizowano trzy cele badawczo-technologiczne. Dokonano analizy wpływu poszczególnych etapów procesu technologicznego na jakość odlewów i określono czynniki wpływające na poziom właściwości mechanicznych. Nowatorstwo przeprowadzonych badań polega na wykorzystaniu ilościowych i jakościowych metod badań struktury, które umożliwiły zidentyfikowanie, a następnie rozwiązanie problemu, jakim były niewystarczające właściwości mechaniczne stopu. Oryginalnym, technologicznym rozwiązaniem było także zaproponowanie i wdrożenie nowego innowacyjnego systemu dozowania ciekłego metalu.

Badania podzielono na trzy etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono badania oceny wpływu złomu obiegowego na strukturę i właściwości odlewów ze stopu AlSi9Cu3(Fe). Wykonano dwa wytopy. Pierwszy zawierał 20 %, natomiast drugi 70 % złomu obiegowego. Nie zaobserwowano istotnych różnic w składzie chemicznym obu wytopów. Wykazano, że mikrostruktura stopu, niezależnie od wytopu, składa się głównie z dendrytów roztworu stałego $\alpha\text{-Al}$ oraz mieszaniny eutektycznej $\alpha\text{-Al}+\beta\text{-Si}$. Krzem eutektyczny przyjmuje morfologię płytkowych lub iglastych wydzieleni, charakterystyczną dla stopów niemodyfikowanych Na lub Sr. Ponadto w stopie występują wydzielenia faz: $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$, $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_5$, $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ oraz $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. W obu wytopach obserwowano również niewielkie ilości cząstek z ołowiem.

Uzyskane właściwości mechaniczne przy maksymalnym udziale (70 %) złomu obiegowego spełniają nowe wymagania Klienta $R_m > 200 \text{ MPa}$ oraz $A_5 > 1\%$ w danym eksperymencie, uwzględniając obróbkę cieplną.

Uznano, że zaniżone właściwości mechaniczne, które zostały stwierdzone podczas analizy wstępnej, mają inną przyczynę. Przeprowadzono więc badania w drugim etapie związane z drugim

niestabilnym parametrem, jakim jest poziom ciekłego stopu w piecu podgrzewczym w czasie odlewania oraz przestojami w produkcji. Wykazano, że udział objętościowy i liczba cząstek ołowiu jest zależna od poziomu ciekłego metalu w piecu i wzrasta wraz ze zmniejszaniem się ilości stopu. Przy najmniejszym dopuszczalnym poziomie (~15 %) udział tych cząstek jest prawie dwukrotnie większy niż przy piecu zapełnionym w 100%. Skutkuje to obniżeniem właściwości mechanicznych i niespełnieniem wymagań Klienta.

Celem ostatniego etapu było opracowanie systemu dozowania, który ograniczyłby wpływ ciężkich pierwiastków stopowych na właściwości wytrzymałościowe stopu. Przeanalizowano różne rozwiązania i zastosowano system podciśnieniowego dozowania ciekłych stopów aluminium (AVD - Aluminium Vacuum Dosing). W ramach etapu dobrano parametry procesu i przeprowadzono próby weryfikujące. Stwierdzono, że cel został osiągnięty. Ograniczono wpływ ołowiu i uzyskano poziom właściwości mechanicznych wymagany przez Klienta.

