

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ



ROZPRAWA DOKTORSKA

Poprawa jakości odlewów tłokowych wykonywanych
z siluminów okołoeutektycznych

mgr inż. Michał Starczewski

Promotor rozprawy

dr hab. inż. Anna Janina Dolata, prof. PŚ

Praca zrealizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy,
umowa Nr RJO15/SDW/001-53

Partnerem przemysłowym doktoratu była firma Złotecki Sp. z o.o.

Katowice, wrzesień 2025

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania

dr hab. inż. Annie Janinie Dolata, prof. PŚ

za poświęcony czas, wsparcie merytoryczne oraz wyrozumiałość okazywaną na wszystkich etapach realizacji pracy doktorskiej, a zwłaszcza na jej końcu.

Dziękuję również

dr hab. inż. Maciejowi Dyzia

za zaangażowanie, pomoc oraz możliwość czerpania wiedzy od tak otwartego i inspirującego umysłu.

Wyrazy wdzięczności kieruję do

Pana Michała Złoteckiego, Prezesa firmy Złotecki Sp. z o.o.,

za wsparcie udzielone w trakcie realizacji doktoratu oraz zrozumienie dla specyfiki prowadzonych badań.

Szczególne podziękowania składam

Kadrze, Koleżankom i Kolegom z firmy Złotecki Sp. z o.o.

za okazaną pomoc, zrozumienie potrzeb oraz przychylny odbiór prac związanych z doktoratem prowadzonych na terenie przedsiębiorstwa; w tym miejscu w sposób szczególny dziękuję **Panom Henrykowi Grabińskiemu i Sławomirowi Piechockiemu.**

Z głębi serca dziękuję mojej

Żonie Joannie

za cierpliwość, wyrozumiałość, nieustające wsparcie i wiarę w powodzenie tego przedsięwzięcia.

Na koniec dziękuję

Rodzinie i Przyjaciółom

za to, że byliście ze mną i wspieraliście mnie w najtrudniejszych momentach.

Spis treści

Streszczenie	5
Abstract.....	7
1. Przegląd literatury	9
1.1 Perspektywy produkcji tłoków do silników spalinowych w dobie promowanej elektryfikacji transportu.....	9
1.2 Aluminium i jego stopy	15
1.3 Odlewnicze stopy aluminium	19
1.3.1 Stopy aluminium stosowane w przemyśle motoryzacyjnym.....	20
1.3.2 Stopy aluminium stosowane w produkcji tłoków.....	23
1.4 Wady odlewnicze w odlewach ze stopów aluminium.....	28
2. Praca własna.....	35
2.1 Geneza problemu	35
2.2 Analiza procesu produkcyjnego.....	38
2.2.1 Wymagania jakościowe dotyczące produkcji tłoków	38
2.2.2 Surowiec do produkcji.....	41
2.2.3 Konstrukcja odlewu tłokowego i jej wpływ na powstawanie wad odlewniczych	42
2.2.4 Konstrukcja formy odlewniczej.....	50
2.3 Opis procesu produkcyjnego odlewów tłokowych	53
2.3.1 Przygotowanie stopu.....	53
2.3.2 Przygotowanie kokilarki	58
2.3.3 Przygotowanie formy	60
2.3.4 Odlewanie	63
2.4 Model procesu odlewania	65
3. Teza i cel pracy	69

4.	Zakres badań porównawczych materiałów wejściowych	70
4.1	Materiały do badań	71
4.2	Sposób pobierania i oznaczenia próbek	73
4.3	Zastosowane metody badawcze	74
5.	Wyniki badań i ich analiza	78
5.1	Analiza składu chemicznego	78
5.2	Badania twardości	80
5.3	Statyczna próba rozciągania	81
5.4	Badanie wtrąceń gruboziarnistych (K-test)	84
5.5	Badania lejności	87
5.6	Badania indeksu gęstości DI	90
5.7	Analiza termiczna	92
5.8	Podsumowanie fazy pierwszej badań	94
5.9	Modyfikacja stopnia zawodorowania stopu	99
5.10	Opracowanie procedury obrotu zawrotami produkcyjnymi	101
6.	Podsumowanie i wnioski	104
	Spis rysunków	106
	Spis tabel	109
	Bibliografia	110

Streszczenie

Głównym celem pracy była identyfikacja oraz ocena parametrów technologicznych procesu przygotowania ciekłego stopu, determinujących jakość odlewów tłokowych wykonywanych z okołoeutektycznych stopów aluminium. Realizacja tego celu była ukierunkowana na opracowanie rozwiązań materiałowo-technologicznych pozwalających na zmniejszenie poziomu brakowości wytwarzanych tłoków, wynikającej z wad odlewniczych, a tym samym na obniżenie kosztów produkcji oraz ograniczenie negatywnego wpływu procesu odlewniczego na środowisko naturalne.

Na podstawie przeglądu literatury potwierdzono zasadność prac badawczych nad rozwojem napędów tłokowych w dobie promowanego przejścia od silników spalinowych do elektrycznych. Analiza aktualnych prognoz rynkowych wykazała, że zapotrzebowanie na różne typy tłoków utrzyma się w perspektywie kolejnych dekad, co potwierdza znaczenie doskonalenia ich technologii wytwarzania. W tej części pracy przedstawiono także podział stopów aluminium stosowanych na odlewy tłokowe, scharakteryzowano typowe wady odlewnicze, przyczyny ich powstawania oraz metody ograniczenia.

Na potrzeby diagnozy tzw. „słabych punktów” procesu produkcyjnego stosowanego w firmie Złotecki Sp. z o.o. został opracowany model produkcyjny obejmujący:

- wymagania jakościowe dotyczące produkcji tłoków,
- parametry stopu EN AB- AlSi12CuNiMg stosowanego do produkcji,
- konstrukcję odlewu tłokowego i formy odlewniczej oraz ich wpływ na możliwość powstawania wad odlewniczych,
- zabiegi technologiczne, takie jak: przygotowanie stopu, przygotowanie kokilarki i formy,
- proces odlewania.

Analiza opracowanego modelu wykazała, że najmniejszą stabilnością charakteryzują się parametry związane z przygotowaniem ciekłego metalu. Na tej podstawie sformułowano zestaw problemów badawczych i przeprowadzono serię analiz oraz eksperymentów ukierunkowanych na identyfikację źródeł zmienności procesowej, ocenę ich wpływu na jakość oraz opracowanie metod ograniczania ryzyka wad odlewniczych.

Zakres prac badawczych obejmował: analizę składu chemicznego wytypowanych stopów, badania właściwości mechanicznych (pomiar twardości, statyczna próba rozciągania), badania właściwości technologicznych (badania wtrąceń gruboziarnistych, badania lejności, wyznaczanie indeksu gęstości), analizę termiczną oraz ocenę makro- i mikrostruktury badanych materiałów.

Na podstawie analizy wyników zrealizowanych prac badawczych stwierdzono, że największy wpływ na poprawę jakości odlewów tłokowych w warunkach przemysłowych miały dwie opracowane i zweryfikowane procedury technologiczne. Pierwsza dotyczy kontroli minimalnego poziomu zawodorowania stopu lub jego wtórnego zagazowania. W badaniach własnych wykazano, że efektywnym wskaźnikiem gotowości ciekłego stopu do zalewania formy jest indeks gęstości (DI), który umożliwia natychmiastową decyzję dotyczącą konieczności jego odgazowania bądź wtórnego zagazowania. Na podstawie przeprowadzonych testów w środowisku produkcyjnym określono wartość referencyjną $DI = 1.5\% \pm 0.2\%$, która równoważy ryzyko powstawania porowatości gazowej i mikroporowatości skurczowej w wytwarzanych odlewach. Druga z opracowanych procedur dotyczy postępowania z zawrotami produkcyjnymi. Zrealizowane badania pozwoliły na wdrożenie nowych zasad ich przygotowania i sortowania, a końcowym rezultatem jest spadek brakowości odlewniczej z 8.8% do 4.2% oraz skrócenie czasu operacji przygotowawczych.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że ukierunkowana kontrola przygotowania ciekłego metalu — wsparta pomiarem DI oraz standaryzacja obiegu zawrotami produkcyjnymi, pozwala na obniżenie brakowości odlewów i wymierne ograniczenie kosztów wytwarzania. Opracowane rozwiązania mają charakter wdrożeniowy i stanowią nowy standard postępowania w odlewni firmy Złotecki Sp. z o.o., producenta tłoków do silników spalinowych i sprężarek powietrza.

Abstract

The main objective of this study was to identify and evaluate the technological parameters of the liquid alloy preparation process that determines the quality of piston castings made from near-eutectic aluminum alloys. The implementation of this goal was aimed at developing material and technological solutions that would reduce the level of defects in manufactured pistons, resulting from casting defects, thereby lowering production costs and minimizing the negative environmental impact of the foundry process.

A review of the literature confirmed the relevance of research on the development of piston engines in the era of the widely promoted transition from combustion to electric engines. The analysis of current market forecasts showed that the demand for various types of pistons will remain stable over the coming decades, confirming the importance of improving their manufacturing technologies. This section of the work also presents a classification of aluminum alloys used for piston castings, characterizes typical casting defects, causes of their formation and methods of their reduction.

For identifying the so-called "weak points" of the production process used in Złotecki Sp. z o.o., a production model was developed that included:

- quality requirements for piston production,
- parameters of the EN AB-AlSi12CuNiMg alloy used in production,
- the design of the piston casting and mold, and their influence on the occurrence of casting defects,
- technological operations such as alloy preparation and mold preheating,
- the casting process itself.

The analysis of the developed model showed that the parameters associated with the preparation of the liquid metal exhibited the lowest stability. Based on this finding, a set of research problems was formulated, and a series of analyses and experiments were carried out to identify the sources of process variability, assess their impact on quality, and develop methods to reduce the risk of casting defects.

The research scope included: analysis of the chemical composition of selected alloys, testing of mechanical properties (hardness measurement, static tensile test), testing of technological properties (testing of coarse-grained inclusions, castability tests, determination of the density index), thermal analysis and assessment of the macro- and microstructure of the tested materials.

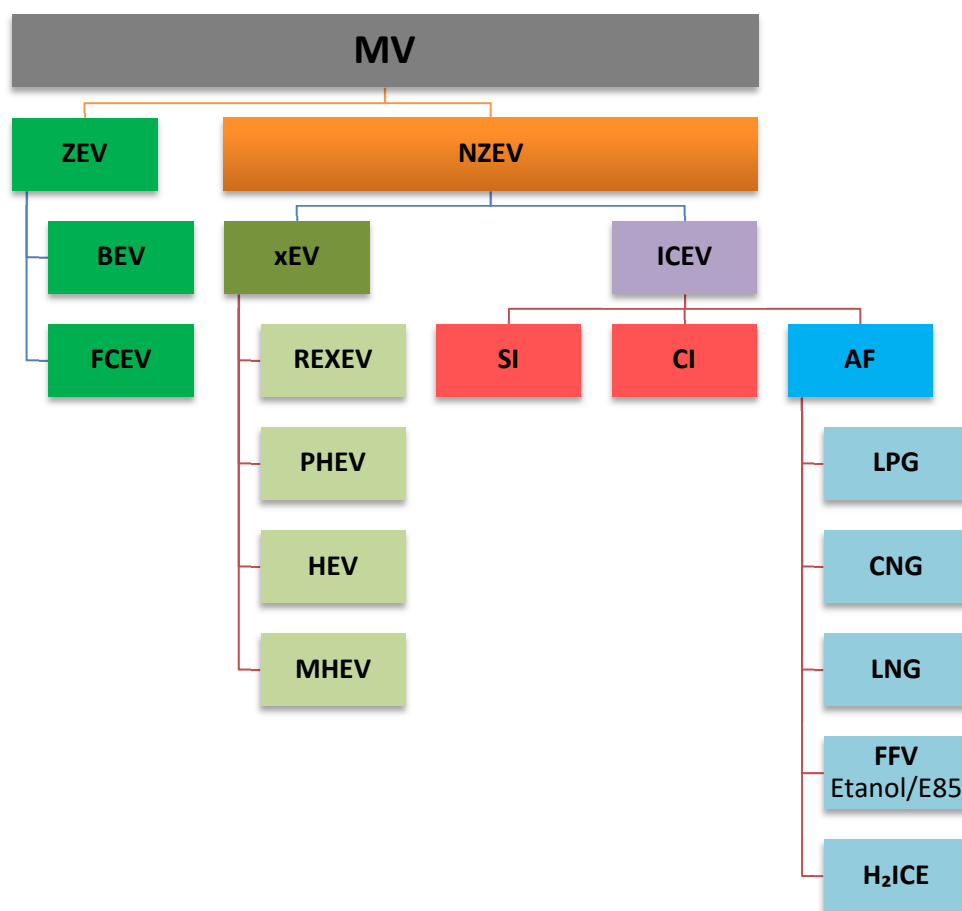
Based on the analysis of the results of the research work carried out, it was found that two newly developed and verified technological procedures had the most significant impact on improving casting quality under industrial conditions. The first procedure concerns the control of the minimum hydrogen content in the alloy or secondary gassing. Own research demonstrated that the density index (DI) is an effective indicator of the readiness of the liquid alloy for mold pouring, enabling immediate decisions regarding the need for degassing or secondary gassing. Based on tests conducted in a production environment, a reference value of $DI = 1.5\% \pm 0.2\%$ was determined, which balances the risk of gas porosity and shrinkage microporosity in the produced castings. The second developed procedure concerns the management of production returns. The research allowed for the implementation of new principles for their preparation and sorting, with the result being a reduction in casting scrap from 8.8% to 4.2% and a reduction in the time of preparation operations.

The obtained results confirm that targeted control of liquid metal preparation – supported by DI measurement – and the standardization of return material circulation lead to reduced casting scrap rates and measurable reductions in production costs. The developed solutions are of an implementation nature and now constitute a new standard procedure at Złotecki Sp. z o.o., a manufacturer of pistons for combustion engines and air compressors.

1. Przegląd literatury

1.1 Perspektywy produkcji tłoków do silników spalinowych w dobie promowanej elektryfikacji transportu

Dla właściwego zrozumienia struktury oraz zakresu zastosowań silników spalinowych w pojazdach obecnie produkowanych i eksploatowanych, w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej opracowano schemat ilustrujący omawiane zagadnienie (Rys. 1). Schemat ten stanowi syntetyczne ujęcie klasyfikacji i podziału zastosowań jednostek napędowych, a jego zadaniem jest uporządkowanie informacji rozproszonych w dostępnej literaturze przedmiotu. Należy podkreślić, że w obszarze silników spalinowych brak jest jednolitej, powszechnie przyjętej i kompleksowej nomenklatury obejmującej wszystkie aspekty użytkowania oraz konstrukcji tych jednostek. Z tego względu przyjęte w opracowaniu pojęcia i definicje opierają się na licznych źródłach literaturowych, które różnią się zakresem, poziomem szczegółowości oraz stopniem ujednolicenia terminologicznego [1, 2, 3].



Rys. 1. Rodzaje pojazdów silnikowych [opracowanie własne].

Przyjęte rozwiązanie pozwala na uzyskanie spójnego i praktycznego obrazu aktualnego stanu wiedzy w zakresie klasyfikacji silników spalinowych stosowanych w transporcie drogowym, maszynach roboczych oraz innych pojazdach specjalistycznych. Pojazdy silnikowe **MV** (*ang. Motor Vehicles*):

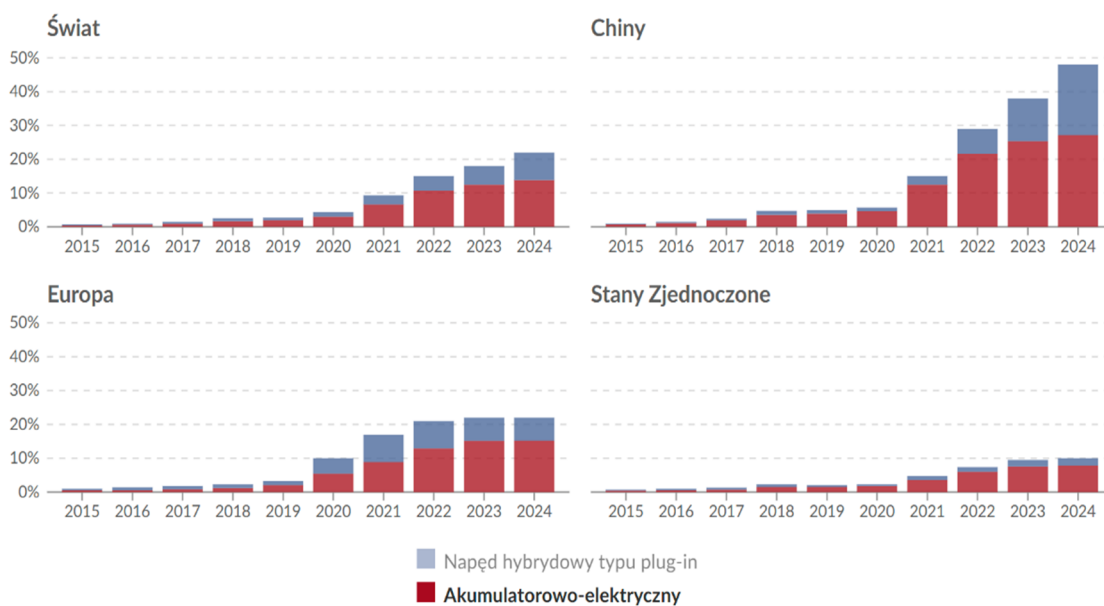
- **ZEV** (*ang. Zero Emission Vehicles*) - pojazdy, które w miejscu użytkowania nie emitują spalin ani innych szkodliwych gazów do atmosfery. Oznacza to brak emisji CO₂, tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych (PM) czy tlenku węgla (CO) podczas jazdy:
 - **BEV** (*ang. Battery Electric Vehicles*) - pojazdy z napędem elektrycznym zasilane akumulatorem,
 - **FCEV** (*ang. Fuel Cell Electric Vehicles*) - pojazdy elektryczne z ogniwem paliwowym, najczęściej wodorowym,
- **NZEV** (*ang. None-Zero Emission Vehicles*) - pojazdy niezeroemisyjne, które w miejscu użytkowania mogą emitować spaliny oraz inne szkodliwe gazy do atmosfery:
 - **xEV** (*ang. Electrified Vehicles*) - grupa obejmująca wszystkie pojazdy, w których wytwarzanie momentu obrotowego w układzie napędowym jest częściowo realizowane przez silnik elektryczny, niezależnie od sposobu zasilania i udziału napędu elektrycznego w całkowitej mocy:
 - **REXEV** (*ang. Range Extended Electric Vehicles*) - pojazdy elektryczne z wydłużonym zasięgiem – napęd 100% elektryczny, mały silnik spalinowy tylko do ładowania baterii, często zaliczane do LEV (*ang. Low Emission Vehicles*),
 - **PHEV** (*ang. Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) - pojazdy hybrydowe typu plug-in - silnik spalinowy + większa bateria ładowana z sieci, tryb EV do 20–80 km,
 - **HEV** (*ang. Hybrid Electric Vehicles*) - pojazdy hybrydowe, tzw. pełne - silnik spalinowy + silnik elektryczny, krótki tryb EV (zazwyczaj < 3 km),
 - **MHEV** (*ang. Mild Hybrid Electric Vehicles*) - pojazdy z tzw. miękką hybrydą elektryczną - silnik spalinowy wspomagany małym silnikiem elektrycznym; brak trybu jazdy w 100% elektrycznej.
 - **ICEV** (*ang. Internal Combustion Engine Vehicles*) - pojazdy z silnikiem spalinowym:
 - **SI** (*ang. Spark Ignition*) - pojazdy z silnikiem zasilanym benzyną z zapłonem iskrowym,
 - **CI** (*ang. Compression Ignition*) - pojazdy z silnikiem zasilanym olejem napędowym z zapłonem samoczynnym,
 - **AF** (*ang. Alternative Fuels*) - pojazdy z silnikami spalinowymi napędzanymi paliwami alternatywnymi:

- **LPG** (*ang. Liquefied Petroleum Gas*) - skroplony gaz ropopochodny,
- **CNG** (*ang. Compressed Natural Gas*) - sprężony gaz ziemny,
- **LNG** (*ang. Liquefied Natural Gas*) - skroplony gaz ziemny,
- **FFV** (*ang. Flexible-Fuel Vehicles*) – paliwo składające się w 85% z etanolu i 15% benzyny (Etanol/E85),
- **H₂ICE** (*ang. Hydrogen Internal Combustion Engine*) - wodór jest spalany w tradycyjnym silniku tłokowym.

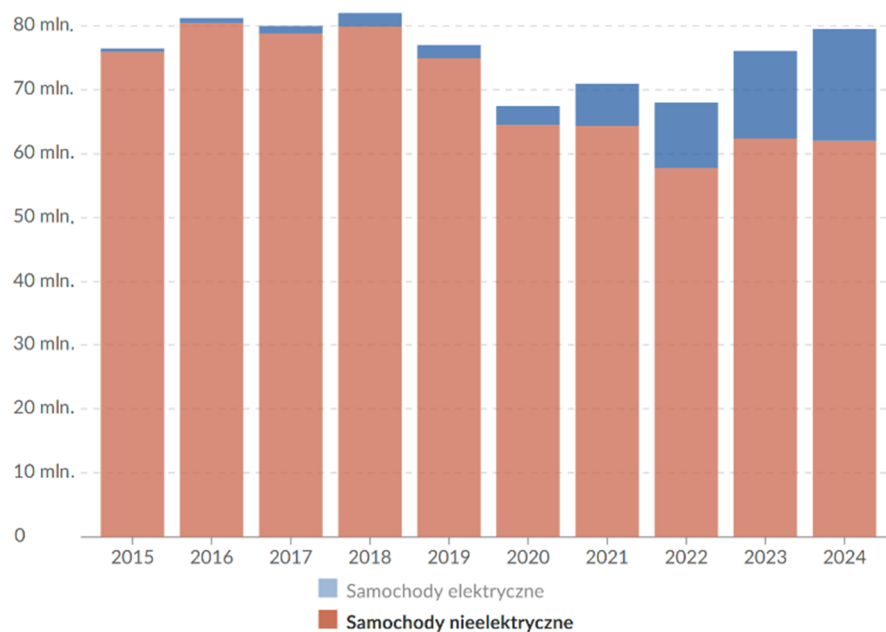
W literaturze przedmiotu dotyczącej udziału pojazdów elektrycznych w całkowitej sprzedaży samochodów silnikowych, kategoria pojazdów elektrycznych (EV) jest najczęściej ujmowana jako suma dwóch podgrup: pojazdów z napędem wyłącznie akumulatorowym (BEV) oraz hybryd typu Plug-in (PHEV). Taki sposób klasyfikacji, choć powszechnie stosowany w analizach rynkowych i statystykach branżowych, nie odpowiada podziałowi opartemu na kryterium emisyjności, tj. na rozróżnieniu pomiędzy pojazdami zeroemisyjnymi (ZEV) a niezeroemisyjnymi (NZEV). Niemniej jednak, praktyka badawcza i raportowa wskazuje, iż to podejście pozostaje dominujące. W związku z tym należy właściwie interpretować przedstawione poniżej wykresy i informacje uwzględniając fakt, że pojazdy typu PHEV – pomimo zaliczania ich do kategorii EV – nadal wykorzystują w swojej konstrukcji tłoki, co odróżnia je od pojazdów całkowicie zeroemisyjnych i jednocześnie wpływa na zwiększenie puli tłoków w produkcji.

Pomimo intensywnej promocji oraz systematycznego wzrostu sprzedaży pojazdów elektrycznych, szczególnie na rynku chińskim (Rys. 2), dominującą część sprzedawanych obecnie pojazdów silnikowych nadal stanowią konstrukcje wyposażone w jednostki spalinowe zaliczane do grupy NZEV (Rys. 3) [4, 5]. Taki stan rzeczy wynika nie tylko z długiej żywotności eksploatacyjnej istniejącej floty samochodowej, lecz również z ograniczonego tempa elektryfikacji segmentu pojazdów ciężkich oraz barier infrastrukturalnych w wielu regionach świata.

Należy przy tym zauważyć, że w obecnie eksploatowanej strukturze pojazdów zdecydowaną większość stanowią pojazdy ICEV, które w zależności od regionu będą nadal użytkowane i poddawane procesom naprawczym przez okres sięgający od kilku do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu lat [4, 5].

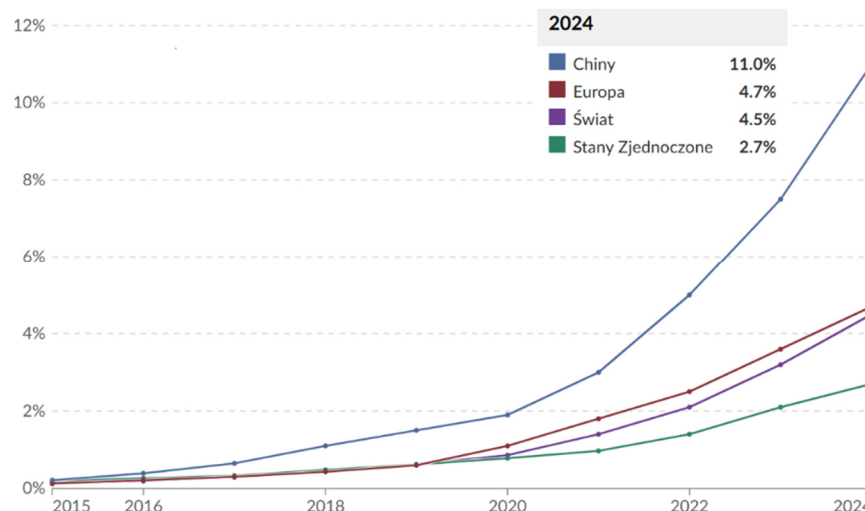


Rys. 2. Udział sprzedanych nowych samochodów z napędem elektrycznym (BEV) i hybrydowym typu plug-in (PHEV) [5].



Rys. 3. Liczba sprzedanych nowych samochodów elektrycznych (BEV i PHEV) i nieelektrycznych na świecie [5].

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany udziału pojazdów elektrycznych w strukturze globalnego rynku samochodowego w okresie ostatnich dziesięciu lat, z podziałem na główne regiony. Dane jednoznacznie wskazują na stopniowy wzrost znaczenia elektromobilności, przy czym dynamika tego procesu pozostaje silnie zróżnicowana geograficznie.



Rys. 4. Odsetek obecnie użytkowanych samochodów elektrycznych (BEV i PHEV) [5].

W krajach wysoko rozwiniętych, zwłaszcza w Unii Europejskiej, Stanach Zjednoczonych oraz w wybranych gospodarkach azjatyckich, obserwuje się wyraźnie większe zainteresowanie rynku pojazdami elektrycznymi. Obserwowana tendencja wzrostowa jest konsekwencją zarówno polityki klimatycznej, regulacyjnej (m.in. konieczność redukcji emisji CO₂), jak i intensywnych inwestycji w infrastrukturę ładowania oraz systemy wsparcia fiskalnego. Odmienne kształtuje się sytuacja w krajach rozwijających się, gdzie czynniki ekonomiczne, ograniczony dostęp do technologii oraz niski poziom dofinansowania powodują marginalny udział tego segmentu. W skali globalnej średnia wartość udziału pojazdów elektrycznych w rynku motoryzacyjnym wynosi około 4.5% [4, 5], co wskazuje, że mimo wzrostowego trendu technologia ta nadal pozostaje na etapie wczesnej ekspansji.

Prognozy dotyczące rozwoju światowego rynku motoryzacyjnego wskazują, iż udział pojazdów napędzanych tradycyjnymi jednostkami spalinowymi będzie w kolejnych dekadach systematycznie się zmniejszał. Tendencja ta wynika zarówno z narastającej presji regulacyjnej w obszarze ograniczania emisji gazów cieplarnianych, jak i z intensywnego rozwoju technologii alternatywnych układów napędowych, obejmujących m.in. pojazdy elektryczne (BEV) oraz wodorowe (FCEV). Jednak zgodnie z raportami Międzynarodowej Agencji Energii (*ang. International Energy Agency, IEA*) oraz Międzynarodowej Organizacji Producentów Pojazdów Samochodowych (*ang. Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles, OICA*) [4, 6], do roku 2050 jednostki spalinowe wciąż będą odgrywały istotną rolę, odpowiadając za znaczący odsetek globalnej sprzedaży nowych pojazdów.

Jak wynika z powyższej analizy w przewidywalnym okresie technologia tłokowa pozostanie nadal istotnym obszarem przemysłu motoryzacyjnego.

Konsekwencją utrzymującego się udziału silników spalinowych w układach napędowych pojazdów, zarówno osobowych, jak i użytkowych – tj. wykorzystywanych do transportu materiałów, produktów oraz w komunikacji zbiorowej – jest potrzeba ograniczania brakowości odlewów tłokowych poprzez doskonalenie procesów metalurgicznych i odlewniczych.

Według danych MarketsandMarkets całkowity rynek tłoków, obejmujący zarówno stopy aluminium (Al-Si), jak i stal, wzrośnie z 2.46 mld USD w 2025 r. do 2.79 mld USD w 2035 r., co odpowiada najniższemu prognozowanemu wskaźnikowi CAGR, wynoszącemu ok. 1.3 % [7]. W raporcie The Business Research Company, koncentrującym się wyłącznie na segmencie tłoków ze stopów Al-Si, przewidywana wartość rynku zwiększy się z 3.9 mld USD w 2024 r. do 4.45 mld USD w 2029 r., przy CAGR rzędu 3.0 % [8]. Z kolei IMARC Group prezentuje wyższy poziom wartości – 4.40 mld USD w 2024 r. z prognozą wzrostu do 5.50 mld USD w 2033 r., co odpowiada średniemu rocznemu tempu wzrostu na poziomie 2.5 % [9] (Tab. 1).

Tab. 1. Porównanie prognoz trzech raportów dotyczących rynku tłoków [7-9].

Aspekt	MarketsandMarkets	TBRC (Business Research Co.)	IMARC Group
Zakres materiałowy	Cały rynek tłoków (Al + stal)	Tylko tłoki aluminiowe	Cały rynek tłoków
Wielkość rynku	2.46 → 2.79 mld USD (2025–2035)	3.9 → 4.45 mld USD (2024–2029)	4.40 → 5.50 mld USD (2024–2033)
Tempo wzrostu (CAGR)	1.30%	3.00%	2.50%
Regiony dominujące	Azja-Pacyfik, następnie Ameryka Płn.	Ameryka Płn. największy rynek, Azja-Pacyfik najszybciej rosnący	Azja-Pacyfik z przewagą Chin, Japonii, Korei Płd.

Podsumowując, pomimo rosnącej sprzedaży pojazdów z napędem elektrycznym, struktura globalnego rynku transportowego w horyzoncie co najmniej do połowy XXI wieku pozostanie w znacznym stopniu oparta na jednostkach tłokowych – zarówno w segmencie konwencjonalnych pojazdów, jak i w szeroko rozumianej grupie xEV (w tym

PHEV) wykorzystującej tłoki. **Ta koniunkcja czynników – utrzymywanie się popytu technologicznego oraz ekonomiczna atrakcyjność segmentu – wzmacnia zasadność badań ukierunkowanych na ograniczanie brakowości odlewniczej i podnoszenie jakości odlewów tłokowych.**

W warstwie technologicznej kluczowe pozostaje doskonalenie jakości ciekłego metalu (tj. kontrola wodoru, wtrąceń metalicznych i niemetalicznych, eliminacja tzw. „bifilmów”), optymalizacja procesów modyfikacji i rafinacji stopu, a także udoskonalenie układów wlewowych oraz parametrów zalewania w procesach odlewania grawitacyjnego.

Z perspektywy zarówno gospodarczej, jak i środowiskowej mniejsza brakowość oznacza redukcję przerobów wtórnych, obniżenie zużycia energii i śladu węglowego, a więc lepszą efektywność kosztową i zgodność z wymaganiami polityki klimatycznej. W rezultacie, prace ukierunkowane na podwyższenie jakości odlewów tłokowych stanowią warunek konieczny utrzymania konkurencyjności i zrównoważonego rozwoju branży w fazie transformacji napędów.

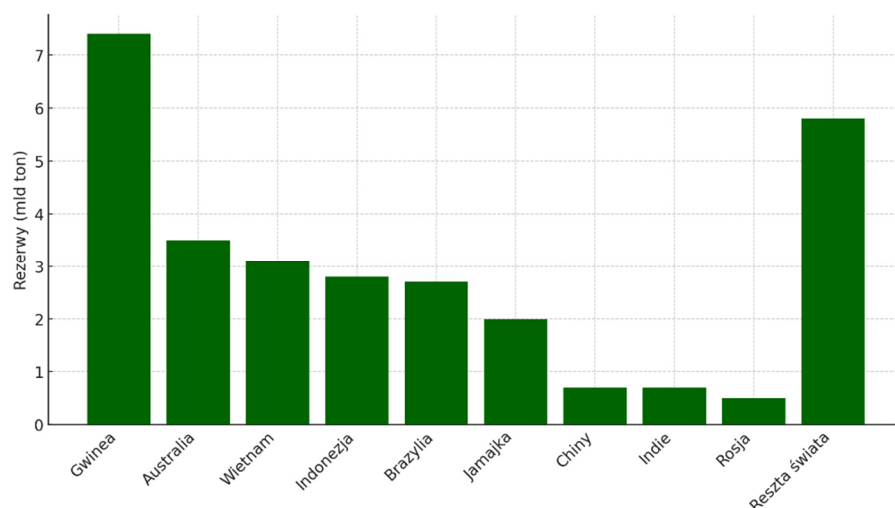
1.2 Aluminium i jego stopy

Aluminium należy do metali o kluczowym znaczeniu technicznym i gospodarczym. W skorupie ziemskiej występuje w dużych ilościach — ustępując jedynie tlenowi i krzemowi (Tab. 2). Z kolei wśród stosowanych metali i stopów metali plasuje się tuż za żelazem pod względem zakresu zastosowań [10, 11].

Tab. 2. Udział procentowy pierwiastków chemicznych w skorupie ziemskiej, [% wag] [10].

Tlen	Krzem	Aluminium	Żelazo	Wapń	Sód	Potas	Magnez
46.46	27.61	8.07	5.06	3.64	2.83	2.58	2.07
Tytan	Wodór	Fosfor	Węgiel	Mangan	Siarka	Miedź	
0.62	0.14	0.12	0.009	0.009	0.006	0.0001	

Surowcem bazowym do produkcji aluminium są boksyty, z których pozyskuje się tlenek glinu (Al_2O_3), a następnie poddaje go elektrolizie. Światowe zasoby boksytów oceniane są na 55–75 mld ton, natomiast pokłady rezerw — czyli zasobów możliwych do obecnie ekonomicznego wydobycia — wynoszą około 30 mld ton. Największe skupiska boksytów znajdują się w Gwinei, Australii, Wietnamie [12] (Rys.5).



Rys. 5. Rezerwy aluminium na świecie, dane z 2024 roku [12].

Produkcja aluminium pierwotnego jest realizowana głównie metodą elektrolizy tlenku glinu (Al_2O_3). Otrzymany tlenek glinu, po procesie Bayera, jest poddawany elektrolizie metodą Halla–Héroulta, w kąpeli w kriolicie w temperaturze ok. 950 °C [13]. Proces ten cechuje się znaczną energochłonnością — zużywa się zazwyczaj 11.5–13.5 MWh na tonę aluminium. Globalna produkcja pierwotnego aluminium w 2024 roku wyniosła ok. 72 mln ton, co stanowi wzrost o 2.86 % względem roku poprzedniego.

Właściwości czystego technicznie aluminium ($\geq 99,0\%$ Al) są ograniczone, jednak dodatki stopowe takie jak: krzem (Si), magnez (Mg), miedź (Cu), cynk (Zn), mangan (Mn), nikiel (Ni), cyna (Sn) oraz procesy obróbki cieplnej wytwarzanych stopów aluminium (*ang. aluminium alloys*) umożliwiają szerokie kształtowanie ich właściwości użytkowych [11, 14]. W praktyce przemysłowej główny podział obejmuje stopy aluminium przeznaczone do przeróbki plastycznej oraz stopy odlewnicze, które zawierają zwykle 5 – 25% pierwiastków stopowych i odznaczają się dobrą lejnością oraz niewielkim skurczem odlewniczym [11, 15]. Stopy Al znajdują powszechne zastosowanie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, budowlanym i energetycznym [16, 17].

Coraz większą rolę w łańcuchu dostaw odgrywają wtórne stopy aluminium (*ang. secondary aluminium alloys*) otrzymywane w procesie recyklingu złomu aluminiowego. Wynika to z faktu, że wytworzenie 1 t metalu z recyklingu wymaga około 95% mniej energii niż produkcja aluminium pierwotnego i prowadzi do proporcjonalnie niższej emisji gazów cieplarnianych [18].

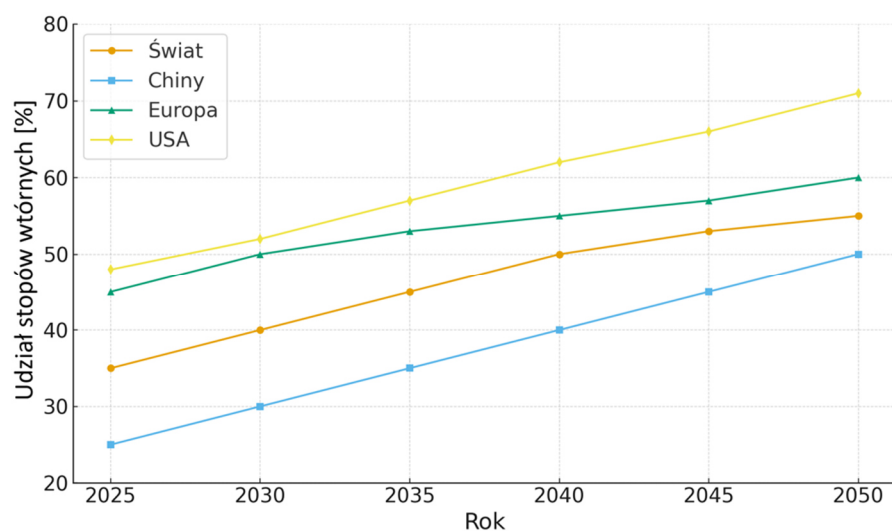
Prognozy długoterminowe wskazują, że udział wtórnych stopów aluminium w globalnym bilansie materiałowym będzie systematycznie wzrastał. Według International Aluminium Institute (IAI) w 2050 roku recykling pokryje 50–60% światowego zapotrzebowania na stopy aluminium co oznacza, że metal pierwotny wciąż będzie odpowiadał za 40–50% podaży [19]. W gospodarkach rozwiniętych przewidywane są jeszcze wyższe poziomy: w Europie ponad połowa zapotrzebowania na stopy aluminium w 2050 r. ma być zaspokajana źródłami wtórnymi [20], a w Ameryce Północnej udział ten może wzrosnąć z 48% obecnie do około 71% [21].

W motoryzacji wtórne stopy aluminium znajdują szerokie zastosowanie w wytwarzaniu elementów odlewanych, takich jak: tłoki, bloki i głowice silników. Przeglądy branżowe potwierdzają, że większość odlewów stosowanych w silnikach i tłokach oparta jest na wtórnych stopach odlewniczych Al-Si z dodatkami miedzi (Cu) i magnezu (Mg) [22].

Dla odlewów tłokowych wytwarzanych ze stopów Al-Si bliskich eutektyce rosnący udział wtórnych stopów aluminium ma szczególne znaczenie. Utrzymanie stabilności właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych tego typu odlewów wymaga rygorystycznej kontroli jakości ciekłego metalu, w tym zawartości żelaza (Fe) i miedzi (Cu) oraz stopnia zawodorowania, a także właściwego doboru parametrów procesów odgazowania i modyfikacji stopu. Jak wskazują najnowsze analizy, odpowiednio zarządzany proces wytwórczy pozwala na pełne wykorzystanie potencjału wtórnych stopów Al-Si w elementach układów napędowych wytwarzanych metodami odlewniczymi [23].

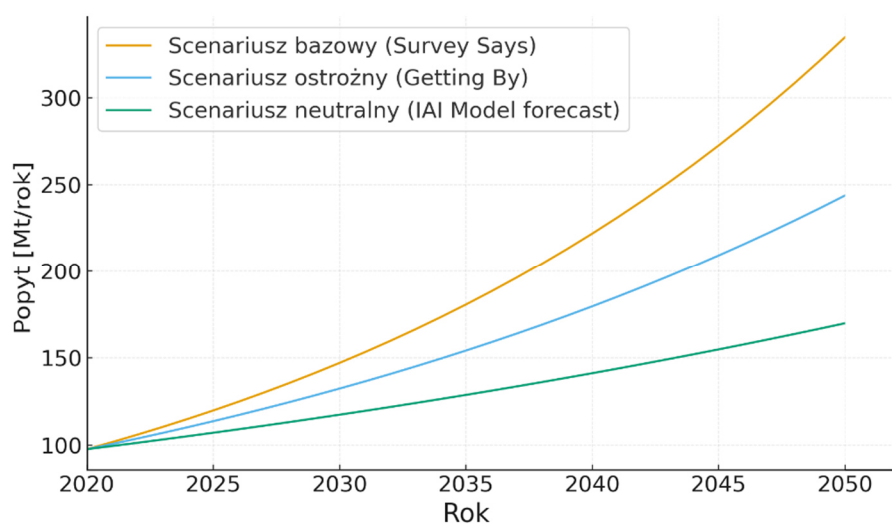
Podsumowując, wtórne stopy aluminium, w tym stopy Al-Si, stanowią filar transformacji motoryzacji ku zrównoważonemu rozwojowi. Do 2050 roku będą one odpowiadać za większość dostaw metalu w branży automotive, jednak udział pierwotnych stopów aluminium na poziomie 40–50% pozostanie niezbędny dla zapewnienia stabilności podaży. Oznacza to, że strategie materiałowe przemysłu muszą równoważyć rozwój infrastruktury recyklingu z dostępem do niskoemisyjnej produkcji pierwotnej.

Na rysunku 6 przedstawiono prognozę udziału wtórnych stopów aluminium w produkcji (w ujęciu globalnym i regionalnym) w latach 2025–2050.



Rys. 6. Prognoza udziału stopów wtórnych w całkowitej produkcji stopów aluminium [19,20,21, 24].

Na rysunku 7 zostały zaprezentowane wyniki raportu CM Group przygotowanego dla International Aluminium Institute (IAI), z których wynika, że niezależnie od przyjętego scenariusza, od umiarkowanego (IAI Model) przez ostrożny (Getting By), po optymistyczny (Survey Says), w każdym przypadku popyt na stopy aluminium w 2050 r. będzie co najmniej dwukrotnie większy niż w 2020 r. [25].



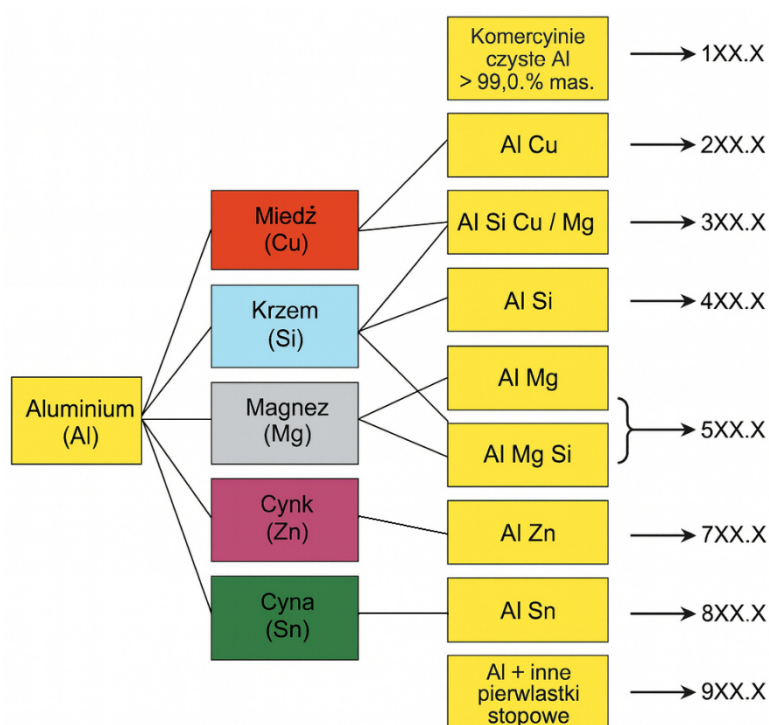
Rys. 7. Prognoza popytu na stopy aluminium [25].

1.3 Odlewnicze stopy aluminium

W systemie europejskim klasyfikację i wymagania dla odlewniczych stopów aluminium określają następujące normy:

- PN-EN 1706 – *Aluminium i stopy aluminium – Odlewy – Skład chemiczny i własności mechaniczne*,
- PN-EN 1676 – *Aluminium i stopy aluminium – Gęski stopowe do przetopienia – Specyfikacje*,
- PN-EN 1780-1 – *Aluminium i stopy aluminium – Oznaczenia gęsek do przetopu, stopów wstępnych i odlewów – Część 1: System oznaczeń numerycznych*,
- PN-EN 1780-2 – *Aluminium i stopy aluminium – Oznaczenia gęsek do przetopu, stopów wstępnych i odlewów – Część 2: System oznaczeń na podstawie symboli chemicznych*.

Przyjęty system oznaczeń stopów odlewniczych jednoznacznie wiąże skład chemiczny stopu z jego przeznaczeniem aplikacyjnym, natomiast oznaczenia numeryczne umieszczone w nawiasach pełnią funkcję porządkującą i ułatwiają identyfikację w obrębie klasyfikacji normy. Przykładowe oznaczenia stopów odlewniczych to: EN AC- AlSi5Cu3Mn (EN AC-45100) oraz EN AC- AlSi12CuNiMg (EN AC-48000). Strukturę i zasadę tworzenia oznaczeń stopów aluminium przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Podział odlewniczych stopów aluminium [15].

Poniżej przedstawiono skrótowy podział i charakterystykę stopów odlewniczych opracowaną na podstawie prac [26, 27].

- Stopy Al-Cu (2xx.x): wysoka wytrzymałość i twardość, ograniczona odporność korozyjna; zastosowanie w motoryzacji.
- Stopy Al-Si-Cu (3xx.x): wieloskładnikowe, bardzo popularne; łączą dobre właściwości mechaniczne z podatnością na obróbkę cieplną; szeroko stosowane w motoryzacji.
- Stopy Al-Si (4xx.x): siluminy (Al-Si) stanowią najważniejszą grupę odlewniczych stopów Al. Zawartość krzemu wynosi w nich ok. 2–30% (najczęściej 5–13.5%), a eutektyka przypada przy ~12.6% Si. Ich kluczowe atuty to:
 - znakomita lejność i niski skurcz odlewniczy,
 - wysoka odporność na korozję i ścieranie,
 - możliwość uzyskania bardzo dobrych właściwości mechanicznych w stopach eutektycznych po odpowiedniej obróbce.

Siluminy podeutektyczne i nadeutektyczne wykorzystuje się w elementach narażonych na podwyższoną temperaturę (m.in. w przemyśle okrętowym i energetycznym). Wersje wieloskładnikowe z dodatkami Cu, Mg czy Mn cechują się podwyższoną wytrzymałością i są powszechnie stosowane w odlewach tłoków, głowic oraz bloków cylindrowych [28]. W praktyce procesowej znaczenie ma modyfikacja eutektyki (np. modyfikacja strontem) i rafinacja ziarna (np. rafinatory Al-Ti-B), a ich efektywność zależy od składu stopu oraz szybkości chłodzenia [29, 30, 31].

- Stopy Al-Mg (5xx.x): bardzo dobra odporność korozyjna (także w środowisku morskim); armatura, elementy przemysłu chemicznego.
- Stopy Al-Zn (7xx.x): wysoka odporność korozyjna i stabilność wymiarowa, lecz ograniczona użyteczność w podwyższonej temperaturze.
- Stopy Al-Sn (8xx.x): bardzo dobre właściwości ślizgowe i odporność na ścieranie; przeznaczone głównie na łożyska.

1.3.1 Stopy aluminium stosowane w przemyśle motoryzacyjnym

Zwiększenie udziału lekkich stopów aluminium w produkcji dla przemysłu motoryzacyjnego stanowi jeden z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów badawczych i wdrożeniowych inżynierii materiałowej. Wzrost znaczenia stopów Al-Si wiąże się z globalnymi trendami ekologicznymi, potrzebą redukcji masy pojazdów, dążeniem do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz poprawą efektywności

energetycznej. W przypadku samochodów z klasycznym układem spalinowym obniżenie masy własnej pojazdu pozwala zmniejszyć zużycie paliwa nawet o kilka procent na każde 100 kg redukcji. W odniesieniu do pojazdów elektrycznych mniejsza masa oznacza wydłużenie zasięgu i bardziej efektywne wykorzystanie baterii. Wszystkie te czynniki powodują, że stopy aluminium znalazły się w centrum zainteresowania producentów motoryzacyjnych, a ich udział w całkowitej masie pojazdu systematycznie rośnie [32, 33].

W grupie materiałów powszechnie stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym istotną rolę odgrywają odlewnicze stopy Al-Si-(Cu/Mg), popularnie określane jako siluminy. Charakteryzują się one bardzo dobrą lejnością, niskim skurczem odlewniczym i możliwością wykonywania skomplikowanych odlewów cienkościennych. Dzięki temu znalazły szerokie zastosowanie w produkcji bloków silników, głowic cylindrów, tłoków, obudów sprzęgieł, skrzyń biegów, a także elementów zawieszenia. Do najczęściej stosowanych gatunków, opisanych w normie PN-EN 1706, należą: EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)), EN AC-42100 (AlSi7Mg0.3) i EN AC-48000 (AlSi12CuNiMg). Pierwszy z nich jest podstawowym stopem dla odlewów ciśnieniowych (HPDC), drugi znajduje zastosowanie w odlewach niskociśnieniowych (LPDC) i grawitacyjnych, natomiast trzeci – dzięki zawartości Cu i Ni – wyróżnia się podwyższoną odpornością na pękanie i stabilnością wymiarową w wysokiej temperaturze, co czyni go szczególnie odpowiednim do tłoków i elementów turbosprężarek [15].

Technologie odlewnicze umożliwiają dodatkową modyfikację właściwości stopów Al-Si. Najczęściej stosuje się modyfikację strontem (Sr), która powoduje zmianę wielkości i morfologii wydzieleni krzemu z grubej i płytkowej w drobną i włóknistą, co znacząco poprawia ciągliwość i właściwości zmęczeniowe odlewów. Dodatkowo wprowadzanie rafinatorów ziarna (np. Al-Ti-B) pozwala uzyskać jednorodną, drobnoziarnistą strukturę podczas krzepnięcia, korzystną dla elementów pracujących w warunkach zmiennych obciążeń. Obróbka cieplna typu T5, T6 (przesycanie i starzenie) lub T7 (starzenie stabilizujące) umożliwia optymalizację właściwości w zależności od przeznaczenia wytwarzanych części maszyn [11, 16].