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Mikrostruktura stopu $AlSi9Cu3(Fe)$ niezależnie od zawartości złomu obiegowego składa się z dendrytów roztworu stałego $\alpha-Al$ oraz mieszaniny eutektycznej $\alpha-Al+\beta-Si$. Ponadto w stopie występują wydzielena faz: $\theta-Al_2Cu$, $Al_5Mg_8Cu_2Si_5$, $\alpha-Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$, $\beta-Al_5FeSi$ oraz cząstek ołowiu.
2. Zawartość złomu obiegowego w wytopie nie wpływa na właściwości mechaniczne odlewów bloku silnika. Jest to efekt stosowania wysokiej jakości złomu, który pochodzi tylko wyłącznie z produkcji Nematik Polska.
3. Poziom ciekłego stopu w piecu podgrzewczym ma bardzo istotne znaczenie dla poziomu właściwości mechanicznych. Zbyt mała ilość ciekłego metalu wpływa na wzrost udziału objętościowego cząstek ołowiu i obniżeniem właściwości mechanicznych, co skutkuje niespełnieniem wymagań Klienta ($R_m > 200$ MPa oraz $A_5 > 1$ %).
4. Zastosowanie nowego podciśnieniowego systemu dozowania ciekłych stopów aluminium ograniczyło negatywny wpływ Pb i zapewniło wymagany przez Klienta poziom właściwości mechanicznych odlewów.

Podsumowując, w ramach prowadzonych badań wykazano, że niewłaściwy poziom właściwości mechanicznych odlewów związany był ze zbyt dużą zawartością ołowiu, gdy w piecu podgrzewczym była niewielka ilość ciekłego metalu. Identyfikacja problemu pozwoliła na zaprojektowanie i wdrożenie innowacyjnego systemu dozującego, co zapewniło uzyskanie wymaganego poziomu właściwości mechanicznych ($R_m \geq 210$ MPa i $A_5 \geq 1$ %).

10 Bibliografia

- [1] J. Reiland, L. Bax, M. Lerdes. A vision on the future of automotive lightweighting, Alliance, Bax & Company, 2020
- [2] E. Hermes, New CO2 Emission Regulations in Europe: A perfect storm for car manufacturers, The View - Economic Research, 2019
- [3] The international council on clean transportation, Passenger car emissions and consumption, normalized to WLTP, dostęp 05.2019, <https://theicct.org/pv-fuel-economy/>
- [4] F. Czerwinski, Current Trends in Automotive Lightweighting Strategies and Materials Materials 2021, 14, 6631, doi 10.3390/ma14216631
- [5] Z. Yang, Fuel-efficiency technology trend assessment for LDVs in China: Vehicle technology, International Council on Clean Transportation, 2018, 16
- [6] M. Goede, Super Light Car-lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration, European Conference of Transport Research Institutes, 1:5-10, 2009, doi: 10.1007/s12544-008-0001-2
- [7] M. Kiani, H. Shiozaki, K. Motoyama, Simulation-based design optimization to develop a lightweight Body-In-White structure focusing on dynamic and static stiffness, International Journal of Vehicle Design, 2015, s: 1-18, doi: 10.1504/IJVD.2015.069467
- [8] M. Tisza, I. Czinego, Comparative study of the application of steels and aluminum in lightweight production of automotive parts, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, s: 229-238
- [9] A. Kelkar, R. Roth, J. Clark, Automobile Bodies: Can Aluminum be an Economical alternative to steel, JOM, 53 (8), 2001, s: 28-32
- [10] R. Dańko, W. Kowalczyk, New trends in cold-chamber die casting machine design, Overseas Foundry, Vol. 12 No 4, 2015, s: 305-309
- [11] W. Moćko, Z. L. Kowalewski (2012), Dynamic properties of aluminum alloys used in automotive industry, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 19 No. 2, 2012, s: 345-351
- [12] European Aluminum Association, Unlocking the light-weighting potential, Aluminum in cars, 2020
- [13] Dunker Worldwide, Aluminum Content in Cars, European Aluminum, 2016
- [14] Ducker Frontier, Aluminum content in European passenger cars, 2019
- [15] J. R. Hirsch, (2014), Automotive Trends in Aluminum – The European Perspective, Materials Forum, Vol 28, 2004, s: 15-23
- [16] M. Hartlieb, The Electrification of Light Vehicles and Its Impact on the Aluminum Die Casting Market, DIE CASTING ENGINEER, 05, 2017, s: 10-14
- [17] T. A. Baser, E. Umay, V. Akinci, New Trends in Aluminum Die Casting Alloys for Automotive Applications, ISRES Publishing, Vol. 21, 2022, s: 79-87, ISSN: 2602-3199
- [18] A. Monre, Porosity in die castings: an overview and analysis, North American Die Association, #511, 2011
- [19] North American Die Casting Association: Introduction to die Casting #101BK, 2007