Oprócz klasycznych siluminów w motoryzacji wykorzystuje się także stopy Al-Mg (seria 5xx.x wg klasyfikacji odlewniczej), które odznaczają się znakomitą odpornością korozyjną, również w środowisku morskim. Znalazły one zastosowanie w elementach samochodów ciężarowych, autobusów oraz pojazdów specjalnych, gdzie długotrwała odporność na agresywne warunki środowiskowe ma kluczowe znaczenie [26, 27]. W przypadku samochodów elektrycznych stopy te stosuje się m.in. w obudowach systemów chłodzenia baterii, gdzie konieczne jest połączenie odporności korozyjnej i dobrej przewodności cieplnej.

Badania i raporty branżowe (m.in. Ducker, European Aluminium) wskazują, że w Europie i Ameryce Północnej średnia masa stopów aluminium w samochodach osobowych systematycznie rośnie i w najbliższych latach przekroczy 250 kg na pojazd. W konstrukcjach pojazdów elektrycznych udział stopów Al-Si jest jeszcze większy, ponieważ stanowi podstawowy materiał wykorzystywany na obudowy akumulatorów oraz elementy układów napędowych i konstrukcji nośnych. Jednocześnie rośnie znaczenie wtórnych stopów aluminium pochodzących z recyklingu, co pozwala ograniczyć ślad węglowy produkcji i wpisuje się w unijne strategie gospodarki o obiegu zamkniętym [32, 33].

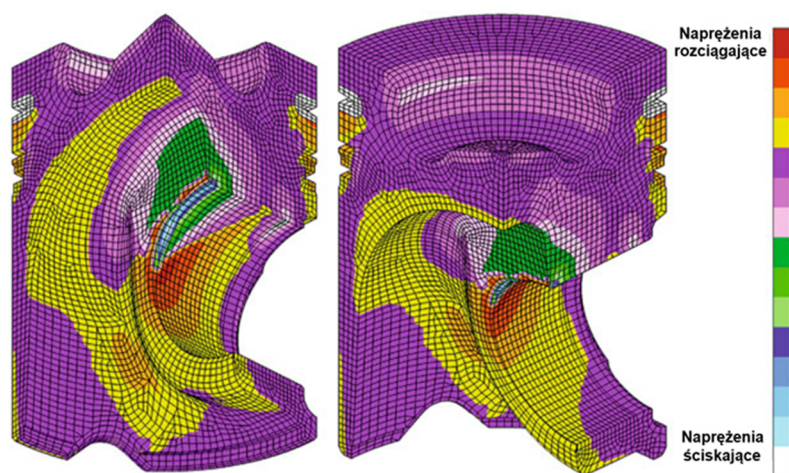
Podsumowując, stopy aluminium dzięki połączeniu niskiej gęstości, wysokiej odporności korozyjnej z dobrymi właściwościami mechanicznymi i odpowiednią przewodnością cieplną umożliwiają realizację tzw. strategii „*lightweight design*” w przemyśle motoryzacyjnym i są nieodzowne w produkcji zarówno pojazdów spalinowych, jak i elektrycznych. Główne właściwości oraz typowe zastosowania stopów aluminium zostały zestawione w tabeli 3.

Tab. 3. Typowe stopy aluminium stosowane w motoryzacji ich zastosowania [11, 29, 32, 34].

Norma PN-EN / Gatunek	Skład dominujący / seria	Główne właściwości	Typowe zastosowania w motoryzacji
EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe))	Al-Si-Cu (3xx.x)	Dobra lejność, odporność na korozję, możliwość odlewow cienkościennych	Skrzynie biegów, obudowy sprzęgieł, elementy zawieszenia (HPDC)
EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3)	Al-Si-Mg (4xx.x)	Wysoka odporność korozyjna, możliwość utwardzania wydzieleniowego	Głowice cylindrów, kolektory dolotowe i wydechowe (LPDC, kokilowe)
EN AC-48000 (AlSi12CuNiMg)	Al-Si-Cu-Ni-Mg (4xx.x)	Odporność na pękanie, stabilność wymiarowa w wysokiej temperaturze	Tłoki silników spalinowych i sprzężarek, elementy turbosprężarek
EN AC-51000 (AlMg5)	Al-Mg (5xx.x)	Bardzo dobra odporność korozyjna, dobra ciągliwość	Elementy narażone na wodę morską, układy chłodzenia, części pojazdów ciężarowych i autobusów
EN AC-71000 (AlZn10Si8Mg)	Al-Zn-Si (7xx.x)	Stabilność wymiarowa, wysoka odporność korozyjna	Elementy konstrukcyjne, części pracujące w warunkach podwyższonej wilgotności

1.3.2 Stopy aluminium stosowane w produkcji tłoków

Tłok pracuje w niekorzystnym układzie obciążeń cieplno-mechanicznych wynikających przede wszystkim z wysokiego ciśnienia gazów, dużych gradientów temperatury, dynamicznie zmieniających się cykli obciążeń oraz tarcia na powierzchniach prowadzących. Przykładowe rozkłady naprężenia występujące podczas pracy tłoka w silniku napędzanym olejem napędowym przedstawiono na rysunku 9. Z uwagi na trudne warunki pracy materiał tłoka powinien łączyć niską gęstość i wysoką przewodność cieplną (dla obniżenia temperatury powierzchni roboczych i wyrównania pól temperatury) z odpowiednią wytrzymałością statyczną i zmęczeniową w funkcji temperatury, odpornością na zatarcie i zużycie oraz stabilnością wymiarową (mała, przewidywalna rozszerzalność cieplna). Niezbędne są również: zgodność współczynników rozszerzalności cieplnej z materiałem cylindra i sworznia (stabilne luzy „zimno–ciepło”), dobra obrabialność, wytwarzanie odlewów z dokładnym odwzorowaniem kształtu i powierzchni praktycznie „na gotowo” (ang. *near net shape*) oraz zapewnienie powtarzalnej jakości wyrobu (odlew/kucie, kontrola wtrąceń, porowatości). W świetle tych wymagań naturalnym wyborem są stopy Al-Si (siluminy), które dzięki mechanizmowi utwardzania wydzieleniowego uzyskują wymagany poziom właściwości przy zachowaniu korzystnej gęstości i przewodności cieplnej [35, 36, 37].



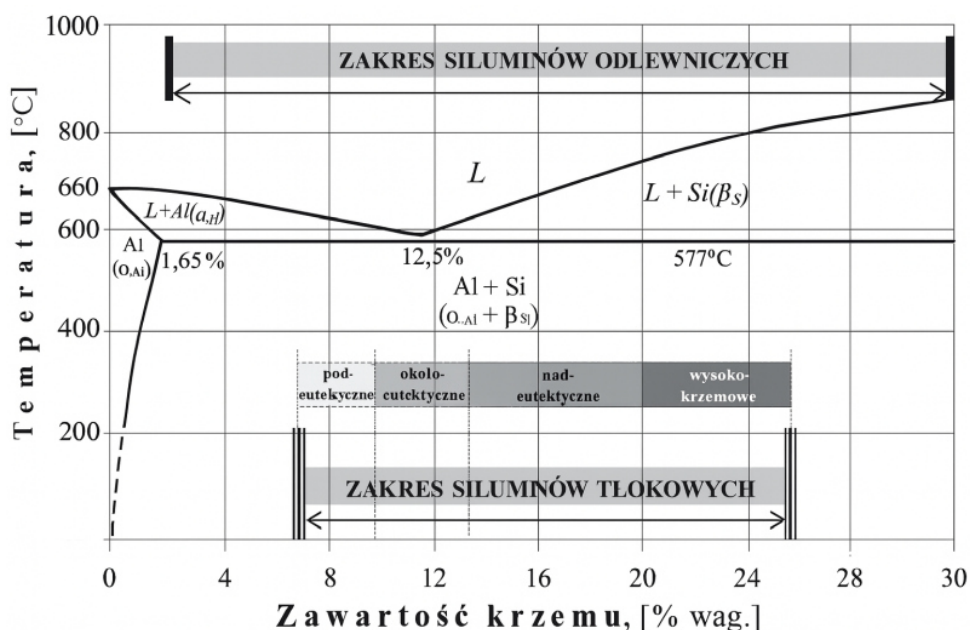
Rys. 9. Rozkład naprężeń zachodzących pod wpływem temperatury i ciśnienia gazu w tłoku silnika z zapłonem samoczynnym samochodu osobowego z chłodzeniem strumieniowym [35].

Pierwsze szersze zastosowanie tłoków ze stopów aluminium możliwe było wraz z opanowaniem zjawiska starzenia wydzieleniowego [38], które nadało stopom Al zdolność do wzrostu twardości po przesyceniu i starzeniu. Kluczowym krokiem w rozwoju technik odlewniczych były prace opisujące procesy krystalizacji i krzepnięcia stopów Al-Si, w tym rozróżnienie zakresów podeutektycznych i nadeutektycznych oraz

wpływu rozdrobnienia eutektyki na właściwości tribologiczne i stabilność wymiarową odlewów [36]. Zrozumienie tych zależności otworzyło drogę do projektowania stopów o kontrolowanej rozszerzalności, co stało się fundamentem nowoczesnych tłoków eksploatowanych w zmiennych warunkach termicznych [35, 37].

W ujęciu metalurgicznym dwuskładnikowy układ Al–Si ma eutektykę przy ok. 12.5% Si i temperaturze 577°C. Stopy <12.5% Si są podeutektyczne (osnowa roztworu stałego $\alpha(\text{Al})$ + eutektyka Al–Si), a >12.5% Si – nadeutektyczne (pierwotne kryształy Si + eutektyka). W miarę wzrostu Si rośnie udział eutektyki, zwiększa się odporność na zużycie i spada rozszerzalność cieplna. Jednocześnie przewodność cieplna bywa niższa w stopach o dużym udziale Cu/Ni. Drobnodziarnistość i jednorodność mikrostruktury zależy od liczby zarodków i szybkości chłodzenia. Fosfor (P) redukuje wielkość krzemu eutektycznego i pierwotnego co ułatwia obróbkę skrawaniem, z kolei sód (Na) i stront (Sr) modyfikują eutektykę do postaci drobnej, „włóknistej”. Konsekwencje aplikacyjne (zużycie–rozszerzalność–przewodność) determinują dobór stopu do typu silnika i profilu obciążeń. Wraz z rosnącą zawartością Si rośnie udział eutektyki i/lub krystalitów Si, co zmniejsza rozszerzalność cieplną i poprawia odporność na ścieranie, ale może ograniczać przewodność cieplną i obrabialność [35, 36, 37, 39].

W praktyce inżynierskiej i metaloznawczej siluminy tłokowe charakteryzuje się przede wszystkim według zawartości krzemu, co dobrze koreluje z ich mikrostrukturą i właściwościami (m.in. rozszerzalnością cieplną i odpornością na zużycie). W literaturze przyjmuje się cztery podstawowe grupy stopów w zależności od udziału wagowego krzemu (Rys. 10).



Rys. 10. Granice zmian zawartości krzemu w typowych grupach siluminów tłokowych [40].

Podział ten obejmuje stopy:

- podeutektyczne – 7.5–10.5% wag. Si,
- okołoeutektyczne – 10.5–13.5% wag. Si,
- nadeutektyczne – 13.5–20.0% wag. Si (z rozróżnieniem na podgrupy: lekko nadeutektyczne 13.5–16.0% wag. Si oraz właściwie nadeutektyczne 16.0–20.0% wag. Si),
- wysokokrzemowe – 20.0–23.0% wag. Si (do 26,0% Si) [36, 37, 40].

Zestawienie typowych zakresów dodatków stopowych, tj. miedź (Cu), magnez (Mg), nikiel (Ni), mangan (Mn), żelazo (Fe), tytan (Ti), cynk (Zn), w każdej z czterech grup siluminów przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Zakresy zawartości podstawowych dodatków stopowych oraz zanieczyszczeń w odlewniczych siluminach tłokowych, [% wag.] [40].

Grupa stopów tłokowych	Si	Cu	Mg	Ni	Co	Cr	Mn	Fe	Ti	Zn
podeutektyczne	7.5÷10.5	2.0÷4.0	0.5÷1.5	0.0÷1.0	–	–	0.10÷0.70	≤ 0.90	0.05÷0.25	≤ 1.00
okołoeutektyczne	10.5÷13.5	0.5÷4.5	0.7÷1.5	0.0÷3.0	–	–	0.30÷0.90	≤ 0.50	0.05÷0.25	≤ 1.20
nadeutektyczne	13.5÷16.0	1.0÷4.7	0.7÷1.3	0.0÷4.3	0.0÷0.9	–	0.30÷0.70	≤ 0.30	0.05÷0.20	≤ 0.20
nadeutektyczne	16.0÷20.0	0.8÷5.0	0.4÷1.3	0.0÷3.6	0.0÷0.3	0.4÷0.6	0.40÷1.00	≤ 0.30	0.05÷0.25	≤ 1.50
wysokokrzemowe	20.0÷23.0	0.9÷3.0	0.2÷1.3	0.8÷2.8	0.0÷1.5	0.0÷0.4	0.20÷0.80	≤ 0.20	0.05÷0.30	≤ 0.30

W polskiej i europejskiej praktyce produkcyjnej przez dekady dominował stop oznaczony cechą odlewniczą AK12 wg PN-76/H-88027 – w nomenklaturze PN-EN 1706 odpowiadający EN AC-48000 (EN AC- AlSi12CuNiMg) – chemicznie zbilansowany m.in. dodatkami Cu, Mg i Ni dla uzyskania nośności w podwyższonej temperaturze oraz akceptowalnej rozszerzalności cieplnej. Posiada on liczne odpowiedniki międzynarodowe, takie jak na przykład: Mahle 124, KS 1275 (Niemcy), A-S12UNG (Francja), AC 8A (Japonia), AJI30 (Rosja), ZL108 (Chiny) [40].

Wraz z upowszechnieniem modyfikacji nadeutektycznych siluminów we wczesnych latach 60'tych. XX wieku (kontrola wielkości kształtu i rozkładu kryształów krzemu, obróbka ciekłego metalu) zakres zastosowań rozszerzył się na wysoko obciążone silniki z zapłonem samoczynnym (Diesla) i silniki dwusuwowe, gdzie

korzystano ze stopów typu AlSi21 (cecha odlewnicza AK20) zapewniających wysoką odporność na zużycie i niższą rozszerzalność cieplną kosztem przewodności cieplnej [36,39, 40].

W kolejnych dekadach, wraz ze wzrostem jednostkowych obciążeń cieplno-mechanicznych, pojawiła się potrzeba zachowania niskiej rozszerzalności cieplnej przy równoczesnym wzroście nośności w zakresie temperatury 200–350°C. Odpowiedzią było opracowanie okołoeutektycznych siluminów „*low-expansion*” (Lo-Ex) o podwyższonej zawartości Cu i Ni oraz zbilansowanym dodatku Mg (a niekiedy także mikro-dodatkach pierwiastków przejściowych). Dodatki te wpłynęły na stabilność wymiarową w temperaturze pracy tłoka. Rozwiązania te rozwijano m.in. w Niemczech (MAHLE) i adaptowano w innych krajach, w tym w Polsce, jako alternatywę dla klasycznych nadeutektycznych siluminów w nowoczesnych silnikach benzynowych i wysokoprężnych [35, 40]. Jednocześnie dopracowano parametry obróbki cieplnej (przesycanie + starzenie + stabilizacja ponad maksimum twardości), aby ograniczyć „pęcznienie” i zmiany luzów oraz uzyskać powtarzalne parametry w produkcji wielkoseryjnej. Współczesna praktyka łączy zatem dojrzałą metalurgię stopów Al–Si z precyzyjną obróbką cieplną i wymaganiami tribologicznymi zespołu tłok–pierścienie–cylinder, kształtując dobór stopów pod konkretny profil pracy. Dobór stopu przeznaczonego na odlewy tłokowe należy zawsze powiązać z materiałem układu cylinder/tuleja oraz sworzeń tłokowy (parowanie współczynników rozszerzalności), obliczonym profilem temperatury oraz wymaganiami co do obróbki wykończeniowej wieńca i strefy pierścieni [35 -39].

Jak wynika z opracowania przygotowanego przez wiodącego producenta tłoków, firmę MAHLE GmbH, do ściśle określonych zastosowań w konstrukcji silników stosowane są odlewnicze stopy aluminium takie jak:

- dla silników benzynowych o wysokiej mocy właściwej – eutektyczny stop M142 (AlSi12Cu₃Ni₂Mg), charakteryzujący się korzystnym kompromisem nośności i rozszerzalności; w wybranych aplikacjach benzynowych stosuje się M145 (AlSi15Cu₃Ni₂Mg), gdy kluczowa jest odporność na zużycie;
- dla silników wysokoprężnych – M174+ (AlSi12Cu₄Ni₂Mg), stop o zwiększonej nośności i stabilności wymiarowej w temperaturze 200–350°C; historycznie także stop AlSi21 (cecha AK20) w starszych konstrukcjach o bardzo wysokim obciążeniu;

- dla silników dwusuwowych – M138/M244 (stop AlSi18–25), który z uwagi na duży udział krzemu charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie i mniejszą rozszerzalnością cieplną;
- dla sprężarek tłokowych, gdzie profil obciążeń cieplnych jest zwykle niższy niż w tłokach spalinowych, ale długotrwałe obciążenia zmęczeniowe i zjawiska tribologiczne wymagają stabilnych wymiarowo siluminów o podwyższonym udziale Si – stop AlSi12–18, z drobną eutektyką i reżimem starzenia zapewniającym minimalne pęcznienie; w aplikacjach o podwyższonym ryzyku zużycia korzystne są składy stopu z wyższym udziałem Si [35].

Odlewanie do kokili pozostaje dominującą technologią wytwarzania tłoków ze stopów aluminium. Proces ten umożliwia uzyskanie stosunkowo jednorodnej struktury przy zachowaniu dobrej powtarzalności w warunkach wielkoseryjnych. Oczekiwaną mikrostrukturę stanowi „ziarnista” eutektyka Al–Si z dyspersyjnymi fazami międzymetalicznymi, głównie z udziałem Cu i Ni, które odpowiadają za podwyższoną nośność w wysokiej temperaturze. W przypadku stopów nadeutektycznych, zawierających większe ilości krzemu (Si), kluczowe znaczenie ma kontrola jego morfologii. Nadmiernie duże i nieregularne kryształy Si powodują spadek obrabialności i zwiększoną podatność na inicjację pęknięć zmęczeniowych. W praktyce stosuje się modyfikację fosforem (P), która inicjuje zarodkowanie drobnych i równomiernie rozmieszczonych wydzieleni krzemu, poprawiając zarówno obrabialność, jak i odporność na spękania. W procesach odlewania szeroko wykorzystuje się modyfikację sodem (Na) lub strontem (Sr), której celem jest rozdrobnienie i przekształcenie eutektyki krzemowej do postaci włóknistej. W przypadku stopów takich jak M124V (M124 modyfikowanych Na i Sr), efekt ten prowadzi do wyraźnej poprawy skrawalności i uzyskania gładkich powierzchni po obróbce mechanicznej. Jednakże obserwuje się równoczesne pogorszenie odporności na zużycie ścierne, ponieważ drobna eutektyka ma mniejszą zdolność do przenoszenia obciążeń tribologicznych. Z tego względu decyzja o zastosowaniu modyfikacji wymaga bilansowania pomiędzy ułatwieniem obróbki skrawaniem a trwałością tribologiczną, przy czym szczegółowe rozwiązania dobiera się indywidualnie do rodzaju silnika i jego warunków pracy. W praktyce przemysłowej łączy się powyższe rozwiązania z kontrolą parametrów technologicznych, takich jak temperatura formy, intensywność chłodzenia i prędkość krzepnięcia, co pozwala uzyskać mikrostrukturę zapewniającą wymagane właściwości użytkowe przy zachowaniu wysokiej wydajności procesu [35- 40].

Na podstawie przedstawionych danych literaturowych można sformułować zestaw wniosków mających bezpośrednie znaczenie dla praktyki inżynierskiej w zakresie doboru materiałów tłokowych. Analiza właściwości mechanicznych i fizycznych stopów odlewniczych wskazuje, że zarówno zawartość krzemu, jak i dodatków stopowych (tj. Cu, Ni, Mg) w sposób jednoznaczny determinują przydatność materiału do konkretnych zastosowań. Istotną rolę odgrywają także parametry obróbki cieplnej oraz kontrola mikrostruktury, które pozwalają zoptymalizować relacje pomiędzy wytrzymałością, stabilnością wymiarową i odpornością na zużycie.

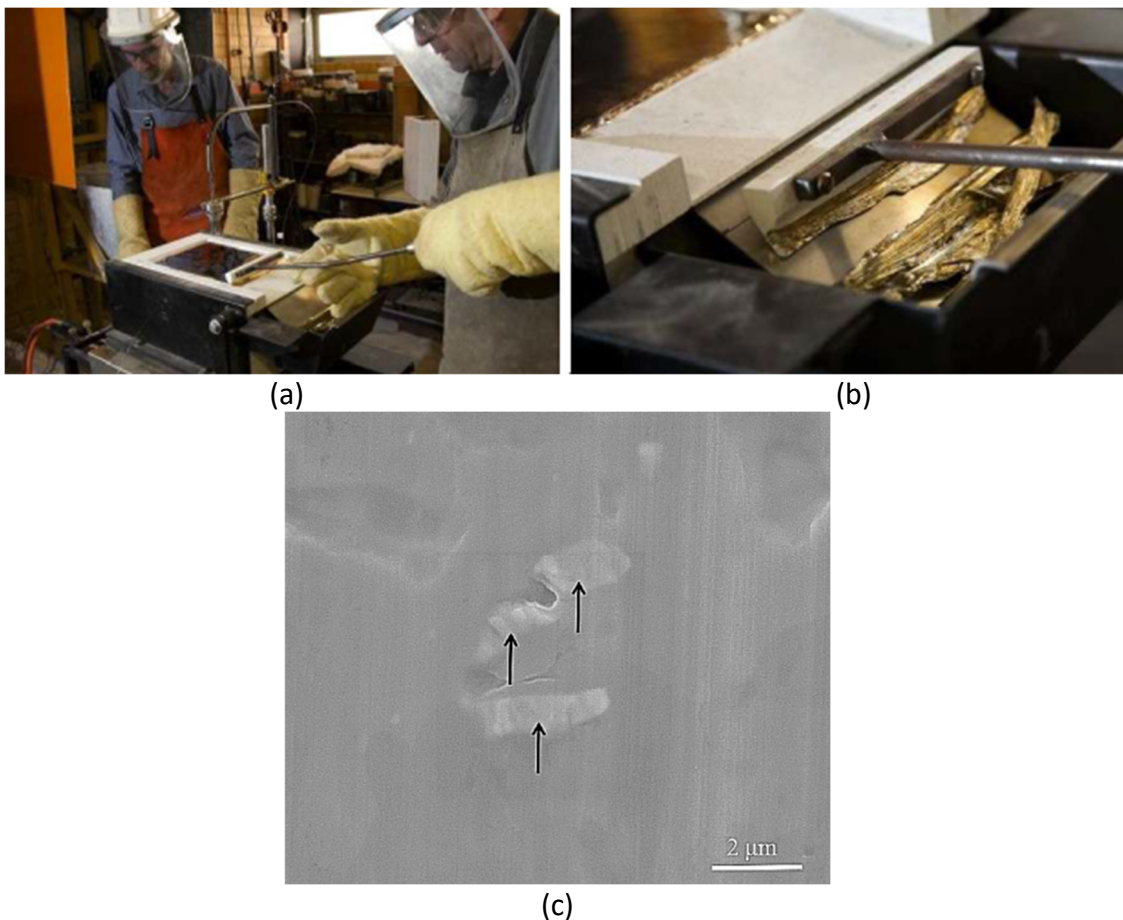
Zgromadzone informacje potwierdzają, że nie istnieje jeden uniwersalny stop o właściwościach optymalnych we wszystkich warunkach pracy. **Zatem dobór materiału powinien być wynikiem kompromisu pomiędzy wymaganiami dotyczącymi wytrzymałości w wysokiej temperaturze, stabilności cieplnej, odporności tribologicznej, a także uwarunkowaniami technologicznymi i ekonomicznymi. Oznacza to, że w praktyce projektowej kluczowe jest dostosowanie rodzaju siluminu tłokowego do charakterystyki pracy danego silnika lub sprężarki.**

1.4 Wady odlewnicze w odlewach ze stopów aluminium

Wady odlewnicze w stopach aluminium są skutkiem złożonej interakcji zjawisk metalurgicznych (jakość ciekłego metalu, rozpuszczalność i aktywność gazów, sposób krzepnięcia), dynamiki zalewania (reżim przepływu, turbulencja i „aspiracja powietrza”), rozwiązań konstrukcyjnych odlewu i formy (zróżnicowana grubość ścianek, węzły cieplne, drogi zasilania, układy chłodzenia i docieplania formy), a także standardów surowcowych i metod przygotowania ciekłego metalu (modyfikacja eutektyki, rafinacja i odgazowanie, filtracja ceramiczna). Konsekwencje tych nieprawidłowości — obejmujące szczelność odlewów, występowanie niejednorodności strukturalnych oraz obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej — sprawiają, że problematyka defektów stanowi jedno z kluczowych zagadnień zarówno w produkcji wielkoseryjnej, jak i w badaniach nad niezawodnością odlewów ze stopów aluminium [41]. Klasyczne opracowania konsekwentnie wiążą morfologię i rozmieszczenie wad z warunkami wypełniania formy, stanem jakości ciekłego metalu oraz przebiegiem procesu krzepnięcia [42, 43, 44].

Jednym z możliwych podziałów wad odlewniczych jest ich uporządkowanie według mechanizmu powstawania w czasie procesu odlewania:

- wtrącenia niemetaliczne i międzymetaliczne (np. zgary, tlenki (Rys. 11), podwójne warstwy tlenkowe tzw. „bifilmy, cząstki ceramiki, grafitu lub fragmenty wymurówki ogniotrwałej pieca, fazy z układu Fe-Mn-Cr [45, 46]);
- pustki powietrzne – powietrze uwięzione i porowatość gazowa, wydzielania pęcherzy wodoru rozpuszczonego w ciekłym stopie podczas krzepnięcia [47, 48];
- jamy skurczowe i porowatość skurczowa będące efektem niewystarczającego zasilania odlewu w stanie półciekłym [49, 50];
- niezgodności przepływowe typu zimne spawy i niedolania [51, 52, 53];
- pęknięcia na gorąco [51, 52];
- deformacje i odchyłki wymiarowe [51, 52].



Rys. 11. Przykłady błon tlenkowych: (a) i (b) – usuwanie warstwy tlenków z wykorzystaniem urządzenia Taylora [57]; (c) błona tlenkowa zawieszona w stopie EN AW-1235 [59].

W literaturze [54, 55, 56] jako kluczowe czynniki sprawcze wad odlewniczych przedstawiane są:

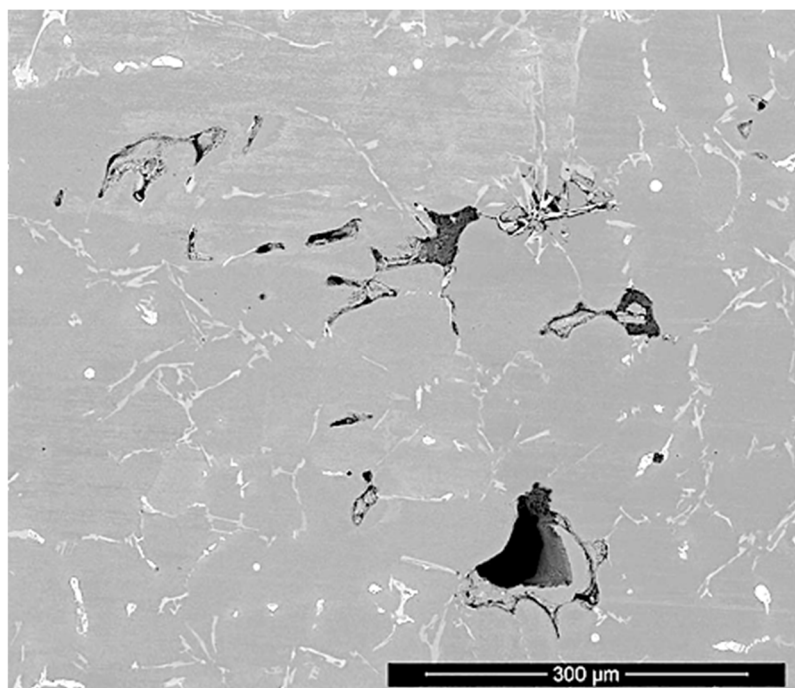
- wady projektu układu zalewowo - zasilającego i równoważenie cieplne formy;
- plan geometryczny odlewu (naddatki na obróbkę, tolerancje, łączenie sekcji o różnych modułach krzepnięcia);
- jakość wsadu (pierwotny/wtórny);
- jakość ciekłego stopu (degazacja, filtracja).

Aluminium i jego stopy już po ułamku sekundy od odstonięcia powierzchni w atmosferze powietrza pokrywają się cienką, początkowo amorficzną warstwą tlenku aluminium (Al_2O_3). W temperaturze przetapiania przekształca się ona w krystaliczną $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, a w stopach z dodatkiem Mg może ewoluować do spinelu MgAl_2O_4 lub tlenku MgO — co istotnie zmienia jej właściwości mechaniczne i zwilżanie przez ciekły metal [57, 58, 59].

Podczas przelewania ciekłego metalu lub bezpośrednio podczas zalewania formy mogą wystąpić zawirowania strugi, swobodny spadek (efekt „wodospadu”), uderzenia o ścianki formy oraz zasysanie powietrza w wlewie głównym („aspiracja powietrza”). Zjawiska te sprzyjają powstawaniu błon tlenkowych, których powierzchniowa warstwa („skóra tlenkowa”) może zostać wciągnięta do cieczy i pofalowana, tworząc tak zwany „bifilm” (Rys. 12-13) — podwójną, suchą błonę tlenkową rozdzieloną szczeliną (zwykle z kieszenią gazu) [43].

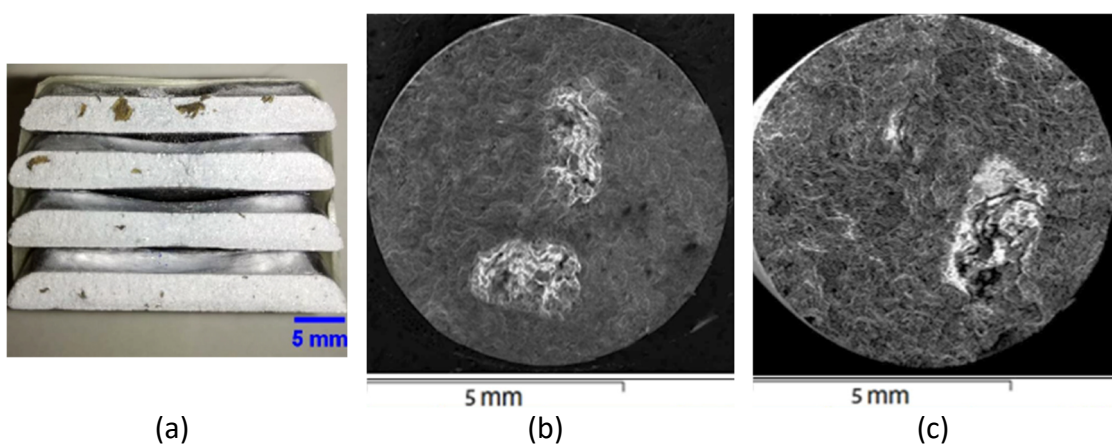


Rys. 12. Schematyczne przedstawienie turbulencji w cieczy powodujących porywanie błon tlenkowych, tworzenie się podwójnych warstw i pęcherzyków [60].

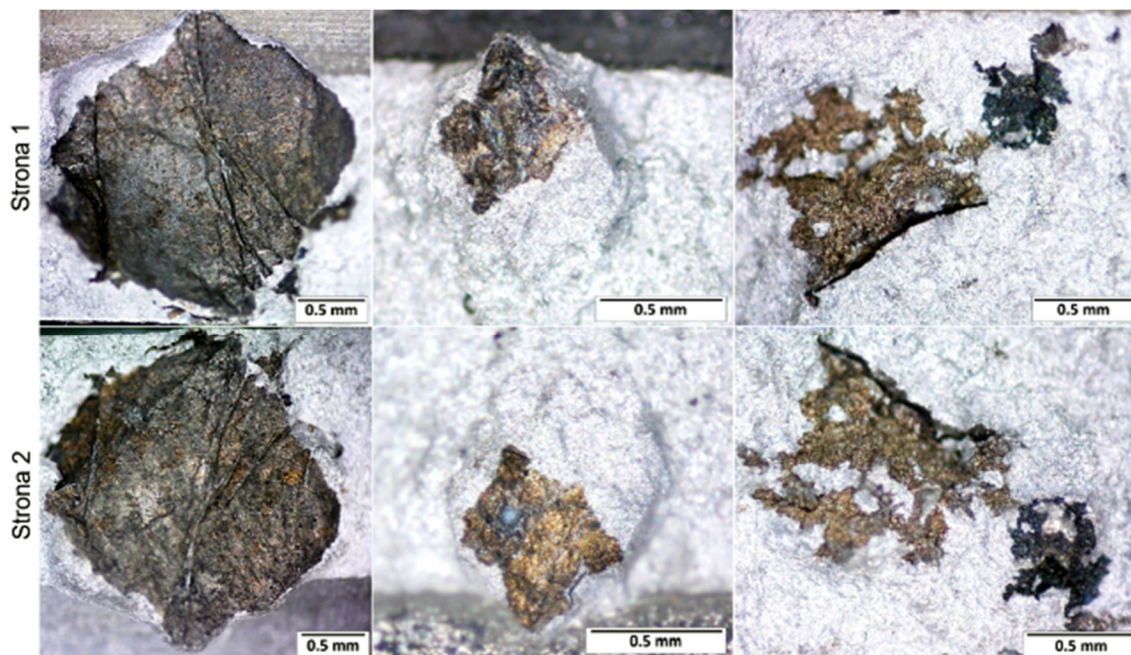


Rys. 13. Mikrofotografia FEG-SEM przedstawiająca typowe wady odlewów powstające w wyniku wciągania „bifilmów” [61].

„Bifilm” zachowuje się jak mikropęknięcie (Rys. 14-15) – wykazuje bardzo niską wytrzymałość na ścinanie, osłabia spójność krzepnącej fazy dendrytycznej, co może inicjować pęknięcia na gorąco. Charakteryzuje się znikomą kohezją wewnętrzną i dobrą adhezją do otaczającej osnowy. Dodatkowo „bifilm” ma niemal obojętną wyporność przez co potrafi utrzymywać się w zawieszeniu przez długi czas w ciekłym stopie w tyglu podczas oczekiwania na zalanie. Jeżeli zostanie pobrany do napełnienia formy, w konsekwencji przemieszcza się wraz ze strugą aż do wnęki formy, gdzie może stać się zarodkiem licznych niezgodności odlewniczych [61, 62, 63].

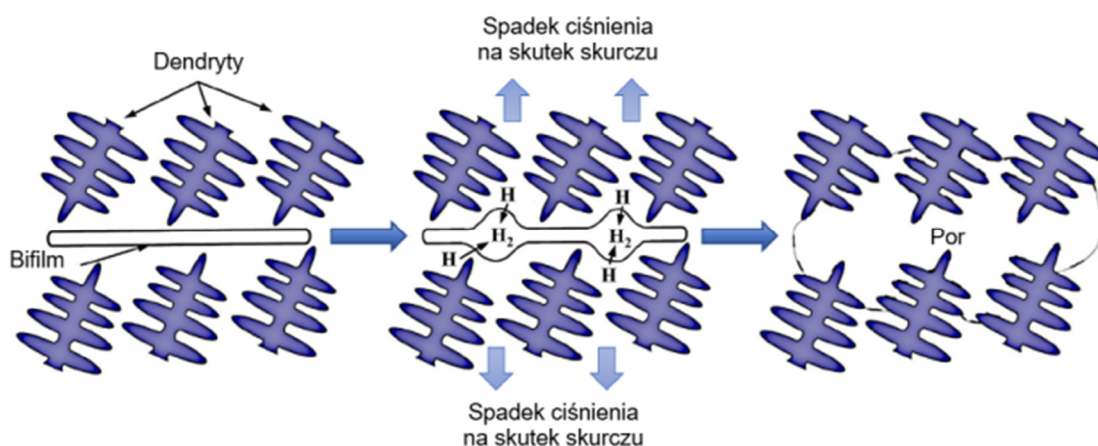


Rys. 14. Przykłady przełomów próbek wykonanych ze stopów aluminium z widocznymi defektami spowodowanymi występowaniem „bifilmów”:
(a) stop Al-Si-Mg-Cu [62]; (b) i (c) stop Al-7 Si-0.3 Mg [64].



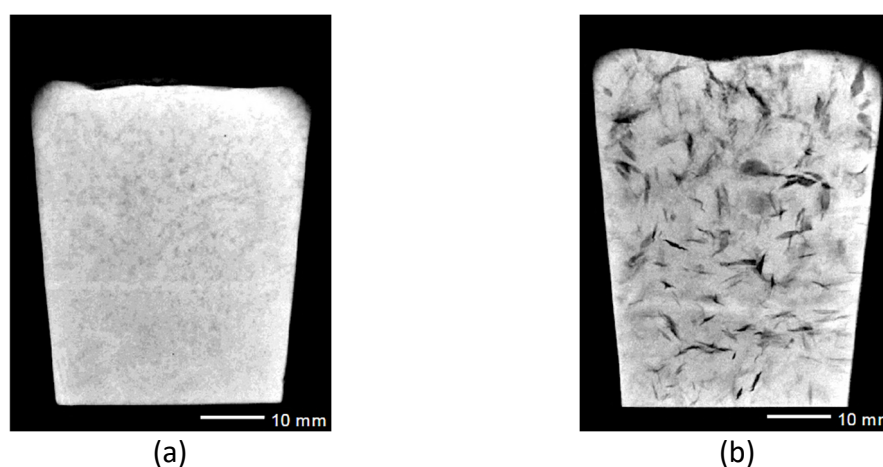
Rys. 15. Dwie strony defektów „bifilmu” znalezione na powierzchniach pęknięć próbek K-mold dla stopu Al-Si-Mg-Cu [62].

„Bifilmy” odgrywają kluczową rolę w inicjowaniu porowatości, zwłaszcza w tych obszarach odlewu, gdzie zasilanie ciekłym metalem jest utrudnione. Podczas krzepnięcia, w fazie przejściowej zwanej strefą półciekłą (*ang. mushy zone*), powierzchnie „bifilmu” mogą się od siebie odsuwać. W powstałą szczelinę łatwo przenika gaz, który stopniowo ją wypełnia. To właśnie ten mechanizm sprawia, że „bifilm” staje się zalążkiem pęcherza lub pustki skurczowej (Rys. 16) [65, 66, 67]. Tuż po uwięzieniu powietrza w szczelinie „bifilmu” zawarty w nim tlen reaguje z aluminium, tworząc kolejną warstwę tlenku Al_2O_3 . W dalszym etapie obecny w powietrzu azot (N) również może wchodzić w reakcje, prowadząc do powstawania azotku glinu (AlN). Zjawisku temu towarzyszą cykle pęknięcia i ponownego „samouszczelniania” się błony tlenkowej. Najistotniejszą rolę odgrywa jednak wodór rozpuszczony w ciekłym aluminium. Atomy wodoru migrują w stronę szczeliny „bifilmu” i gromadzą się w niej, powodując jej stopniowe rozdzielenie. W efekcie „bifilm” zaczyna działać jak gotowy balon, który napęcza się gazem. Dlatego w praktyce odlewniczej zdecydowana większość porów gazowych, które obserwuje się w strukturze stopów aluminium, powstaje właśnie w miejscach, gdzie wcześniej istniały „bifilmy” [58, 65].



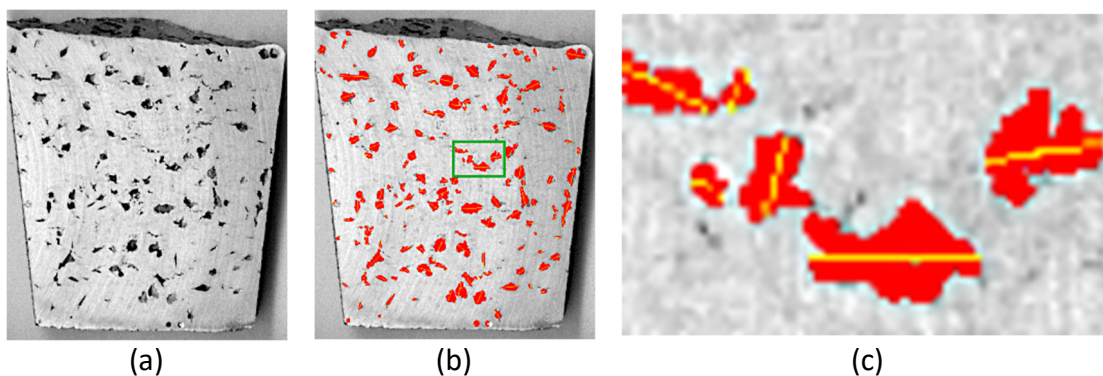
Rys. 16. Schematyczne przedstawienie mechanizmu tworzenia się porowatości w stopach Al-Si [62].

Powstawanie pęcherzy gazowych bardzo wyraźnie ujawnia się w próbie zmniejszonego ciśnienia [68] (*ang. Reduced Pressure Test, RPT*). W trakcie zestalania próbki w warunkach obniżonego ciśnienia resztkowe gazy uwięzione w „bifilmach” gwałtownie się rozprężają. Powoduje to rozerwanie i rozsunięcie się warstw tlenkowych, co skutkuje powstaniem widocznych pęknięć lub pęcherzy gazowych (Rys. 17).



Rys. 17. Stop aluminium po krzepnięciu w warunkach ciśnienia atmosferycznego (a) oraz w podciśnieniu 100 mbar (b) [63].

Na podstawie tak przygotowanej próbki możliwe jest wykonanie oceny ilościowej. Sumuje się długość i liczbę ujawnionych nieciągłości na powierzchni przekroju, a wynik przedstawia się w postaci wskaźnika określanego mianem „*ang. Bifilm Index*” (BI) (Rys. 18). Im wyższa wartość BI, tym większa populacja „bifilmów” w metalu, a tym samym gorsza jego jakość pod względem podatności na wady odlewnicze [69].



Rys. 18. Próbką odlaną w warunkach podciśnienia (100 mbar) przeznaczoną do wyznaczenia wartości BI: (a) przekrój próbki, (b) pory i pustki zidentyfikowane w systemie analizy obrazu, (c) przykład pomiaru maksymalnej długości poru dla wybranego fragmentu [62].

„Bifilmy” nie tylko same w sobie są wadą, lecz również pełnią funkcję swoistych substratów heterogenicznych dla innych składników mikrostruktury. Ich powierzchnia stanowi dogodne miejsce do zarodkowania cząstek międzymetalicznych, w szczególności faz bogatych w żelazo, które często pojawiają się w stopach wtórnych o podwyższonej zawartości tego pierwiastka. Podobnie „bifilmy” mogą sprzyjać wydzielaniu się eutektycznego krzemu w stopach Al-Si, a w dalszych etapach eksploatacji materiału przyspieszać rozwój lokalnych ognisk korozji (np. Al_2O_3 , AlN) czy wtórnej porowatości podczas procesów cieplnych, takich jak wygrzewanie. W konsekwencji obecność „bifilmów” w odlewie wpływa nie tylko na ilość i rozmieszczenie defektów, lecz także na ogólną morfologię składników mikrostruktury. Parametry takie jak odstęp między ramionami dendrytów (SDAS/DAS), kształt i rozkład krzemu eutektycznego czy morfologia faz bogatych w żelazo mogą być w większym stopniu determinowane przez obecność „bifilmów” niż przez typowe czynniki fizyko-metalurgiczne, takie jak szybkość chłodzenia czy skład chemiczny stopu. Ostatecznie decyduje to o właściwościach mechanicznych odlewów, szczególnie o ich plastyczności oraz odporności zmęczeniowej, które mogą ulegać znacznemu pogorszeniu właśnie z powodu dużej populacji „bifilmów” [64].

2. Praca własna

2.1 Geneza problemu

Firma ZŁOTECKI Sp. z o.o. została założona w 1972 roku i w początkowym okresie swojej działalności funkcjonowała jako zakład o charakterze warsztatowym. W latach osiemdziesiątych XX wieku przedsiębiorstwo rozpoczęło produkcję wyrobów odlewanych ze stopów aluminium. Początkowo asortyment obejmował elementy armatury motocyklowej, takie jak manetki, dźwignie czy obejmy. Był to etap stopniowego wchodzenia w branżę odlewniczą i zdobywania doświadczeń w zakresie technologii lekkich stopów Al-Si. Odpowiadając na rosnące zapotrzebowanie rynku, firma podjęła prace nad wdrożeniem do produkcji cylindrów i tłoków przeznaczonych do silników motorowerów i motocykli, a następnie rozszerzyła swoją ofertę o tłoki do silników użytkowych wykorzystywanych w rolnictwie i transporcie. Obecnie nie są już produkowane produkty z przeznaczeniem dla motorowerów i motocykli natomiast wdrażana jest szeroka gama produktów przeznaczonych do samochodów osobowych (Rys. 19).



Rys. 19. Przykładowe tłoki produkowane w firmie ZŁOTECKI Sp. z o.o. [zasoby własne].

Stopniowe poszerzanie gamy produktów i portfolio odbiorców pozwoliło przedsiębiorstwu na dynamiczny rozwój i umocnienie pozycji rynkowej. Obecnie firma dysponuje technologiami umożliwiającymi wytwarzanie tłoków przeznaczonych do zastosowań specjalnych, takich jak sport wyczynowy, lotnictwo czy wysoko

obciążone jednostki napędowe, w których wykorzystywane są zarówno odlewy, jak i elementy kute. W ostatnich latach, we współpracy z Politechniką Śląską, opracowano również projekt tłoków kompozytowych, stanowiący przykład kierunku badań nad nowymi materiałami [70]. Jednak szczególne znaczenie strategiczne dla dalszego rozwoju przedsiębiorstwa miało wdrożenie do produkcji kompletnych zestawów cylindrowych (Rys. 20). Rozszerzenie asortymentu o ten typ wyrobów pozwoliło firmie wyjść poza tradycyjny obszar wytwarzania tłoków i zaoferować klientom bardziej złożone rozwiązania systemowe, integrujące cylinder i tłok jako funkcjonalny układ współpracujących elementów. Dzięki temu ZŁOTECKI Sp. z o.o. mogła sprostać rosnącym wymaganiom odbiorców w zakresie trwałości, kompatybilności i efektywności jednostek napędowych, a jednocześnie umocnić swoją pozycję jako producenta zdolnego do realizacji projektów o wysokim stopniu złożoności technicznej i materiałowej.



Rys. 20. Przykładowe zestawy cylindrowe produkowane w firmie ZŁOTECKI Sp. z o.o. [zasoby własne].

Produkcja odlewów od początku realizowana była w oparciu o opracowaną własną technologię, która z biegiem lat ulegała ewolucji i doskonaleniu. Szczególnie istotnym czynnikiem rozwoju było to, że przedsiębiorstwo samodzielnie wykonywało zarówno formy odlewnicze, jak i oprzyrządowanie produkcyjne, co umożliwiało szybkie reagowanie na potrzeby rynku oraz wprowadzanie modyfikacji technologicznych bez konieczności korzystania z usług poddostawców. Rozwój ten obejmował zarówno metody przygotowania ciekłego metalu, jak i procesy formowania oraz krzepnięcia, co umożliwiło wytwarzanie tłoków do coraz szerszej gamy jednostek napędowych, w tym także tłokowych sprężarek powietrza. Równolegle zmieniały się wymagania odbiorców – rynek stopniowo wymuszał podnoszenie jakości odlewów, co wiązało się z koniecznością wdrażania kolejnych modyfikacji procesowych. Odpowiadając

na rosnące oczekiwania, przedsiębiorstwo opracowało zestaw procedur i wymagań jakościowych, które istotnie wpłynęły na poprawę stabilności produkcji oraz parametrów eksploatacyjnych wyrobów.

Obecnie przedsiębiorstwo prowadzi działalność w ugruntowanym środowisku produkcyjnym, opartym na wdrożonych procedurach technologicznych i jakościowych. Niemniej jednak, **z uwagi na nieustanny nacisk rynkowy na poprawę parametrów użytkowych tłoków oraz redukcję kosztów wytwarzania, konieczne staje się dalsze doskonalenie procesów produkcyjnych. Szczęólnego znaczenia nabiera tu aspekt środowiskowy. Każdy odlew wadliwy, który wymaga ponownego przetopienia, generuje dodatkowe zużycie energii i emisję gazów cieplarnianych, a także zwiększa ilość odpadów produkcyjnych. Dlatego ograniczenie poziomu brakowości ma wymiar nie tylko ekonomiczny, lecz również ekologiczny, wpisując się w globalne trendy zrównoważonego rozwoju i gospodarki obiegu zamkniętego.**

Na przestrzeni dekad w odlewnictwie metali lekkich, a zwłaszcza w produkcji tłoków, obserwuje się wyraźny trend wzrostu znaczenia jakości w całym cyklu życia produktu. W początkowych okresach istotne było jedynie zapewnienie wymiarowości i podstawowych właściwości mechanicznych odlewów. Wraz z rozwojem techniki silnikowej oraz rosnącą konkurencją, zaczęto jednak zwracać szczególną uwagę na takie czynniki, jak: niska porowatość gazowa, redukcja zawartości tlenków w stopie, ograniczenie obecności faz międzymetalicznych o niekorzystnej morfologii czy poprawa jednorodności struktury [71]. Jakość odlewów zaczęła być definiowana nie tylko poprzez wyniki kontroli wymiarowej, lecz także w oparciu o zaawansowane badania nieniszczące (radiografia cyfrowa, tomografia komputerowa) oraz wskaźniki metalurgiczne, takie jak indeks gęstości (*ang. Density Index, DI*).