- [20] L. Bushi, T. Skszek, Comparative LCA Study of Lightweight Auto parts of MMLV Mach-I Vehicle as per ISO 14040/44 LCA Standards and CSA Group 2014 LCA Guidance Document for Auto Part Toronto ON Canada, Comparative LCA Study of the Magna, 2015
- [21] R. Beals, J. Conklin, T. Skszek, M. Zaluzec, D. Wagner, Aluminum High Pressure Vacuum Die Casting Applications For The Multi Material Lightweight Vehicle Program (MMLV) Body Structure, Light Metals, 2015, s: 215-221
- [22] M. K. Kallas, Multi-directional unibody casting machine for a vehicle frame and associated methods, patent US20190217380, 2019
- [23] J. Cui, H. J. Roven, Recycling of automotive aluminum, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol 20, 2010, s: 2057-2063
- [24] G. Romach, B. Friedrich, Future potential and limits of aluminum recycling, Proceedings of EMC, 2001
- [25] J. Dańko, Maszyny i urządzenia do odlewania pod ciśnieniem. Podstawy teorii-konstrukcja-pomiary i eksploatacja, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2000, ISBN 83-88770-10-1
- [26] North American Die Casting Association: Introduction to die Casting #101BK, 2016
- [27] A. Białobrzęski, Maszyny, urządzenia, technologia odlewania ciśnieniowego cz. I, Instytut odlewnictwa w Krakowie, 1984
- [28] A. Białobrzęski, Maszyny, urządzenia, technologia odlewania ciśnieniowego cz. II, Instytut odlewnictwa w Krakowie, 1984
- [29] J. Campbell, Complete Casting Handbook Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Sedin, Elsevier Ltd, 2015, ISBN: 978-0-444-63509-9
- [30] D. Lehmkus, Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends- Part I: Changing Markets, Changing Products, MDPI Materials, Metals, Vol 12-1959, 2022, doi: 10.3390/met12111959
- [31] P. K. Shurkin, N. A. Blov, A. F. Musin, A. A. Aksenov, Novel High-Strength Casting Al-Zn-Mg-Ca-Fe Aluminum Alloy without Heat Treatment., Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, Vol. 61, No. 2, pp. 179–187, doi: 10.3103/S1067821220020121
- [32] G. Schuh, G. Bergweiler, L. Dworog, F. Fiedler, Chancen und Risiken von Mega-Casting in der Fahrzeugproduktion Die Karosserie aus dem Aluminium-Druckguss, Titelthema – Fachaufsatz, WT Werkstattstechnik BD., Vol. No. 9, 2022, doi: 10.37544/1436-4980-2022-09-52
- [33] D. Park, J. Park, N. Kim, A Method for Straightening Distorted Giga-Cast Large Thin-Walled Components, Material MDPI, Materials 2024, Vol 17 no. 2241, 2024, doi: 10.3390/ma17102241
- [34] P. Burggraf, G. Bergweiler, S. Kehrer, T. Krawczyk, F. Fiedler, Mega-casting in the automotive production system: Expert interview-based impact analysis of large-format aluminium high-pressure die-casting (HPDC) on the vehicle production, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 124 2024, s: 918-935, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.06.028
- [35] M.P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems, Wiley; 2012, ISBN: 978-1-118-231463
- [36] E. J. Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, John Wiley & SONS, INC, 2003, ISBN 0-471-20131-6
- [37] R. Lumley, Fundamentals of aluminum metallurgy: Production, processing and applications, Woodhead Publishing Limited, 2011, ISBN: 978-0-85709-025-6
- [38] A. Fajkiel, Wybrane Zagadnienia Technologii Odlewania Ciśnieniowego, Instytut Odlewnictwa Kraków, 2002, ISBN: 83-88700-10-1

- [39] D. Apelian, M.M. Makhlouf, High Integrity Aluminum Die Casting: Alloys, Processes & Melt preparation, North American Die Casting Association, #307, 2006
- [40] P. Dudek, Zastosowanie technologii prasowania w stanie ciekłym do otrzymania odlewów ze stopów aluminium, Prace instytutu odlewnictwa, vol. LVII no. 3, 2017, doi: 10.7356/iod.2017.19
- [41] S. Udavardy, Die Casting: Handbook, North American Die Casting Association, #G200, 2015
- [42] R. Cibis, A. Kiełbus, Odlewanie ciśnieniowe stopów magnezu metodą gorącomórkową, Archiwum Odlewnictwa, Vol. 6 no. 18, 2006, s:179-184, ISSN 1642-5308
- [43] P. Kapranos, D. Brabazon, S. P. Midson, S. Naher, T. Haga, Advanced Casting Methodologies: Inert Environment Vacuum Casting and Solidification, Die Casting, Compcasting, and Roll Casting, Elsevier, Comprehensive Materials Processing, Vol. 5, 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00503-3
- [44] T. Heinemann, Energy and Resource Efficiency in Aluminium Die Casting, Springer International Publishing Switzerland 2016, ISBN 978-3-319-18815-7, doi: 10.1007/978-3-319-18815-7
- [45] J. L. Jorstad, D. Apelian, High Integrity Die Casting: Sound, Reliable & Heat Treatable, North American Die Casting Association #404, 2008
- [46] Zdjęcie maszyny odlewniczej – IDRA – <https://www.idragroup.com/> - dostęp 01.2024
- [47] H.E. Friedrich, B.L. Mordike, Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications, Springer, 2006, ISBN-10 3-540-20599-3
- [48] M. G. Mahmoud, A. Abdelghany, S. Salem, Numerical Simulation of Door Lock Plates Castings Produced by High Pressure Die Casting process, International Journal of Metalcastig, Vol. 17, 2023, s: 847-859, doi: 10.1007/s40962-022-00797-7
- [49] D. Twarog, D. Apelian, A. Lou, High Integrity Casting of Lightweight Components, North American Die Casting Association #307, 2016
- [50] A. Fabrizi, S. Ferraro, G. Timelli, The influence of Sr, Mg and Cu addition on the microstructural properties of secondary AlSi9Cu3(Fe) die casting alloy, Materials Characterization, vol. 85, 2013, s: 13-25, doi: 10.1016/j.matchar.2013.08.012
- [51] H. Andoa, Optimization of Ladle Tilting Speed for Preventing Temperature Drops in the Die Casting Process, Journal of Casting & Materials Engineering, Vol. 6 No. 4, 2022, s: 69–75, doi: 10.7494/jcme.2022.6.4.69
- [52] W. Kowalczyk, R. Dańko, Analiza rozwoju systemów dozowania stopów aluminium w zimnokomorowych maszynach ciśnieniowych, Archives of Foundry Engineering, vol. 15 no. 4, 2015, ISSN 1887-3310
- [53] F. Pasche, Interaction between liquid aluminium and solid iron. Al-rich intermetallics formation, thesis France, no. 6044, 2013
- [54] ItalPressGauss - <https://www.italpressegauss.com/die-casting-machines/automated-cells/pouring-technologies> - dostęp 06.2024
- [55] Pyrotek - <https://www.pyrotek.com/primary-solutions/aluminium/foundry/show/ProductLine/foundry-holding-furnaces>- dostęp 06.2024
- [56] STØTEK DANMARK APS, Operating Manual Dosotherm, 2010
- [57] STØTEK DANMARK APS
<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=Q36bKQVESpE> - dostęp 08.2022