W tym kontekście **kluczowym wyzwaniem staje się redukcja obecnego poziomu brakowości produkcyjnej. W aktualnie obowiązujących celach jakościowych przedsiębiorstwa Złotecki Sp. z o.o. określono akceptowalny poziom brakowości całkowitej na 7%, natomiast dopuszczalny poziom brakowości wynikającej z wad odlewniczych na 4,5%. Osiągnięcie celu wymaga nie tylko precyzyjnej identyfikacji źródeł wad odlewniczych, ale również wdrożenia innowacyjnych metod monitorowania jakości metalu i odlewów, a także zastosowania nowoczesnych procedur kontroli procesowej. Efektem tych działań powinno być nie tylko obniżenie kosztów produkcji, ale także zwiększenie konkurencyjności przedsiębiorstwa na rynku międzynarodowym oraz zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko.**

2.2 Analiza procesu produkcyjnego

2.2.1 Wymagania jakościowe dotyczące produkcji tłoków

Do roku 2005 w Polsce funkcjonowały dwie odrębne normy krajowe, które w sposób kompleksowy regulowały wspólne wymagania techniczne oraz procedury badawcze odnoszące się do tłoków wykonywanych z odlewów stopów aluminium. Normy te precyzowały kryteria jakościowe, definiowały wymagania w zakresie akceptowalności odlewów oraz określały metodykę prowadzenia badań kontrolnych. W efekcie stanowiły one jednoznaczny punkt odniesienia zarówno dla producentów tłoków, jak i odbiorców końcowych, zapewniając spójność i jednolitość oceny jakości. Do tego zbioru należały:

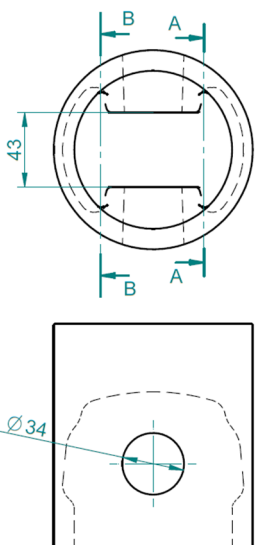
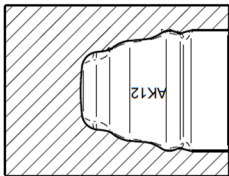
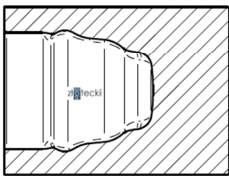
- PN-S-15250:1981 – *Silniki spalinowe i sprężarki tłokowe – Odlewy tłoków ze stopów aluminium – Wspólne wymagania i badania* (wycofana 10.10.2005 r.),
- PN-S-15251:1981 – *Silniki spalinowe i sprężarki tłokowe – Tłoki ze stopów aluminium – Wspólne wymagania i badania* (wycofana 10.10.2005 r.).

Obie normy, obowiązujące przez ponad dwie dekady, kształtowały praktykę przemysłową w zakresie projektowania, odlewania i oceny jakości tłoków. Ich wycofanie spowodowało jednak powstanie istotnej luki normalizacyjnej. W rezultacie obecnie parametry jakościowe tłoków są ustalane indywidualnie, w drodze negocjacji pomiędzy producentem a klientem, co sprzyja większej elastyczności, lecz jednocześnie prowadzi do zróżnicowania kryteriów akceptowalnych odchylek. Ostateczne wymagania stają się więc zależne od specyfiki aplikacji, oczekiwań kontrahenta oraz polityki jakości przyjętej przez odbiorcę.

W odpowiedzi na brak zunifikowanych norm zewnętrznych, a także w oparciu o wieloletnie doświadczenie w zakresie technologii odlewania tłoków, w przedsiębiorstwie Złotecki Sp. z o.o. opracowano rozbudowany zestaw instrukcji wewnętrzzakładowych. Dokumenty te pełnią funkcję wewnętrznych standardów jakości i zawierają szczegółowe wytyczne dotyczące sposobów identyfikacji niezgodności odlewniczych, kryteriów klasyfikacyjnych oraz progów akceptowalności dla poszczególnych kategorii wad. Co istotne, ich treść została wypracowana na podstawie wieloletniej praktyki produkcyjnej i stanowi swoiste kompendium wiedzy technologicznej, dostosowane do realiów procesów prowadzonych w zakładzie.

Każdy produkowany typ tłoka posiada indywidualną instrukcję odlewniczą, w której wyszczególniono podstawowe parametry procesu wymagające

monitorowania. Odlewnicy są zobligowani do postępowania zgodnie z jej zapisami zarówno podczas rozpoczynania procesu odlewania, jak i podczas jego trwania, natomiast dział kontroli jakości przeprowadza dodatkową, niezależną ocenę zgodności (Rys. 21). Dla zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności wprowadzono także wymóg ciągłej kontroli wizualnej każdego odlewu, obejmującej identyfikację wad takich jak: lokalne nierówności powierzchni, niejednorodności grubości ścianek, zalewek, wklęśnięć skurczowych, widocznych wtrąceń tlenkowych lub metalicznych, a przede wszystkim pęknięć i nieciągłości strukturalnych. Wszelkie odlewy budzące wątpliwości odseparowywane są w pojemnikach na braki odlewnicze. Do dalszych etapów produkcji przekazywane są odlewy spełniające rygorystyczne kryteria zgodności z dokumentacją i pozbawione wyżej opisanych wad.

Instrukcja odlewnicza		Wyrób:	Data aktualizacji:
		 Przekrój A-A  Przekrój B-B	
Nazwa	Nr rys.		
Gatunek materiału:	Aluminium AK 12		
Temperatura materiału w piecu:	760°C ± 5°C		
Numer formy odlewniczej:	[redacted]		
Oznaczenia (treść):	AK 12:		
Informacja na temat obróbki cieplnej:	Przesycany		
Czas po jakim następuje rozwarcie formy:	~3 min		
Dodatkowe istotne informacje:	[redacted]		
Sporządził:	Zatwierdził:		

Niniejsza dokumentacja jest własnością firmy "Złotecki" Sp. z o. o.
Przeznaczona jest do użytku wewnętrznego, nie wolno jej powielać ani udostępniać osobom trzecim do zapoznania bez zgody właściciela

Rys. 21. Przykładowa instrukcja odlewnicza [zasoby własne].

Szczególnego znaczenia nabiera tu fakt, iż odlewanie klasyfikowane jest jako proces specjalny, a więc taki, którego efekt końcowy można w pełni ocenić dopiero po zakończeniu całej sekwencji operacji. W praktyce oznacza to, że **wiele niezgodności**

odlewniczych ujawnia się dopiero w toku późniejszej obróbki skrawaniem, gdy powierzchnie zewnętrzne i wewnętrzne tłoków zostają odśłonięte. Z tego względu niezbędne było opracowanie jednoznacznych kryteriów akceptacyjnych, które pozwalają na ocenę stopnia dopuszczalności poszczególnych wad z uwzględnieniem zarówno ich charakteru, jak i lokalizacji.

W ramach tej koncepcji w firmie Złotecki Sp. z o.o. powstały dwie wyspecjalizowane instrukcje kontrolne – pierwsza adresowana do tłoków przeznaczonych do silników spalinowych, druga natomiast do tłoków stosowanych w sprężarkach powietrza. Oba dokumenty obejmują szczegółowy opis rodzajów wad odlewniczych, które mogą zostać zidentyfikowane na powierzchniach po obróbce mechanicznej. Uwzględniają one również uszkodzenia mechaniczne powstające na etapie montażu tłoków w przyrządach technologicznych lub w trakcie transportu międzyoperacyjnego.

Instrukcje definiują ponadto podział tłoka na strefy kontrolne (Rys. 22), a także określają dopuszczalne limity akceptacji dla poszczególnych rodzajów niezgodności.

(a)

Oznaczenie wady	Maks. rozmiar	Maks. liczba	Maks. rozmiar	Maks. liczba	Maks. rozmiar	Maks. liczba	Maks. rozmiar	Maks. liczba
Puste przestrzenie, pory, utlenienia, wtrącenia, pęcherze								
Całkowita liczba pustych przestrzeni, porów, utlenień, wtrąceń, pęcherzy i zawalcowań lub załamów spowodowanych kuciem na jednym tłoku jest ograniczona do maksymalnie	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Mikro otwory, porowatość	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Zadziory	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Maks. mm wysokości. Zadziory, które mogą oderwać się podczas pracy silnika, są niedozwolone	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Linie uszkodzeń na chropowatych powierzchniach	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Linie uszkodzeń na obrabianych powierzchniach	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Pęknięcia	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Naloty	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Smugi płynięcia	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Obszary uszkodzeń na chropowatych pow.	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					
Dopuszczalne w granicach tolerancji projektowej; podwyższone powierzchnie, które mogą się oderwać, gdy silnik jest uruchomiony, są niedozwolone	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do	Pojedyncze wady maks. mm, do					

(b)

(c)

Rys. 22. Podział tłoka na strefy kontrolne: (a) tłok silnikowy, (b) tłok sprężarkowy, (c) wyciąg z instrukcji kontrolnej „Dopuszczalne wady powierzchni tłoków” określający dopuszczalne limity akceptacji dla poszczególnych rodzajów niezgodności [zasoby własne].

Dzięki temu proces oceny jakości zyskuje charakter systematyczny i transparentny, co minimalizuje ryzyko subiektywnych interpretacji. Dokumenty te pełnią funkcję podstawowego odniesienia w przypadkach, gdy klient nie przedstawił własnych, szczegółowych wymagań jakościowych. W konsekwencji stanowią one swoisty pomost

między wewnętrznym systemem zarządzania jakością a zewnętrznymi oczekiwaniami rynku, pozwalając na utrzymanie powtarzalności i przewidywalności wyników produkcyjnych.

2.2.2 Surowiec do produkcji

Podstawowym surowcem wykorzystywanym w przedsiębiorstwie Złotecki Sp. z o.o. do produkcji tłoków odlewanych jest stop aluminium EN AB- AlSi12CuNiMg (oznaczany cechą odlewniczą AK12 i składzie chemicznym jak w tabeli 5).

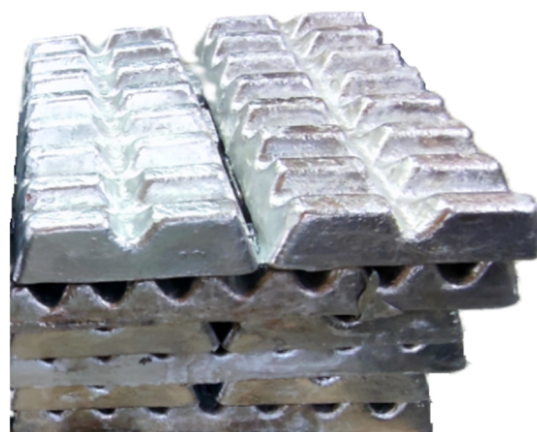
Tab. 5. Skład chemiczny stopu EN AB- AlSi12CuNiMg (EN AB-48000), [% wag.]

Wartość	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Inne oddzielnie	Inne razem	Al
Min.	10.5	0	0.8	0	0.9	0.7	0	0	0	0	Reszta
Max.	13.5	0.6	1.5	0.35	1.5	1.3	0.35	0.2	0.05	0.15	

Stop dostarczany jest przez wiodących producentów działających na rynku krajowym, co pozwala na zapewnienie stabilności łańcucha dostaw i zachowanie powtarzalności właściwości chemicznych oraz metalurgicznych. Każda dostawa surowca identyfikowana jest numerem wytopu wskazanym w atście producenta. Ze względu na fakt, iż przedsiębiorstwo Złotecki Sp. z o.o. nie dysponuje własną topialnią umożliwiającą przygotowanie stopu wstępnego, surowiec przekazywany jest bezpośrednio na stanowiska odlewnicze w postaci gąsek lub tzw. wafli (Rys. 23). Proces przetapiania wsadu odbywa się w piecach oporowych.



(a)



(b)

Rys. 23. Postać dostarczanego surowca: (a) gąski, (b) wafle.

W celu uzyskania wysokiej stabilności procesu technologicznego oraz ograniczenia wahań parametrów metalurgicznych z dostawcami zawarto porozumienia dotyczące dostarczania stopu w zawężonych przedziałach składu chemicznego względem wartości referencyjnych podanych w normie PN-EN 1676. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie zmienności procesowej, co przekłada się na poprawę jakości i jednorodności wykonywanych odlewów.

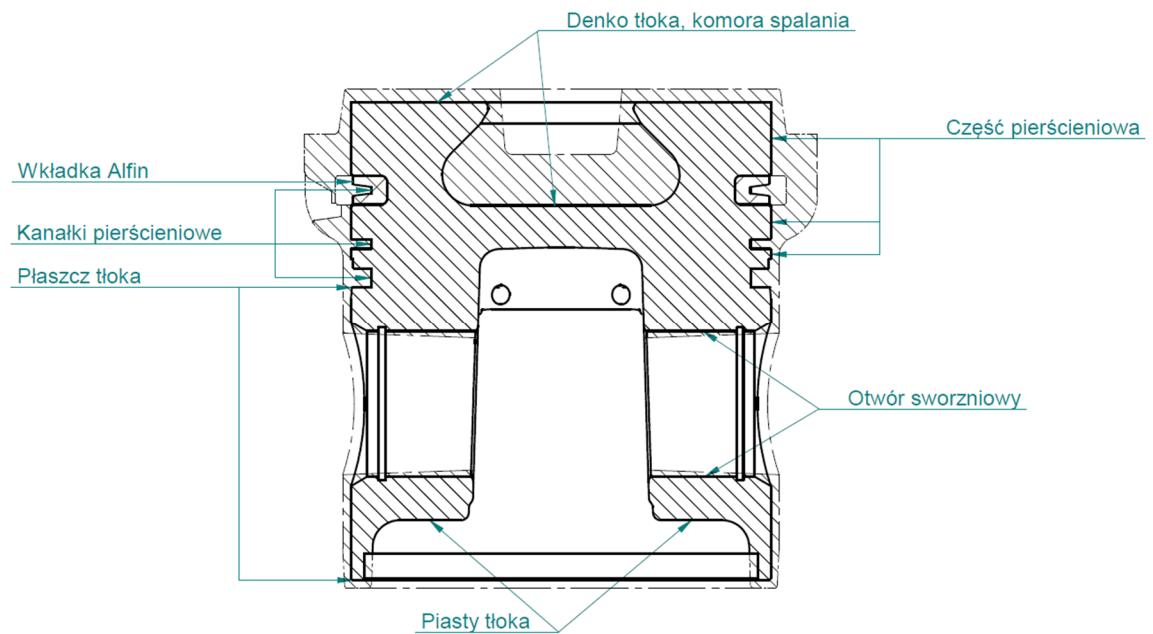
Ponadto, w ramach dodatkowych wymagań jakościowych, przedsiębiorstwo nałożyło na dostawców obowiązek dostarczania stopu o kontrolowanym poziomie czystości metalurgicznej. **Szczególnym parametrem kontrolnym jest tutaj indeks gęstości (DI), który stanowi miarę zawartości gazów rozpuszczonych w ciekłym metalu, przede wszystkim wodoru. Wymóg przyjęty w przedsiębiorstwie zakłada, iż wartość wskaźnika DI nie może przekraczać 2%, co w praktyce oznacza znaczące ograniczenie ryzyka powstawania porowatości gazowej w gotowych odlewach.** Wprowadzenie tego rodzaju kryteriów jakościowych ma za zadanie pozwolić utrzymać wysoką powtarzalność właściwości mechanicznych tłoków oraz ich długotrwałą niezawodność eksploatacyjną.

2.2.3 Konstrukcja odlewu tłokowego i jej wpływ na powstawanie wad odlewniczych

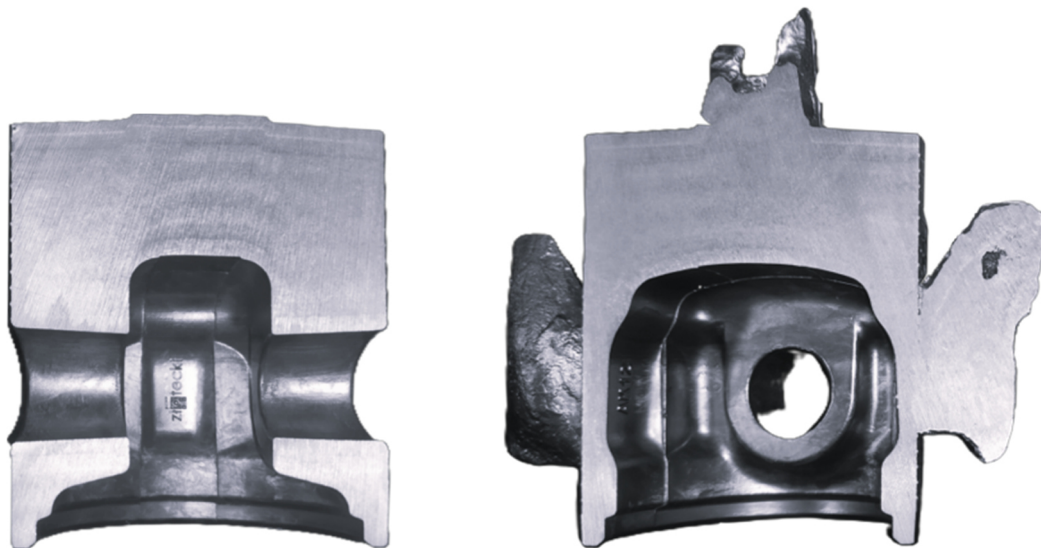
Odlew tłokowy ze stopów Al-Si jest elementem o wysokiej złożoności geometrycznej i funkcjonalnej. Konstrukcja tłoka wynika z jednoczesnej konieczności przenoszenia obciążeń mechanicznych (siły gazowe, bezwładnościowe), odporności na obciążenia cieplne (lokalna temperatura w zakresie 200–350 °C w denku i komorze spalania) oraz zapewnienia odpowiednich właściwości tribologicznych podczas współpracy z gładzią cylindra. Z perspektywy technologii odlewniczej kluczowa jest niejednorodna grubość ścianek, która determinuje nierównomierny rozkład temperatury, opóźnione krzepnięcie w partiach masywnych i powstawanie węzłów cieplnych.

Zasadniczą cechą odlewów tłokowych jest niejednorodna grubość ścianek. Poszczególne części tłoka (Rys. 24) — denko, część pierścieniowa, część prowadząca (płaszcz), piasty tłoka, czyli wzmocnienia odlewu, w których wykonywane są otwory sworzniowe, a także żebra usztywniające i kanały chłodzące (w tłokach z galerią chłodzącą) — wykazują znaczną zmienność wymiarów. Typowa grubość ścianek tłoka zależy od przeznaczenia odlewu (sprężarki, samochody osobowe, lekkie pojazdy dostawcze, aplikacje rolnicze) i mieści się od ok. 3 mm w strefie części prowadzącej do ponad 60 mm, a nawet 70 mm w rejonie denka i piast tłoka lub lokalnych wzmocnień

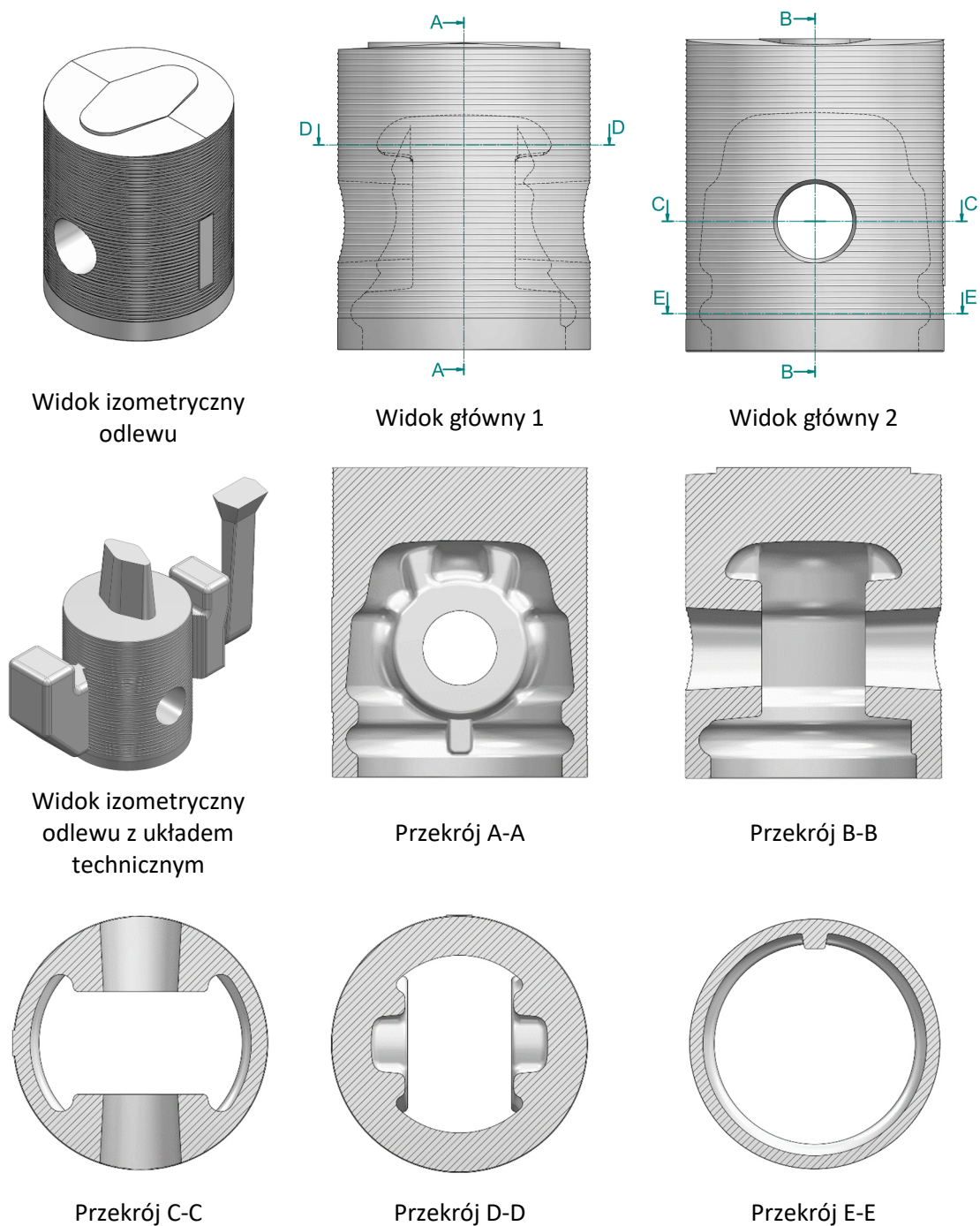
konstrukcyjnych (Rys. 25-26). Ta dysproporcja powoduje, że proces krzepnięcia w różnych sekcjach formy przebiega z różną prędkością — najdłużej w stanie ciekłym pozostaje stop w masywnych sekcjach odlewu, które tworzą węzły cieplne.



Rys. 24. Schemat budowy tłoka do silnika wysokoprężnego.



Rys. 25. Rzeczywiste przekroje odlewów tłokowych.



Rys. 26. Model odlewu oraz przekroje wzdłuż i prostopadle do osi głównej tłoka.

Za typowe węzły cieplne w tłoku uznaje się:

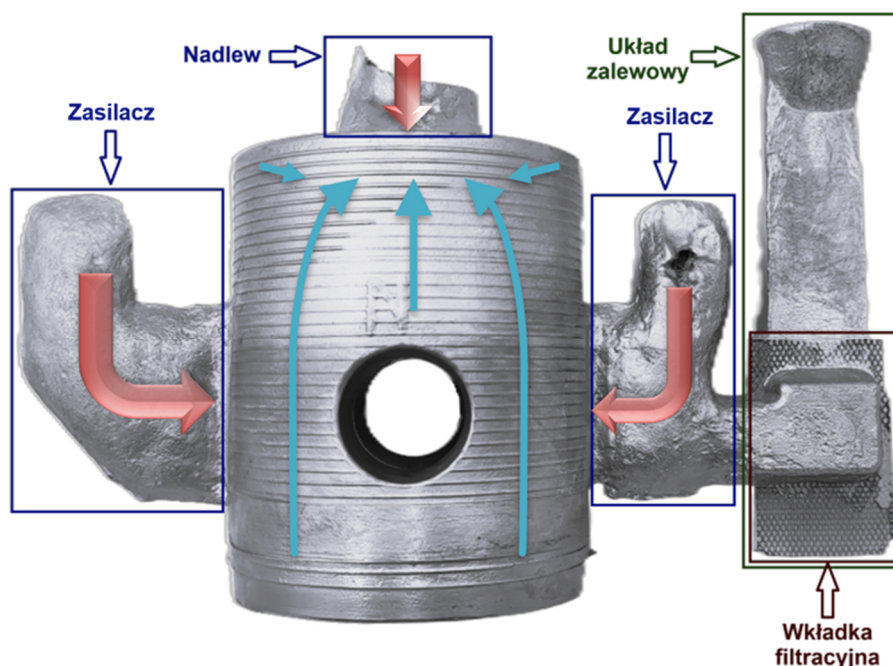
- strefę pod denkiem (zwłaszcza z masywną czaszą),
- strefę nad piastami tłoka (zgrubienia i złączenia żeber),
- zbiegi żeber i podparć (miejsca zbiegu kilku ścianek, tzw. pachwiny),
- lokalnie zgrubienia na płaszczu tłoka (np. pod dolny rowek pierścienia smarującego).

Węzły cieplne stanowią miejsca o opóźnionym przebiegu procesu krystalizacji, co w konsekwencji może prowadzić do szeregu problemów technologicznych. Jeżeli nie zostaną one odpowiednio zasilone ciekłym metalem w trakcie końcowej fazy krzepnięcia, dochodzi do powstawania pustek skurczowych i mikroporowatości skurczowej. Jeżeli natomiast chłodzenie węzłów cieplnych jest niewystarczająco intensywne, utrzymują one wysoką temperaturę w stosunku do reszty odlewu, co sprzyja powstawaniu wad powierzchniowych i strukturalnych. Taka sytuacja może prowadzić do rozrostu ziarna i wzrostu objętości roztworu resztkowego, co potęguje segregację i ryzyko pęknięć na gorąco.