- [58] StrikoWestofen Westomat - <https://hormesa-mexico.com/dosing-furnace-westomat/> - dostęp 08.2024
- [59] Instrukcja obsługi pieca SW Westomat DO-BE1288-1-B
- [60] Meltec Industrieofenbau GmbH - <https://www.meltec.at/en/products/aluminium/overview> - dostęp 01.2019
- [61] Roger Rapp, IMA World Magnesium Conference 2017
New and innovative Mg vacuum dosing system Singapore, 23.05.2017
- [62] K. Przybyłowicz, J. Przybyłowicz, *Materiałoznastwo w pytaniach i odpowiedziach*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2000
- [63] A. Jayakumar, *Lightweight and sustainable materials—a global scenario*, Chapter 1, Preparation, Properties and Applications
2023, s:1-18 doi: 10.1016/B978-0-323-95189-0.00001-9
- [64] Norma PN-EN 1706:2020 - Aluminium i stopy aluminium - Odlewy - Skład chemiczny i własności mechaniczne
- [65] Razin A. A., Ahammed D. S., Nur M. A., Kaiser M. S, Role of Si on machined surfaces of Al-based automotive alloys under varying machining parameters, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, Vol. 6(46), No. 1, 2022, s: 43-52, doi: 10.30464/jmee.2021.6.1.43
- [66] D. Raabe, D. Ponge, P. J. Uggowitzer, Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys, *Progress in Materials Science*, Vol. 128, 2022, ISSN 0079-6425, doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.100947.
- [67] T. Szymczak, Wpływ Cr, Mo, V i W na proces krystalizacji i właściwości mechaniczne siluminów podeutektycznych, *Politechnika Łódzka*, 2019, ISBN 978-83-7283-994-7, doi: 10.34658/9788372839947
- [68] J. Šerák, D. Vojtěch, M. Reiser, Influence of Sn, Pb, Bi and Sb on the Microstructure and Mechanical Properties of Commercial AlSi8Cu2 Alloy, *Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 4, 2019, ISSN 1213–2489
- [69] Ł. Poloczek, A. Kiełbus, B. Dybowski, Influence of Sr addition on the microstructure and properties of HPDC EN-AC AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Key Engineering Materials*, Vol. 682, 2016, s: 69-76, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.682.69
- [70] G. Timelli, A. Fabrizi, S. Vezzu, A. D. Mori, Design of Wear-Resistant Diecast AlSi9Cu3(Fe) Alloys for High-Temperature Components, *Metals* 2020, Vol. 10(1), 2020, doi: 10.3390/met10010055
- [71] A. Fabrizi, S. Ferraro, G. Timelli, The influence of Sr, Mg and Cu addition on the microstructural properties of a secondary AlSi9Cu3(Fe) die casting alloy, *Materials Characterization*, Vol. 85, 2013, s: 13-25, doi: 10.1016/j.matchar.2013.08.012
- [72] Nematik - <https://www.recyclingtoday.com/news/nematik-asi-aluminum-certification-recycling-certification/> - dostęp 05.2021
- [73] Nematik - <https://www.nematik.com/pl/o-nas/> - dostęp 08.2023
- [74] Engine - <https://mercedesblog.com/mercedes-m254-and-m256-engines-prove-that-there-is-a-future-for-gasoline-engines/> - dostęp 06.2024
- [75] A. Monroe, Porosity in Die Castings An Overview and Analysis, *North American Die Casting Association*, #511, 2011
- [76] J. Brevick, S. Midson, *Die Casting Porosity Guidebook*, North American Die Casting Association, #513, 2019
- [77] W. Walkington, *Gas porosity, Guide to Correcting the Problems*, North American Die Casting Association, #516, 2006

- [78] S.Kirkman, S. Midson, Shrinkage Porosity, North American Die Casting Association, #518, 2015
- [79] D. Raabe, Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys, Progress in Materials Science, vol. 128, 2022, doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.100947
- [80] Meltec DTR - 8.02AVDF_PL02