Różna szybkość chłodzenia powoduje zróżnicowanie frakcji i morfologii eutektyki Al-Si (igły/płytki lub rozdrobniona eutektyka), rozmiaru ziarna (strefy gruboziarniste w masywnych sekcjach), rozmieszczenia faz międzymetalicznych (np. bogatych w Fe/Mn/Cr), segregacji Cu, Mg czy Ni w osiach grubszych ścianek. Skutkuje to lokalnym spadkiem wytrzymałości zmęczeniowej, udarności i odporności na pękanie.

Poprawnie zaprojektowany odlew tłokowy powinien charakteryzować się konstrukcją uwzględniającą szereg elementów technologicznych, których zadaniem jest zapewnienie prawidłowego przebiegu procesu krzepnięcia oraz ograniczenie ryzyka powstawania wad odlewniczych. Do kluczowych elementów w odlewie tłokowym należą (Rys. 27):

- nadlew górny, odpowiednio zwymiarowany, którego funkcją jest stworzenie rezerwy ciekłego metalu umożliwiającej kompensację skurczu w końcowej fazie krzepnięcia;
- zasilacze, których geometria i lokalizacja muszą zostać tak dobrane, aby umożliwić skuteczne zasilanie określonych obszarów odlewu, szczególnie narażonych na wystąpienie jam skurczowych;
- układ zalewowy wyposażony we wkładkę filtrującą, zaprojektowany w taki sposób, aby zapewniał zdławienie przepływu ciekłego metalu w celu ograniczenia absorpcji powietrza podczas zalewania; filtry te, wykonywane ze stali lub z włókien odpornych na wysoką temperaturę, pełnią funkcję dwutorową: po pierwsze – zatrzymują zanieczyszczenia makroskopowe (oderwane fragmenty powłoki formy, cząstki past izolacyjnych, duże płyty tlenków), po drugie – stabilizują strugę ciekłego metalu, wymuszając przepływ o charakterze możliwie zbliżonym do laminarnego.



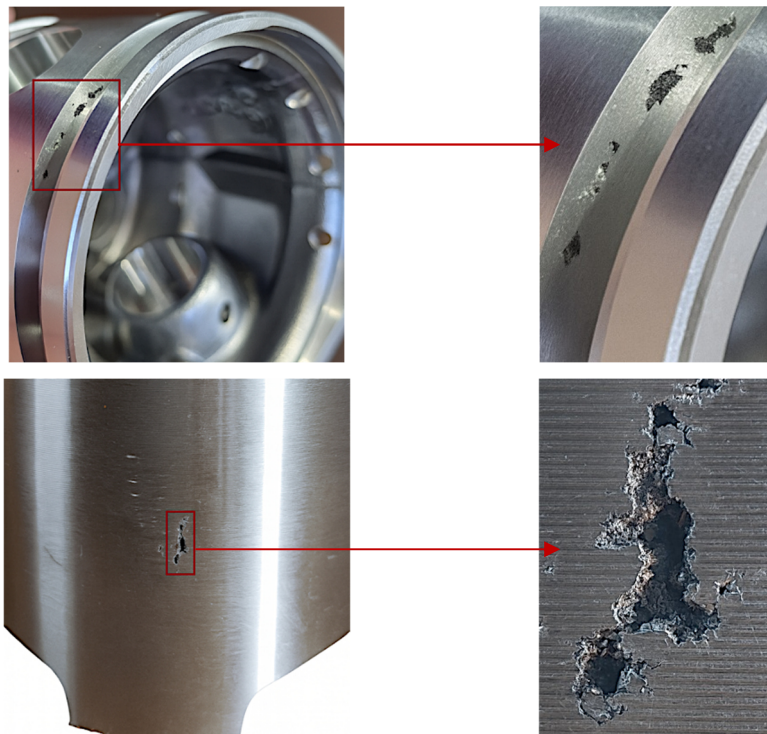
Rys. 27. Odlew tłoka - budowa, zasilanie i kierunek krzepnięcia.

Równocześnie sama forma odlewnicza powinna być wyposażona w odpowiednio zaprojektowany układ chłodzenia oraz lokalne docieplenia. Ich zadaniem jest, we współpracy z konstrukcją odlewu, zapewnienie prawidłowego zasilania ciekłym metalem w trakcie krzepnięcia (na rysunku 27 – czerwone strzałki wskazują kierunek zasilania oraz wymuszenie kontrolowanego, jednokierunkowego przebiegu krystalizacji – strzałki niebieskie). Taki układ znacząco ogranicza możliwość powstawania lokalnych jam skurczowych i zapewnia jednorodną mikrostrukturę odlewu.

Należy podkreślić, iż projektowanie poprawnego procesu odlewania wymaga interdyscyplinarnej wiedzy obejmującej zarówno zagadnienia konstrukcji odlewu, jak i budowy formy odlewniczej, a także znajomości zjawisk metalurgicznych i termodynamicznych towarzyszących procesowi krzepnięcia. Przedsiębiorstwo Złotecki Sp. z o.o. od wielu lat z powodzeniem opracowuje i wdraża formy odlewnicze dedykowane do produkcji tłoków. Pomimo bogatego doświadczenia oraz wysokiego poziomu kompetencji technologicznych, każda nowo zaprojektowana forma poddawana jest procedurze walidacyjnej, obejmującej szereg prób odlewniczych i ewentualnych korekt konstrukcyjnych. Dopiero po uzyskaniu satysfakcjonujących wyników, gwarantujących stabilność procesu i odpowiednią jakość odlewów, forma kierowana jest do regularnej eksploatacji produkcyjnej.

Do typowych wad odlewniczych związanych z niejednorodnością konstrukcji tłoka, należą:

- jamy skurczowe – makroskopowe pustki w partiach krzepnących najpóźniej; efekt niedostatecznego zasilania ciekłym metalem (Rys. 28);



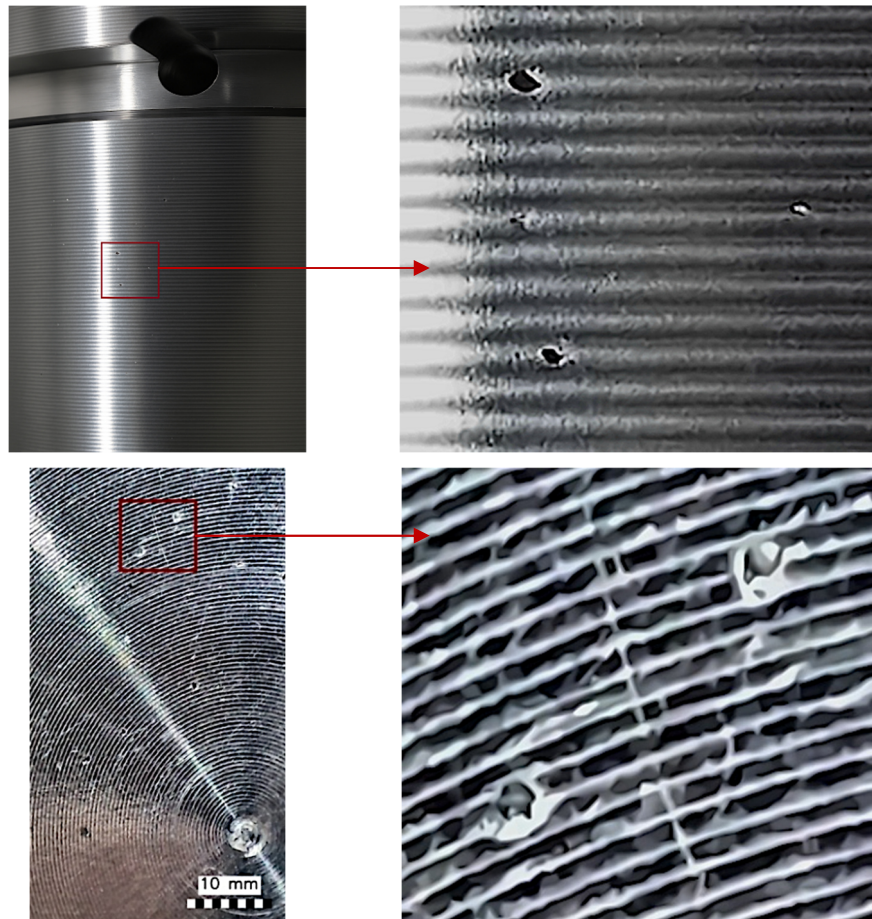
Rys. 28. Wady odlewnicze - jamy skurczowe.

- mikroporowatość skurczowa – drobne pustki rozproszone w całej objętości wężła cieplnego; powstają w wyniku lokalnego spadku ciśnienia cieczy i kontrakcji objętości (Rys. 29);



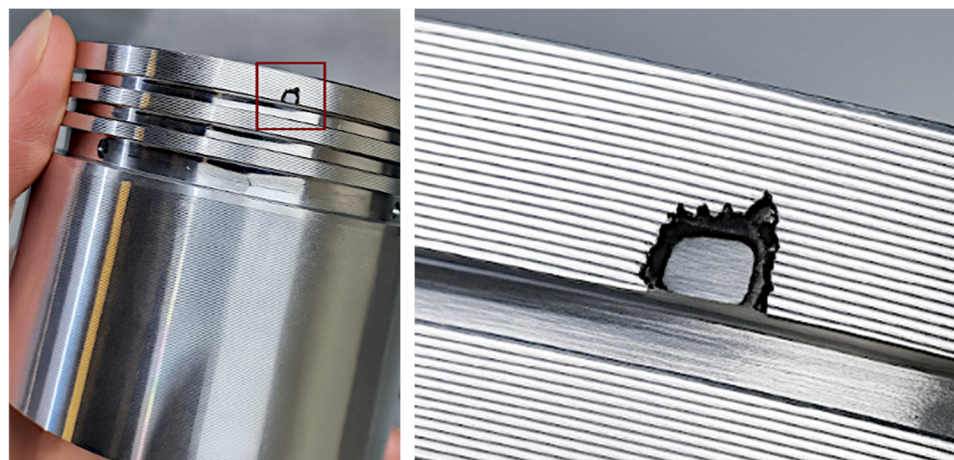
Rys. 29. Wady odlewnicze – mikroporowatość skurczowa.

- porowatość gazowa – drobne pustki o zaokrąglonych / obłych kształtach, są to pęcherzyki gazu (H_2 , powietrze) wciągnięte podczas wypełniania formy ciekłym metalem lub wydzielone w trakcie krzepnięcia występujące szczególnie w cienkich sekcjach płaszcza (Rys. 30);



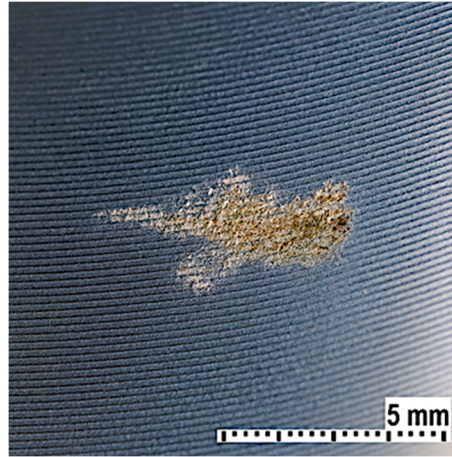
Rys. 30. Wady odlewnicze – porowatość gazowa.

- niedolania i zimne spawy (*ang. cold shuts*) – powstają najczęściej w strefach cienkościennych (płaszcz, krawędzie części pierścieniowej) w wyniku zbyt niskiej temperatury zalewania i niekorzystnej kinematyki przepływu strugi ciekłego stopu (Rys. 31);



Rys. 31. Wady odlewnicze – niedolania, zimne spawy.

- wtrącenia tlenkowe i „bifilmy” – wciągnięte do metalu sfalowane błony tlenkowe, działające jak mikropęknięcia; powiązane z turbulencją i wieloma zawirowaniami strugi metalu podczas zalewania formy (Rys. 32 – płatek tlenkowy ułożony równolegle do powierzchni skrawania);



Rys. 32. Wady odlewnicze – wtrącenie tlenkowe.

Powierzchniowe wady odlewnicze ujawniane są sukcesywnie w trakcie realizacji kolejnych operacji procesu obróbki mechanicznej, kiedy to kolejne warstwy materiału zostają odsłonięte i poddane kontroli. Końcowa, kompleksowa ocena wizualna powierzchni tłoka przeprowadzana jest na specjalnie wyznaczonym stanowisku kontrolnym po zakończeniu pełnego cyklu obróbki skrawaniem. Czynności te realizowane są przez wykwalifikowanych pracowników działu kontroli jakości, zgodnie z zapisami wewnątrzzakładowej instrukcji „Dopuszczalne wady powierzchni tłoków”. Dokument ten pełni funkcję standaryzującą, mając na celu ujednolicenie kryteriów oceny oraz minimalizację wpływu subiektywnej percepcji inspektorów na ostateczną kwalifikację wyrobu. Dzięki temu proces kontroli zapewnia wysoki stopień powtarzalności i obiektywności, a także pozwala na precyzyjne rozróżnianie wad dopuszczalnych od nieakceptowalnych z punktu widzenia wymagań technologicznych i eksploatacyjnych.

Podsumowując, niejednorodna budowa odlewów tłokowych stanowi istotne wyzwanie technologiczne, ponieważ determinuje złożony przebieg procesów cieplnych i metalurgicznych podczas krzepnięcia. Brak odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych skutkuje powstawaniem wad, które obniżają zarówno właściwości mechaniczne, jak i eksploatacyjne tłoka. Dlatego prawidłowe zaprojektowanie odlewu oraz procesu odlewania pozostaje kluczowym elementem zapewnienia wysokiej jakości gotowego wyrobu.

2.2.4 Konstrukcja formy odlewniczej

Proces odlewania zaliczany jest do tzw. procesów specjalnych co oznacza, iż wszelkie nieprawidłowości w jego prowadzeniu mogą skutkować powstawaniem wyrobów niezgodnych, często trudnych do zidentyfikowania na wczesnym etapie. **Szczególnie istotnym problemem jest fakt, że większość wad odlewniczych ujawniana jest nie podczas samego procesu odlewania, lecz dopiero w trakcie późniejszych operacji obróbki skrawaniem. Skutkuje to nie tylko znaczącym wzrostem kosztów produkcji, ale również możliwością występowania opóźnień względem założonych harmonogramów wytwarzania.**

Podstawowym przyrządem stosowanym w technologii odlewania tłoków w przedsiębiorstwie Złotecki Sp. z o.o. jest stalowa forma grawitacyjna. Jej konstrukcja stanowi bezpośrednią odpowiedź na projekt odlewu, który – obok samego kształtu wyrobu – zawiera również szereg elementów technologicznych, takich jak układ zalewowy, nadlewy czy zasilacze, omówione we wcześniejszym podrozdziale.

Aby zapewnić uzyskanie odlewu o możliwie najwyższej jakości, konstrukcja formy odlewniczej musi gwarantować kontrolowany przebieg procesu krzepnięcia. Cel ten realizowany jest poprzez zastosowanie układu chłodzenia oraz odpowiednio rozmieszczonych elementów dociepleń lokalnych, które umożliwiają utrzymanie rezerw ciekłego metalu w krytycznych strefach aż do końcowej fazy krystalizacji. Takie rozwiązanie pozwala na ograniczenie do minimum powstawania wad skurczowych, będących konsekwencją przerwania zasilania metalem w trakcie krzepnięcia.

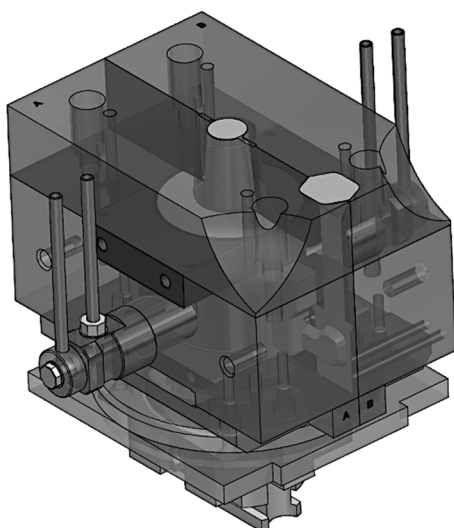
Kolejnym kluczowym elementem formy jest układ zalewowy, którego zasadniczą funkcją jest doprowadzenie ciekłego metalu do wnętrza formy w sposób „uspokojony”, tj. możliwie najbardziej zbliżony do przepływu laminarnego. Odpowiednio zaprojektowany kanał doprowadzający, wypełniający się całkowicie podczas zalewania, ogranicza ryzyko niepożądanego napowietrzenia stopu, które sprzyja tworzeniu się wad odlewniczych.

Dodatkowym elementem wspomagającym prawidłowy przebieg procesu jest stalowa wkładka filtracyjna, której zadaniem jest zarówno dalsze „uspokojenie” przepływu, jak i zatrzymywanie zanieczyszczeń stałych.

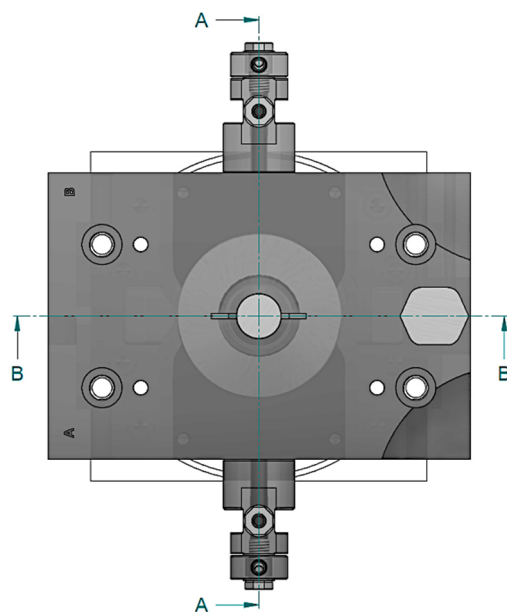
Na rysunku 33 przedstawiono schemat konstrukcji formy odlewniczej wykorzystywanej w firmie Złotecki Sp. z o.o. do wytwarzania odlewów tłokowych metodą grawitacyjną w układzie pionowym. Kolorem zielonym oznaczono odlew właściwy, kolorem niebieskim – elementy układu chłodzenia, kolorem czerwonym – elementy dociepleń. Dodatkowo wyróżniono wkładkę filtracyjną, podkreślając jej znaczenie w stabilizacji przepływu ciekłego metalu.

W ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w projektowaniu form odlewniczych znajduje symulacja komputerowa procesu odlewania z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi numerycznych, takich jak MAGMASoft, ProCAST czy FLOW - 3D Cast. Oprogramowanie to pozwala na modelowanie zarówno przepływu ciekłego metalu w układzie zalewowym, jak i rozkładu temperatury w formie odlewniczej podczas krzepnięcia. Dzięki temu możliwe jest prognozowanie miejsc potencjalnego powstawania wad (m.in. porowatości skurczowej, segregacji pierwiastków czy zjawiska pęknięcia na gorąco) oraz optymalizacja konstrukcji nadlewów, kanałów zalewowych i układów chłodząco-docieplających jeszcze na etapie projektowym. Symulacje te znacząco redukują liczbę iteracji prób produkcyjnych, skracając czas wdrożenia nowych form do eksploatacji i ograniczając koszty związane z ich modyfikacją.

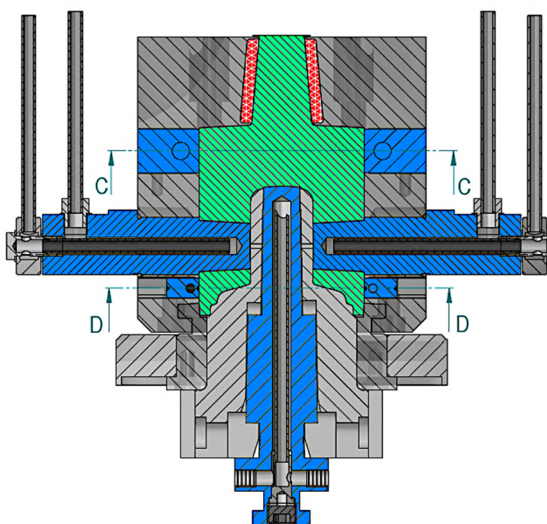
W przedsiębiorstwie Złotecki Sp. z o.o. przeprowadzono testy w środowisku MAGMASoft dla wybranych form odlewniczych, które były wcześniej zaprojektowane i eksploatowane w warunkach produkcyjnych. Wyniki symulacji potwierdziły poprawność stosowanej technologii i słuszność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Jednocześnie, ze względu na fakt, iż przedsiębiorstwo specjalizuje się w wytwarzaniu odlewów tłokowych o wysokim stopniu podobieństwa geometrycznego, firma wykorzystuje zgromadzoną przez wiele lat wiedzę praktyczną z zakresu projektowania form. W konsekwencji, po przeprowadzeniu wspomnianych walidacji, podjęto decyzję o rezygnacji z stosowania modeli komputerowych na rzecz dalszego rozwijania i doskonalenia własnych procedur projektowych sprawdzonych w praktyce przemysłowej.



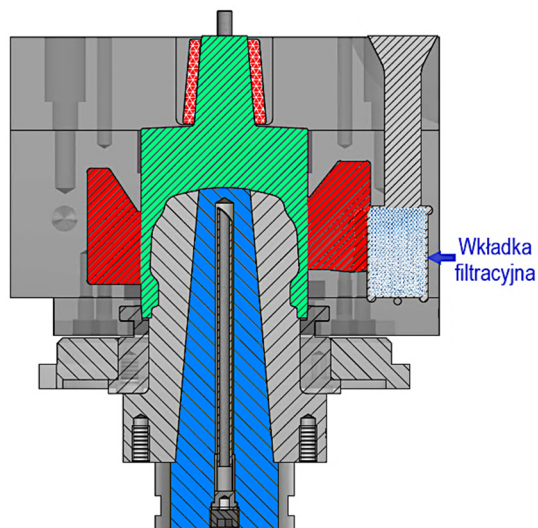
Widok izometryczny



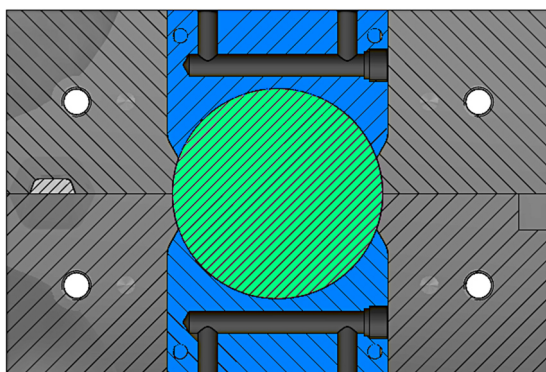
Widok z góry



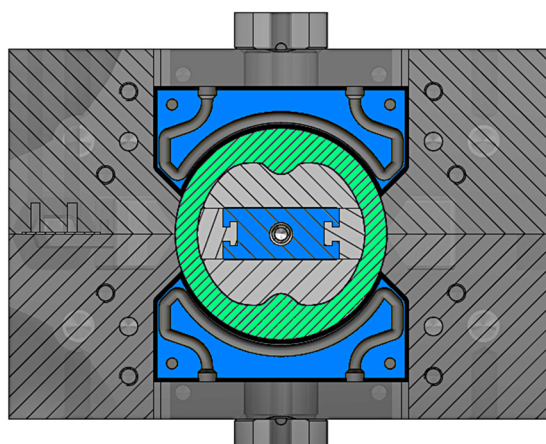
Przekrój A-A



Przekrój B-B



Przekrój C-C



Przekrój D-D

Rys. 33. Schemat konstrukcji formy odlewniczej stosowanej do wytwarzania odlewów tłokowych.

2.3 Opis procesu produkcyjnego odlewów tłokowych

2.3.1 Przygotowanie stopu

W przedsiębiorstwie Złotecki Sp. z o.o. do procesu odlewania tłoków wykorzystywany jest wyłącznie atestowany surowiec pochodzący od uznanych krajowych producentów aluminium i jego stopów. Każda nowa partia materiału, przed dopuszczeniem do produkcji, poddawana jest weryfikacji w dziale kontroli jakości pod kątem zgodności składu chemicznego z wymaganiami określonymi w zakładowych specyfikacjach technicznych. Dodatkowo, w trybie okresowym, próbki surowca przesyłane są do akredytowanych laboratoriów zewnętrznych celem przeprowadzenia badań spektrometrycznych, które pozwalają na potwierdzenie zgodności dostarczonego stopu z dokumentacją atestową.

Materiał przechowywany jest w dedykowanym magazynie surowców, którego warunki składowania eliminują ryzyko zawilgocenia gąsek i waflów aluminiowych. Kontrola wilgotności ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa oraz stabilności procesu odlewania. Zawilgocone fragmenty materiału mogą bowiem prowadzić do zwiększonego zawodorowania ciekłego metalu, co z kolei skutkuje pogorszeniem właściwości mechanicznych odlewów. Jeszcze bardziej niebezpiecznym zjawiskiem jest możliwość wystąpienia gwałtownych reakcji fizykochemicznych w przypadku zanurzenia surowca zawierającego kieszenie z wodą lub wilgocią pod powierzchnię ciekłego stopu. Prowadzi to do błyskawicznej przemiany wody w przegrzaną parę wodną, której nagły przyrost objętości powoduje eksplozję parową, skutkującą wyrzutem metalu z tygla z dużą siłą. Z tego względu w zakładzie przykładą się szczególną wagę do zapewnienia, aby każda partia stopu kierowana do procesu była całkowicie sucha.

Surowiec dostarczany jest na odlewnię w postaci stosów gąsek lub waflów, w zależności od producenta i sposobu przygotowania materiału. Równocześnie **z materiałem pierwotnym, do wsadu topielnego kierowane są również tzw. zawroty produkcyjne, obejmujące odłamane lub odcięte elementy technologiczne, takie jak nadlewy, zasilacze czy fragmenty układu zalewowego. Stosowanie zawrotów pozwala na efektywne gospodarowanie materiałem i ograniczenie strat produkcyjnych, przy jednoczesnym zachowaniu wymagań jakościowych.** W przedsiębiorstwie ustalono zasadę, że udział zawrotów produkcyjnych w całkowitej masie wsadu nie powinien przekraczać 25% (Rys. 34). Wartość ta została określona jako graniczna, pozwalająca z jednej strony na uzyskanie efektów ekonomicznych, a z drugiej na ograniczenie wad odlewniczych.



Rys. 34. Zawroty produkcyjne.

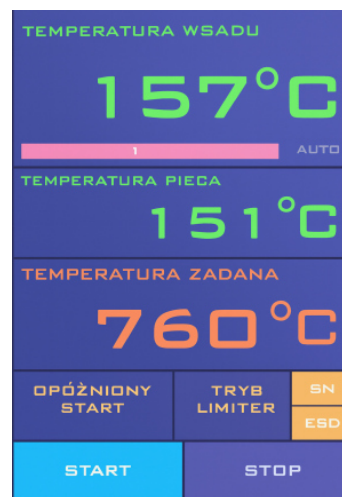
Poniżej przedstawiona jest kolejność czynności prowadząca do przygotowania gotowego do zastosowania stopu Al-Si:

- 1) zasypanie tygla zawrotami produkcyjnymi do 1/3 jego wysokości (Rys. 35);



Rys. 35. Widok tygla pieca odlewniczego - rozpoczęcie topienia.

- 2) ustawienie sterownika pieca na zadaną temperaturę, tj. 760 °C pozwala to na utrzymanie stabilnej temperatury wsadu pieca na poziomie 730 °C $\pm$ 5 °C; pomiar ciekłego metalu miernikiem EMT-300 (dostawca Czaki) z termoparowym czujnikiem typu PYT-K (-40 °C – 1100 °C, NiCr-NiAl) (Rys. 36);



Rys. 36. Sterownik pieca.

- 3) przetopienie zawrotów produkcyjnych oraz gąsek materiału pierwotnego (Rys. 37);



Rys. 37. Widok tygła pieca odlewniczego - topienie gąsek.

- 4) stopniowe dokładanie materiału w postaci gąsek i topienie do wypełnienia tygła;
5) wykonanie próby miseczkowej (Rys. 38);

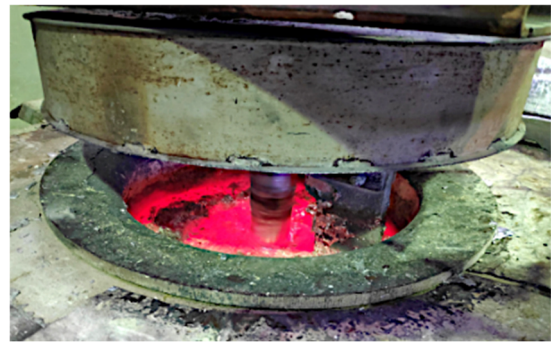


Rys. 38. Próba miseczkowa.

- 6) wsypanie do tygla proszku rafinującego (COVERAL ECO2532) w ilości 200 g na 200 kg stopionego stopu;
- 7) przeprowadzenie rafinacji barbotażowej z wykorzystaniem rafinatora obrotowego (URO-200 XR) produkcji IMN-OML Skawina (Rys. 39); parametry procesu:
- gaz rafinujący: Argon Premium 5.0 (Air Products),
 - czas przepływu gazu: 10 min,
 - natężenie przepływu gazu: 10 dm³/min,
 - obroty rotora: 350 obr./min.



(a)



(b)

Rys. 39. Proces barbotażu: (a) widok urządzenia; (b) widok urządzenia podczas pracy w ciekłym stopu Al-Si.

- 8) usunięcie zanieczyszczeń z powierzchni ciekłego stopu za pomocą odlewniczej łyżki zgarniającej; umieszczenie zgarów w przeznaczonym do tego celu pojemniku (Rys. 40);



(a)



(b)

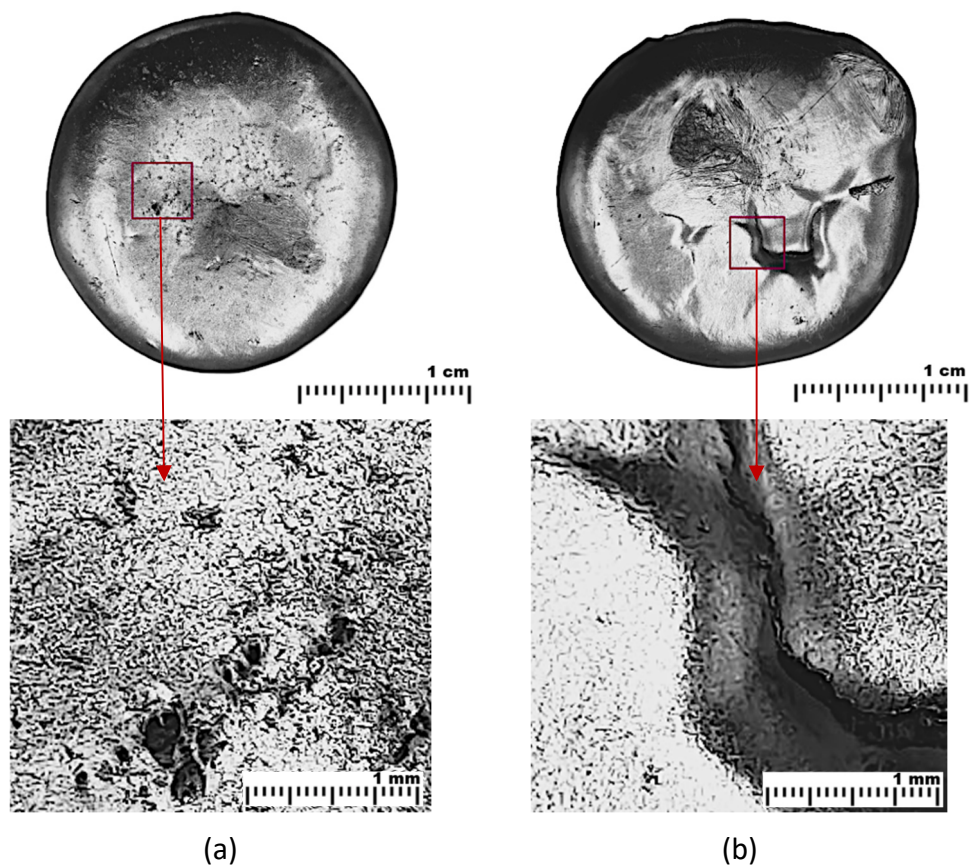


(c)

Rys. 40. Etap usuwania zgarów: (a) widok po rafinacji; widoczne zanieczyszczenia i tlenki wyniesione na powierzchnię stopu; (b) przygotowanie do usunięcia zanieczyszczeń; (c) oczyszczenie stopu.

- 9) wytrzymanie stopu w czasie około 15 min (czas potrzebny na flotację pęcherzy gazowych);
- 10) powtórzenie próby miseczkowej, w celu porównania próbek pobranych przed procesem rafinacji oraz po jego przeprowadzeniu; po odlaniu próbek dokonuje się wizualnej analizy ich górnych powierzchni, co umożliwia jakościową ocenę stopnia zagazowania stopu;
- 11) rozpoczęcie procesu odlewania tłoków.

Na rysunku 41a przedstawiono makrostrukturę próbki ze stopu Al-Si przed rafinacją o charakterystycznej, porowatej powierzchni z licznymi, otwartymi jamkami powstałymi w miejscach po pęcherzach gazowych. Zjawisko to wynika z faktu, iż w trakcie wydłużonego krzepnięcia gazy rozpuszczone w metalu ulegały wydzielaniu i – dzięki mechanizmowi flotacji – unoszone były ku górze. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym temu procesowi był materiał formy do odlewania próbek, wykonany z grafitu, który charakteryzuje się niską przewodnością cieplną, a tym samym powoduje wolniejsze odprowadzanie ciepła i wydłużenie czasu krystalizacji. Dla porównania, na rysunku 41b przedstawiono próbkę pobraną z metalu po przeprowadzonej rafinacji barbotażowej.



Rys. 41. Próba miseczkowa – próbki porównawcze: (a) przed rafinacją, (b) po rafinacji.

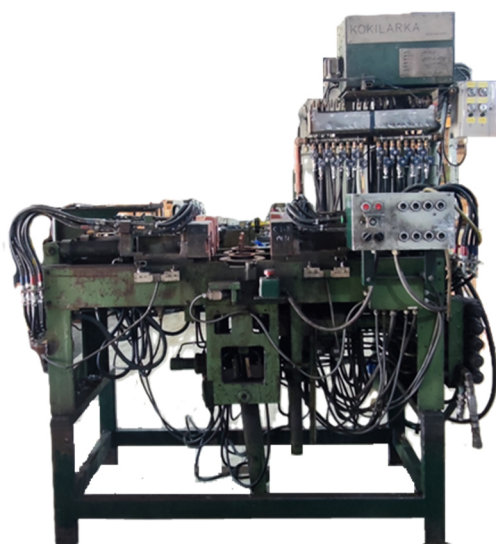
W tym przypadku powierzchnia próbki jest zdecydowanie bardziej gładka, pozbawiona otwartych pęcherzy gazowych. Widoczna jest natomiast tendencja do lokalnego zapadania się materiału w formie niewielkich jam skurczowych, co stanowi charakterystyczny wskaźnik niskiego stopnia zagazowania stopu. Zjawisko to wskazuje, że proces rafinacji skutecznie obniżył zawartość gazów rozpuszczonych, a powstałe jamy mają charakter skurczowy, a nie gazowy.

2.3.2 Przygotowanie kokilarki

Wszystkie maszyny odlewnicze (kokilarki) stosowane w firmie Złotecki Sp. z o.o. są zaewidencjonowane, a nad ich stanem technicznym czuwają pracownicy działu utrzymania ruchu (DUR). Przed przystąpieniem do właściwego procesu odlewania konieczne jest przygotowanie półautomatów odlewniczych, na których instalowane są formy kokilowe dedykowane do produkcji poszczególnych grup wytwarzanych tłoków. Ze względu na szeroki asortyment produkowanych wyrobów firma dysponuje czterema typami kokilarek (Rys. 42), co umożliwia realizację procesu odlewania w różnych konfiguracjach technologicznych dla odlewania:

- tłoków bez wkładek typu Alfin (Rys. 42 a), stosowanych przede wszystkim w sprężarkach, tłokach do silników benzynowych oraz jednostkach napędowych zasilanych olejem opałowym, charakteryzujących się mniejszym obciążeniem cieplnym i mechanicznym bądź opartych na starszych rozwiązaniach konstrukcyjnych; w tej grupie możliwe jest wykonywanie odlewów zarówno bez dodatkowych wzmocnień, jak i z zastosowaniem stalowych wkładek wzmacniających lub kompensacyjnych, które poprawiają nośność i stabilność wymiarową tłoka.
- tłoków o podwyższonej odporności cieplnej i mechanicznej z wkładkami typu Alfin w szczególności do konstrukcji z wzmocnionym progiem ogniowym (tzw. tłoki TURBO); w tej grupie produkcyjnej wykorzystywane są trzy maszyny: dwie przeznaczone do odlewania w układzie pionowym oraz jedna do odlewania w układzie poziomym (Rys. 42 b, c, d).

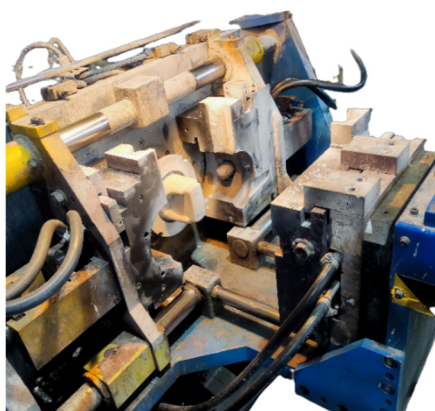
Zróznicowanie konfiguracji urządzeń pozwala na optymalny dobór technologii w zależności od geometrii tłoka oraz wymagań w zakresie organizacji procesu produkcyjnego.



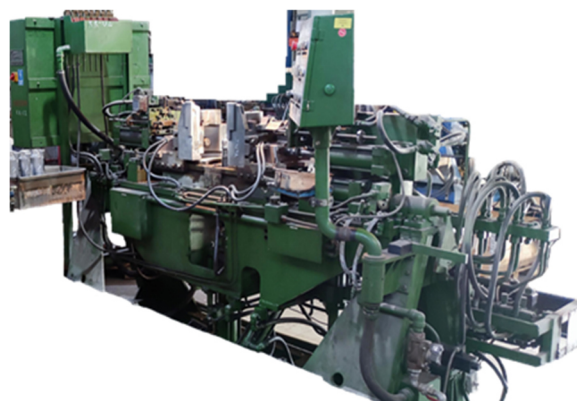
(a)



(b)



(c)



(d)

Rys. 42. Kokilarki stosowane do wytwarzania odlewów tłokowych: (a) w układzie pionowym bez wkładki Alfin, (b) w układzie pionowym z wkładką Alfin do średnicy 105 mm, (c) w układzie poziomym z wkładką Alfin, (d) w układzie pionowym z wkładką Alfin powyżej średnicy 110 mm.

Poniżej przedstawiono kolejność czynności prowadzących do przygotowania kokilarki do pracy na stanowisku odlewniczym.

- 1) Dostarczenie kokilarki na stanowisko odlewnicze.
- 2) Sprawdzenie poprawności funkcjonowania kokilarki.
- 3) Montaż formy odlewniczej.
- 4) Podłączenie układu chłodzenia do formy odlewniczej.
- 5) Wpisanie nastaw do sterownika układu chłodzenia, w zależności od wykonywanego odlewu.
- 6) Testowanie układu chłodzenia (sprawdzenie drożności kanałów chłodzących).

- ### 2.3.3 Przygotowanie formy

Wyróżnia się następujące grupy kwalifikacyjne:

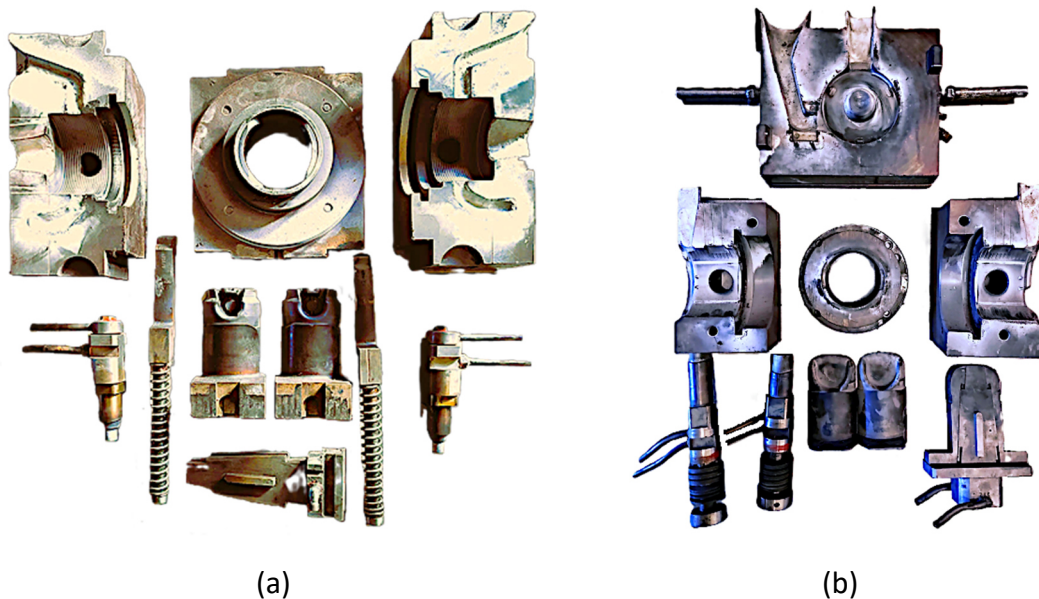
- 60

po zakończeniu kolejnego zlecenia produkcyjnego podlega szczegółowemu przeglądowi diagnostycznemu w celu oceny postępu zużycia;

- przywieszka czerwona – forma wymaga przeprowadzenia prac regeneracyjnych i kierowana jest do warsztatu naprawczego; do czasu wykonania niezbędnych napraw i ponownej kwalifikacji nie jest dopuszczona do eksploatacji w procesie produkcyjnym.

System znakowania form w firmie Złotecki Sp. z o.o. zapewnia jednoznaczną identyfikację ich stanu technicznego oraz minimalizuje ryzyko przypadkowego użycia formy, która nie spełnia wymagań jakościowych. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie wysokiego poziomu powtarzalności procesu odlewania oraz przedłużenie cyklu życia form poprzez odpowiednio zaplanowane działania regeneracyjne.

Przed przystąpieniem do właściwego procesu odlewania konieczne jest odpowiednie przygotowanie formy odlewniczej (Rys. 44).

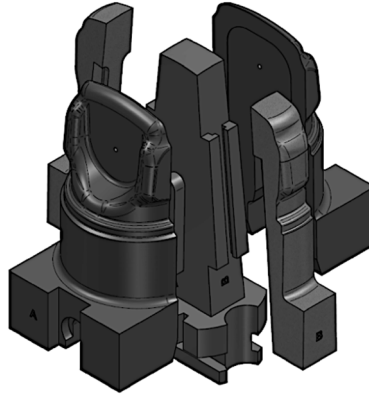


Rys. 44. Formy odlewnicze w układzie: (a) pionowym; (b) poziomym.

Niezależnie od tego czy forma jest w układzie pionowym czy poziomym procedura przygotowania formy odlewniczej jest do siebie zbliżona i polega na:

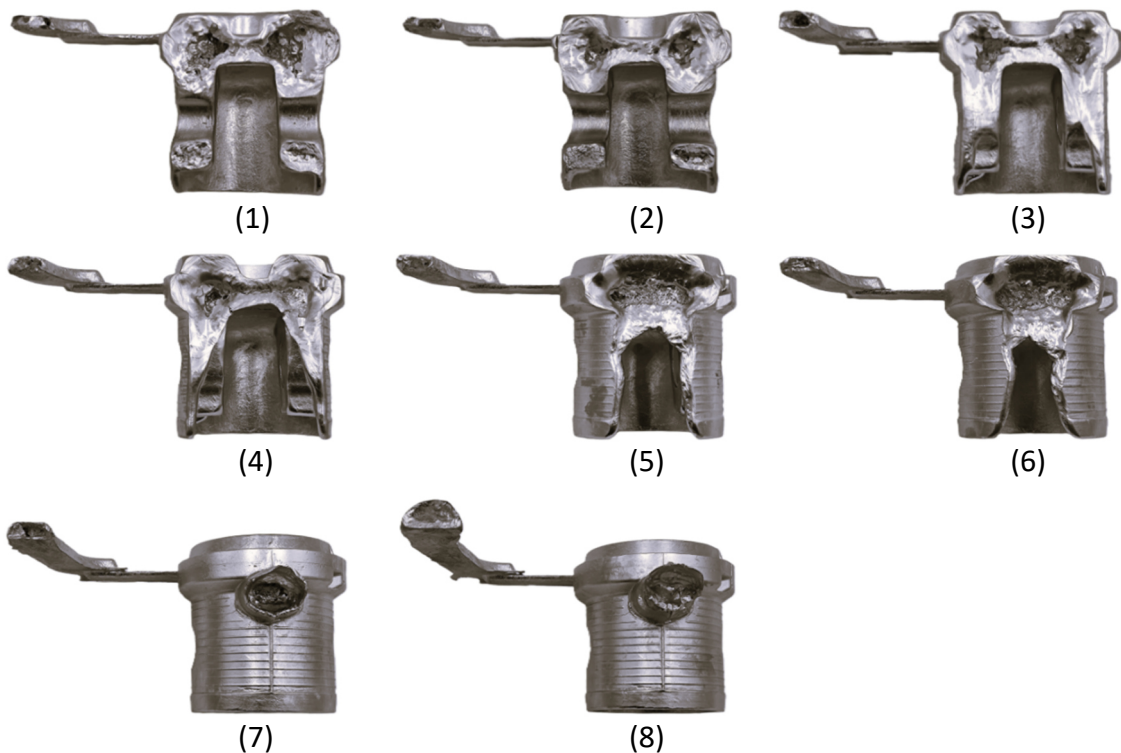
- 1) pobraniu formy z magazynu, zgodnie z informacją na zleceniu produkcyjnym,
- 2) montażu formy na kokilarce,
- 3) podłączeniu układu chłodzenia do kokilarki,
- 4) sprawdzeniu drożności kanałów chłodzących,

- 5) sprawdzeniu i ewentualnemu uzupełnieniu ubytków izolacji ceramicznej w kieszeniach zasilaczy i nadlewów w szczękach formy,
- 6) smarowaniu powierzchni współpracujących wkładów wewnętrznych (Rys. 45),

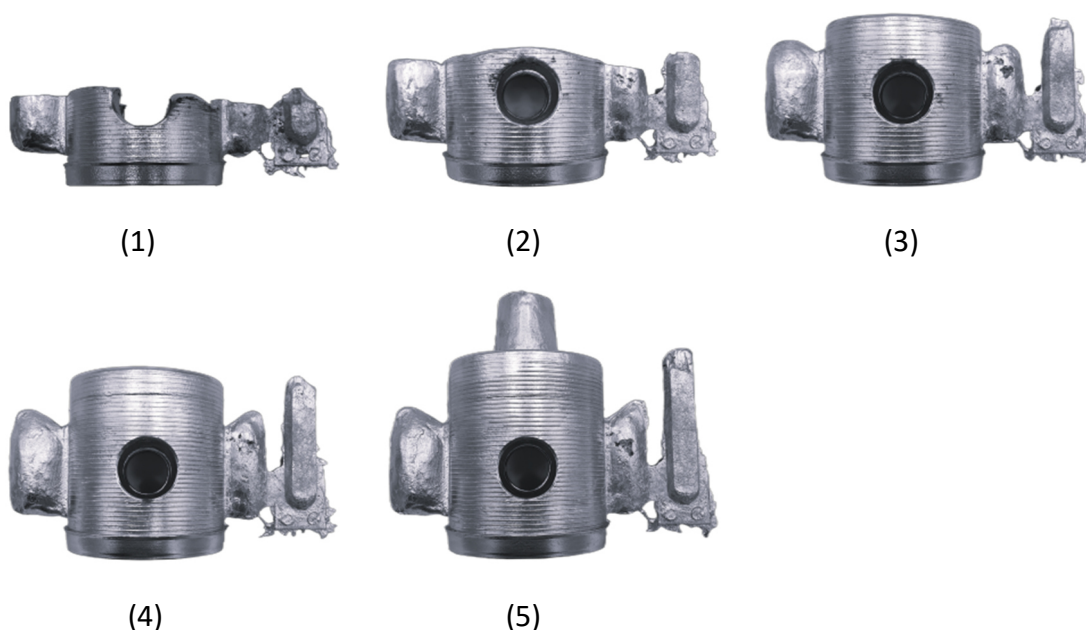


Rys. 45. Wkłady formy odlewniczej odpowiedzialne za kształtowanie wnętrza odlewu.

- 7) rozgrzewaniu formy poprzez stopniowe wypełnianie ciepłym stopem, do osiągnięcia na ściankach formy temperatury zalewania 300 °C (Rys. 46 i Rys. 47); pomiar temperatury w trakcie rozgrzewania formy oraz okresowo w trakcie prowadzonego procesu odlewania (zwłaszcza po przestojach) jest prowadzony z wykorzystaniem pirometru wysokotemperaturowego AB-8829 (- 50÷1000°C);



Rys. 46. Kolejne etapy procesu rozgrzewania formy odlewniczej dla odlewu poziomego: 1→8.



Rys. 47. Kolejne etapy procesu rozgrzewania formy odlewniczej dla odlewu pionowego: 1→5.

- 8) wykonaniu metodą natryskową pokrycia wkładów formujących i szczęk bocznych;
- 9) rozpoczęciu procesu odlewania tłoków.

2.3.4 Odlewanie

Po zakończeniu etapu przygotowania surowca, kokilarki oraz formy odlewniczej rozpoczyna się właściwy proces odlewania tłoków. Parametry procesu są nadzorowane przez sterownik kokilarki, którego nastawy obejmują przede wszystkim czas krzepnięcia oraz czas załączenia i wyłączenia układu chłodzenia. Od momentu zamknięcia i złożenia elementów kokilarki w pozycję roboczą rozpoczyna się naliczanie czasu krzepnięcia, a równocześnie aktywowany jest system chłodzenia.

Układ chłodzenia zasilany jest wodą przygotowywaną w centralnym systemie chłodniczym, w którym zastosowano duży bufor wodny, wydajny wymiennik ciepła oraz dodatkowy agregat chłodniczy stabilizujący temperaturę czynnika chłodzącego w zakładanym przedziale roboczym. **Warto podkreślić, że odzyskiwane w tym procesie ciepło odpadowe wykorzystywane jest do ogrzewania magazynów zakładowych, co stanowi przykład efektywnego zagospodarowania energii.**

Standardowy cykl produkcyjny odlewania tłoków bez wkładki typu Alfin przebiega według poniższej sekwencji czynności:

- 1) rozpoczęcie cyklu – operator naciska jednocześnie dwa przyciski na pulpicie sterującym i utrzymuje je do chwili całkowitego złożenia wkładów formujących wewnętrzne powierzchnie odlewu; rozwiązanie to pełni funkcję zabezpieczającą przed przypadkowym włożeniem dłoni w przestrzeń roboczą, w której pracują siłowniki hydrauliczne;
- 2) przedmuch sprężonym powietrzem – wkłady i szczęki formy odlewniczej są oczyszczane z ewentualnych zanieczyszczeń, które mogły się pojawić podczas ich składania;
- 3) zamknięcie formy – ponowne, równoczesne naciśnięcie przycisków sterujących powoduje zsunięcie szczęk formy na pierścieniu bazującym i jej dokładne spasowanie; od tej chwili sterownik kokilarki uruchamia odliczanie czasu krzepnięcia i chłodzenia;
- 4) przygotowanie pieca odlewniczego – odsunięcie pokrywy tygla;
- 5) usunięcie tlenków – powierzchniowa warstwa tlenków znajdująca się na lustrze ciekłego metalu zostaje zsunięta przy użyciu łyżki odlewniczej w kierunku ścianek tygla;
- 6) nabranie ciekłego metalu do łyżki odlewniczej;
- 7) transport metalu – przeniesienie łyżki nad wlew formy odlewniczej;
- 8) zalewanie formy – wypełnienie wnęki formy ciekłym stopem Al-Si w sposób ciągły i kontrolowany;
- 9) usunięcie nadmiaru stopu pozostałego w łyżce odlewniczej do pojemnika przeznaczonego na zlewki;
- 10) oczekiwanie na krzepnięcie stopu – czas zastygnięcia odlewu jest parametrem ustawianym w sterowniku kokilarki w zależności od typu tłoka;
- 11) otwarcie formy – po odliczeniu zadanego czasu kokilarka automatycznie otwiera szczęki formy i rozsuwa wkłady kształtujące;
- 12) wyjęcie odlewu – operator usuwa odlew z formy i umieszcza go w wannie do przesycania;
- 13) wizualna ocena jakości odlewu – sprawdzenie czy na odlewie nie znajdują się widoczne wady odlewnicze, takie jak niedolania, zimne spawy, wciągi, wtrącenia;
- 14) przeniesienie odlewu – po zakończeniu przesycania odlew odkładany jest do pojemnika transportowego, co zamyka cykl produkcyjny.

Oprócz czynności związanych z obsługą cyklu produkcyjnego, odlewnik odpowiedzialny jest także za bieżący nadzór nad stanem formy odlewniczej. Do jego obowiązków należy przede wszystkim uzupełnianie ubytków pasty izolacyjnej w sytuacji, gdy w wyniku eksploatacji dochodzi do wykruszenia. W przypadku zużycia się pokrycia na powierzchni wkładów lub szczęk formy operator dokonuje natrysku nowej warstwy ochronnej, co pozwala na utrzymanie właściwych, powtarzalnych warunków wytwarzania elementów tłokowych. Równocześnie odlewnik dba o utrzymywanie formy w stałej temperaturze procesowej co zapobiega powstawaniu wad związanych z jej lokalnym przechłodzeniem lub przegrzaniem. W sytuacji, gdy dochodzi do przerw w procesie produkcyjnym (np. przerwy śniadaniowej), przed ponownym rozpoczęciem odlewania operator dokonuje dogrzania formy poprzez wykonanie tzw. odlewów częściowych. Procedura ta pozwala na przywrócenie odpowiedniego poziomu temperatury roboczej formy oraz zapewnienie powtarzalnych warunków krzepnięcia metalu.

Dodatkowe obowiązki spoczywają na odlewniku w przypadku wykonywania odlewów z wkładką typu Alfin. Operator odpowiada wówczas za prawidłowe przygotowanie wkładki w procesie alfinizacji, polegającym na wytworzeniu dyfuzyjnej warstwy łączącej pomiędzy żeliwną wkładką a stopem aluminium. Proces ten realizowany jest poprzez zanurzenie wkładki w ciekłym aluminium o odpowiednio dobranym składzie chemicznym i utrzymywanie jej w nim przez ściśle określony czas. Zabieg prowadzony jest na dodatkowym, niezależnym stanowisku wyposażonym w oddzielny piec, co umożliwia pełną kontrolę nad parametrami procesu alfinizacji oraz zapewnia wysoką powtarzalność jakościową przygotowanych wkładek.

2.4 Model procesu odlewania

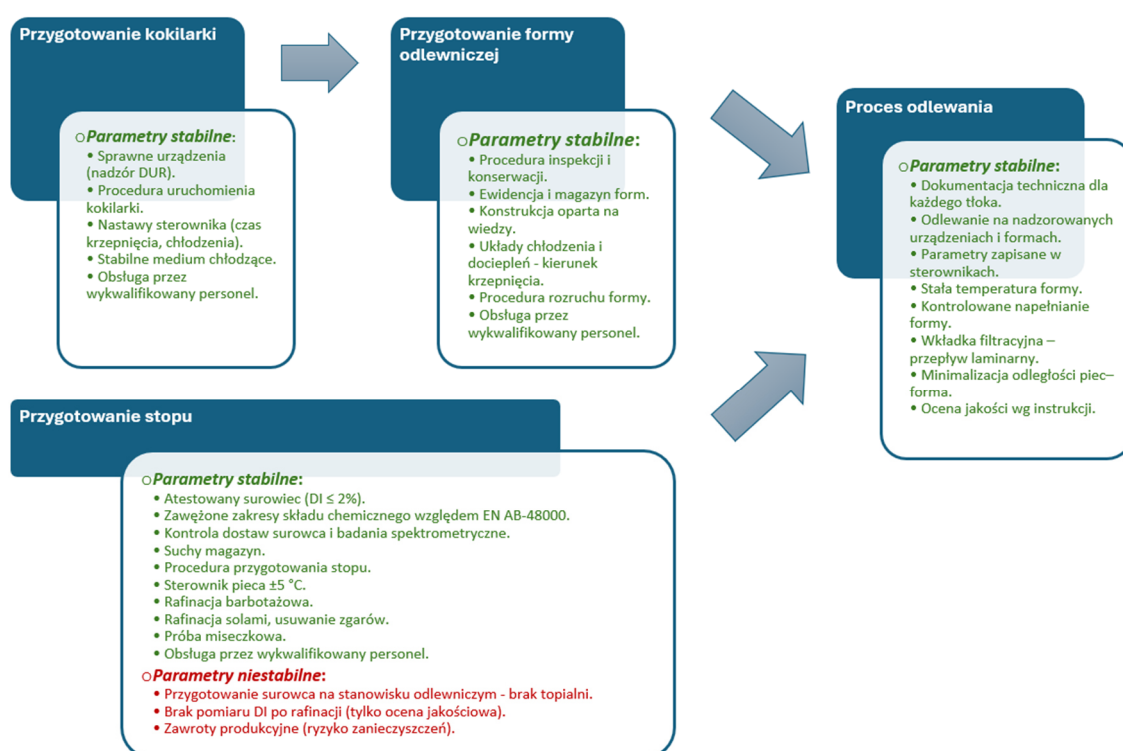
Na podstawie przeprowadzonej szczegółowej analizy przebiegu procesu produkcyjnego, obejmującej kluczowe elementy procesu odlewania tłoków, a także zagadnień związanych z charakterystyką odlewów, konstrukcją form odlewniczych oraz specyfiką urządzeń wykorzystywanych do realizacji procesu, opracowano uproszczony model produkcyjny (Rys. 48). Model ten stanowi syntetyczne odwzorowanie najistotniejszych czynników technologicznych determinujących jakość odlewów tłokowych.

W opracowanym modelu wyróżniono dwie zasadnicze grupy parametrów:

- **parametry stabilne** – obejmujące zmienne procesowe, które mogą być w sposób powtarzalny kontrolowane i utrzymywane w zadanych granicach tolerancji;

- **parametry niestabilne** – obejmujące zmienne trudniejsze do jednoznacznego przewidzenia i kontrolowania, podlegające wpływowi czynników zewnętrznych lub losowych.

Takie rozróżnienie pozwala zarówno na usystematyzowanie wiedzy o procesie, jak i wskazanie obszarów o kluczowym znaczeniu dla utrzymania stabilności jakościowej wytwarzanych elementów tłokowych. Model ten może być wykorzystany jako narzędzie wspomagające proces decyzyjny w zakresie doboru parametrów technologicznych oraz jako punkt odniesienia w dalszych badaniach mających na celu optymalizację procesu odlewania tłoków.



Rys. 48. Model procesu odlewania tłoków.

W trakcie przygotowania modelu wyróżniono cztery zasadnicze etapy: przygotowanie kokilarki, przygotowanie formy odlewniczej, przygotowanie stopu oraz proces odlewania.

Przygotowanie kokilarki

- **Parametry stabilne:** obejmują m.in. zapewnienie pełnej sprawności urządzeń pod nadzorem działu utrzymania ruchu (DUR), stosowanie ustandaryzowanych procedur uruchomienia kokilarki, kontrolę nastaw sterownika (czas krzepnięcia i chłodzenia), wykorzystanie medium chłodzącego o stałych parametrach

temperaturowych w ramach systemu przygotowania wody procesowej oraz obsługę urządzeń przez wykwalifikowany personel.

- **Parametry niestabilne:** nie występują.

Przygotowanie formy odlewniczej

- **Parametry stabilne:** obejmują stosowanie procedury inspekcji technicznej zapewniającej utrzymanie form w doskonałym stanie, prowadzenie ewidencji i przechowywanie form w wyznaczonym magazynie, projektowanie konstrukcji na podstawie ugruntowanej wiedzy inżynierskiej, wykorzystywanie systemu chłodzenia i lokalnych dociepleń w celu kontrolowania kierunku krystalizacji, stosowanie ustandaryzowanej procedury rozruchu formy odlewniczej oraz obsługę przez wykwalifikowanych pracowników.
- **Parametry niestabilne:** nie występują.

Przygotowanie stopu

- **Parametry stabilne:** obejmują wykorzystanie wyłącznie atestowanego surowca z określonym wskaźnikiem DI (max. 2%) i zawężonych zakresach składu chemicznego dla pierwiastków stopowych w celu zwiększenia powtarzalności właściwości, kontrolę przy odbiorze oraz okresowe badania spektrometryczne w laboratoriach zewnętrznych, przechowywanie surowca w suchym magazynie, realizację ustandaryzowanej procedury przygotowania stopu, kontrola temperatury pieca za pomocą sterownika w granicach ± 5 °C, prowadzenie rafinacji barbotażowej i rafinacji solnej w celu usuwania zgarów, ocenę jakościową (próba miseczkowa), obsługę procesu realizowaną przez wykwalifikowany personel.
- **Parametry niestabilne:** brak dedykowanej topialni (surowiec przygotowywany jest bezpośrednio na stanowisku produkcyjnym), brak pomiaru wartości wskaźnika DI po rafinacji barbotażowej (stosowana jest jedynie ocena jakościowa – próba miseczkowa), wykorzystanie zawrotów produkcyjnych, które mogą wprowadzać dodatkowe zanieczyszczenia.

Odewanie

- **Parametry stabilne:** obejmują przygotowanie dla każdego odlewu dokumentacji technicznej z parametrami procesu, realizację odlewania na nadzorowanych kokilarkach i formach odlewniczych, stosowanie parametrów zapisanych w sterownikach urządzeń w celu zapewnienia powtarzalności, pracę na formie

o zadanej stałej temperaturze, zalewanie formy w sposób ograniczający „aspirację powietrza”, stosowanie wkładek wymuszających przepływ zbliżony do laminarnego, minimalizację odległości pomiędzy piecem a formą (co ogranicza straty ciepłe i powstawanie warstw tlenkowych) oraz ocenę jakości gotowego tłoka na podstawie ustandaryzowanej dokumentacji kontrolnej.

- **Parametry niestabilne:** nie występują.

Na podstawie szczegółowej analizy parametrów procesu wytwarzania odlewów tłokowych ze stopów Al-Si zakwalifikowanych do grupy niestabilnych, a także w oparciu o spostrzeżenia wynikające z bieżącej praktyki produkcyjnej sformułowano zestaw problemów badawczych. Stanowią one punkt wyjścia do dalszych analiz i eksperymentów, których celem jest identyfikacja przyczyn zmienności procesowej, określenie ich wpływu na jakość odlewów oraz opracowanie metod minimalizacji ryzyka powstawania wad odlewniczych w końcowych wyrobach tłokowych.

3. Teza i cel pracy

Na podstawie przeglądu literatury, szczegółowej analizy procesu produkcyjnego oraz wyników badań wstępnych sformułowano następującą tezę pracy:

Istnieje bezpośrednia zależność między doborem parametrów procesu przygotowania ciekłego stopu a poziomem brakowości ujawnianej na etapie obróbki końcowej. Właściwa parametryzacja procesu pozwoli na ograniczenie wad odlewniczych w produkcji tłoków do silników spalinowych i sprężarek powietrza.

Głównym celem niniejszej pracy była identyfikacja oraz ocena parametrów technologicznych procesu przygotowania ciekłego stopu, determinujących jakość odlewów tłokowych wykonywanych ze stopów okołoeutektycznych. Realizacja tego celu była ukierunkowana na opracowanie rozwiązań technologicznych pozwalających na zmniejszenie poziomu brakowości wynikającej z wad odlewniczych, a tym samym na obniżenie kosztów produkcji oraz ograniczenie negatywnego wpływu procesu odlewniczego na środowisko naturalne.

Do realizacji celu pracy przyjęto cele szczegółowe, takie jak:

- identyfikacja najbardziej prawdopodobnych przyczyn powstawania wad odlewniczych w wytwarzanych odlewach tłokowych w oparciu o dane dotyczące stopów aluminium wykorzystywanych w produkcji tłoków oraz wiedzy o typowych wadach odlewniczych w tych stopach, a także przy uwzględnieniu aktualnego stanu technologii stosowanej w firmie Złotecki Sp. z o.o.;
- przeprowadzenie badań ukierunkowanych na identyfikację i wyjaśnienie mechanizmów powstawania wad oraz określenie rzeczywistych przyczyn występowania brakowości w odlewach tłokowych wynikających z niezidentyfikowanych przyczyn związanych z dostawami surowca;
- opracowanie procedur technologicznych ukierunkowanych na ograniczenie występowania wad odlewniczych, co w konsekwencji pozwoli na podniesienie jakości wyrobów ostatecznych, tj. tłoków stosowanych w silnikach spalinowych oraz sprężarkach.

4. Zakres badań porównawczych materiałów wejściowych

Firma ZŁOTECKI nie dysponuje odrębną topialnią, w której stop byłby przygotowywany w osobnym, centralnym procesie i dopiero następnie dystrybuowany do pieców podtrzymujących w gniazdach odlewniczych. Przygotowanie ciekłego metalu realizowane jest bezpośrednio w piecach przypisanych do poszczególnych gniazd. Każde gniazdo wyposażone jest w dwa piece pracujące naprzemiennie: w czasie, gdy z pierwszego pieca pobierany jest stop do zalewania form, w drugim równolegle prowadzi się cykl topienia, oczyszczania oraz rafinacji. Po wyczerpaniu wsadu w piecu pierwszym odlewnik rozpoczyna pobieranie z drugiego pieca, a w piecu pierwszym inicjuje się kolejny cykl przygotowania stopu. Taki układ wymiany ról pieców ($A \leftrightarrow B$) minimalizuje ryzyko przerw operacyjnych wynikających z oczekiwania na surowiec i stabilizuje rytm etapu zalewania formy, przy zachowaniu ciągłości parametrów procesu. Szczegółową charakterystykę operacji przygotowania stopu przedstawiono wcześniej.

Wyniki analizy modelu produkcyjnego wykazały, że newralgicznym etapem determinującym poziom brakowości jest przygotowanie ciekłego metalu z dostarczonych partii surowca. Proces ten jest ustandaryzowany (procedury operacyjne, punkty kontrolne, wymagania jakościowe), a jego przebieg i efekty są śledzone dzięki powiązaniu każdej partii odlewów z numerem partii surowca w dokumentacji wykonawczej. Analiza tych danych ujawniła występowanie wytopów (dostaw surowca) generujących istotnie wyższą brakowość w porównaniu z poziomem referencyjnym. **Dało to przesłankę do zaprojektowania badań porównawczych, których celem była weryfikacja, w jakim zakresie zmienność jakości partii surowca przekłada się na zmienność wyników jakościowych w odlewach.**

Do badań zakwalifikowano dwie partie surowca, które oznaczono jako:

- **WT-1 – wytop odniesienia (referencyjny)**, charakteryzujący się brakowością na poziomie akceptowalnym i stanowiący punkt bazowy dla analiz porównawczych;
- **WT-2 – wytop o podniesionym progu brakowości**, wytypowany na podstawie analizy średniej brakowości zleceń produkcyjnych odlanych z tego materiału (brakowość na zleceniach produkcyjnych wyniosła średnio 38%).

Przez wytop rozumie się partię surowca przygotowaną przez dostawcę w odrębnym procesie topienia, o zdefiniowanym składzie i właściwościach, udokumentowaną atestem materiałowym.

Dla opisu oraz identyfikacji czynników materiałowo-procesowych determinujących jakość odlewów tłokowych przyjęto następujący zakres badań:

- badania składu chemicznego i mikrostruktury dla wytypowanych stopów celem oceny zgodności z wymaganiami normatywnymi i atestami dostawcy;
- badania twardości pozwalające na określenie odporności materiału na lokalne odkształcenia plastyczne;
- badania właściwości wytrzymałościowych w próbie rozciągania;
- badania wtrąceń gruboziarnistych (K-Test) stosowane do oceny czystości metalurgicznej stopu;
- badania lejności służące do określenia zdolności ciekłego metalu do wypełniania wnęki formy, zwłaszcza jej cienkościennych części;
- oznaczenie indeksu gęstości (DI), będącego wskaźnikiem stopnia zagazowania i czystości metalurgicznej ciekłego metalu,
- analizę termiczną procesu krzepnięcia;
- ocenę makro- i mikrostruktury wytypowanych stopów.

4.1 Materiały do badań

Badania przeprowadzono dla odlewniczego stopu aluminium EN AB-48000 (EN AB- AlSi12CuNiMg), powszechnie stosowanego do odlewów tłoków wykonywanych metodą grawitacyjną. Skład chemiczny analizowanych wytopów, przedstawiony w tabeli 6, zestawiono na podstawie atestów materiałowych dołączanych do dostaw surowca. W celu niezależnej weryfikacji danych deklarowanych przez dostawcę dla partii WT-1 i WT-2 zlecono oznaczenia w zewnętrznym, certyfikowanym laboratorium badawczym. Uzyskane wyniki potwierdziły wartości widniejące w atestach. W odniesieniu do wymagań właściwych norm przedmiotowych stwierdzono zgodność składu chemicznego badanych wytopów z dopuszczalnymi zakresami zawartości pierwiastków stopowych i zanieczyszczeń.

Tab. 6. Skład chemiczny badanych stopów według atestów, [% wag.].

Oznaczenie	Wartość	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Inne razem	Al
Norma	min	10.50	0.00	0.80	0	0.90	0.70	0	0	0	Reszta
	max	13.50	0.60	1.50	0.35	1.50	1.30	0.35	0.20	0.15	
WT-1	pomiar	12.05	0.43	0.97	0.15	1.14	0.90	0.07	0.03	0.003	Reszta
WT-2	pomiar	12.44	0.45	1.03	0.18	1.20	0.92	0.15	0.02	0.002	Reszta

Materiał do badań został przygotowany zgodnie ze standardowym procesem odlewania, opisanym wcześniej w podrozdziale 2.3.1. Jedynym odstępstwem od procedury technologicznej było wyłączenie z procesu tzw. zawrotów produkcyjnych, tak aby surowcem do wytopu były wyłącznie gąski hutnicze. Zasada ta została przyjęta zarówno dla wytopu WT-1, jak i WT-2, co miało na celu eliminację dodatkowych źródeł zmienności w składzie chemicznym i jakości ciekłego metalu.

Do przygotowania ciekłego stopu wykorzystano dwa bliźniacze piece oporowe Nabertherm T 80/10 (Rys. 49), usytuowane w jednym gnieździe odlewniczym. Piece pracowały przy identycznych parametrach procesowych (nastawa temperatury pieca 760 ± 5 °C) dla których temperatura ciekłego metalu w tyglu pieca ustabilizowała się na poziomie 730 ± 5 °C, co zapewniało powtarzalność procesu odlewania próbek.



Rys. 49. Piece topielno-podtrzymujące w gnieździe odlewniczym.

Kontrolę temperatury ciekłego stopu prowadzono za pomocą miernika (EMT – 300 K - Type firmy Czaki) wyposażonego w czujnik termoparowy typu K ($-40 \div 1100$ °C NiCr-NiAl). Pomiar temperatury był wykonywany przed wykonaniem każdej próbki i został zapisywany w wynikach.

Materiał po przetopieniu poddany został rafinacji barbotażowej i oczyszczeniu zgodnie z przyjętą i opisaną wcześniej procedurą przygotowania stopu.

4.2 Sposób pobierania i oznaczenia próbek

Próbki do badań pobierano w charakterystycznych dla przemysłowego procesu odlewania przedziałach czasowych (Rys. 50), odzwierciedlających kolejne etapy cyklu przygotowania i wykorzystania ciekłego metalu. Pierwszą serię próbek pobrano bezpośrednio po całkowitym stopieniu materiału wsadowego, co umożliwiała ocenę jakości stopu w stanie początkowym, przed wykonaniem zabiegów oczyszczających. Kolejne próbki pobrano po przeprowadzeniu rafinacji metodą barbotażu, tj. po etapie mającym na celu usunięcie rozpuszczonych gazów (przede wszystkim wodoru) oraz części wtrąceń niemetalicznych. Ostatnią serię próbek pozyskano po 5 godzinach wytrzymania metalu w tyglu, co odpowiada maksymalnemu czasowi przetrzymywania ciekłego stopu w warunkach produkcyjnych, charakterystycznemu dla realizacji najmniejszych odlewów tłokowych. Tak przyjęta metodyka poboru próbek umożliwia analizę zmian jakości ciekłego metalu w funkcji czasu i zabiegów technologicznych z uwzględnieniem rzeczywistych warunków procesu odlewniczego.



Rys. 50. Schemat pobierania próbek do badań.

W celu ujednolicenia zapisu dla oznaczenia badanych próbek przyjęto następujące skróty: **P** – próbki pobrane po przetopie, **R** – próbki pobrane po procesie rafinacji, **5h** – próbki pobrane po czasie wytrzymania $t=5h$.

Dla każdego wytopu oraz w określonych przedziałach czasowych zostały pobrane następujące próbki:

- do wykonania K-testu,
- do badań lejułości,
- do wykonania statycznej próby rozciągania,
- do wykonania analizy termicznej,
- do wyznaczenia indeksu gęstości (DI).

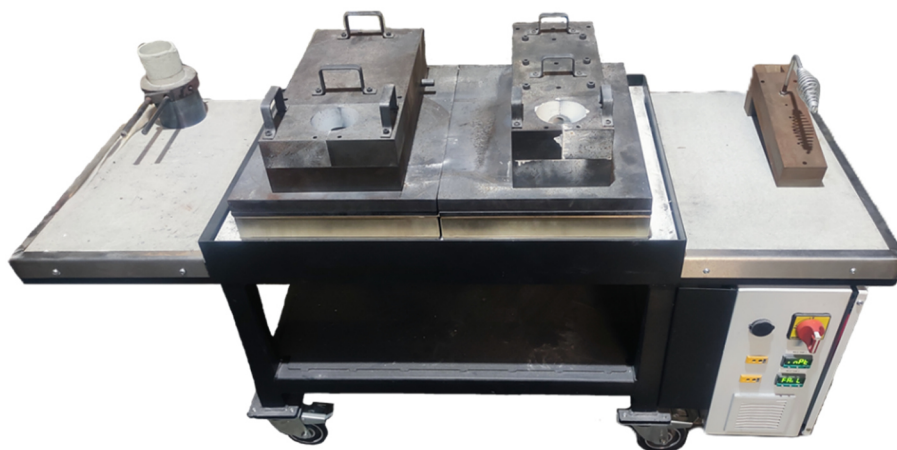
4.3 Zastosowane metody badawcze

Zakres przeprowadzonych badań wynikał z potrzeby identyfikacji przyczyn występowania brakowości w procesie odlewania. Założono, że kompleksowa analiza umożliwi zarówno ocenę właściwości ciekłego metalu, jak i weryfikację powiązań pomiędzy parametrami procesu a ujawnianymi wadami odlewniczymi.

Do realizacji przyjętego planu badań wykorzystano:

- do analizy składu chemicznego wykorzystano spektrometr iskrowy Foundry Master z optyką CCD o zakresie falowym 160 – 800nm, analizy dokonano w zakresie AL400;
- do pomiaru twardości wykorzystano twardościomierz Brinella typ B3Cs;
- do badań wytrzymałościowych wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową Zwick/Roell Z100 z układem do rejestracji danych siła – wydłużenie i ekstensometrem kontaktowym;
- do analizy termicznej zastosowano ceramiczne tygle pomiarowe typu Quick Cup z termoparą typu K, rejestrację danych prowadzono z częstotliwością próbkowania 50 Hz przy użyciu systemu akwizycji danych HBM Spider współpracującego z oprogramowaniem Catman 3.0;
- do obserwacji mikrostruktury badanych próbek wykorzystano mikroskopy świetlne (*ang. light microscope, LM*), tj.: Zeiss Axio Observer 7 MAT - wyposażony w cyfrową rejestrację obrazu oraz Nikon Epiphot 200, a także *skaningowe mikroskopy elektronowe (ang. Scanning Electron Microscopy, SEM)*, tj.: Inspect F50 oraz Hitachi S-3400 N wyposażone w detektory do analizy składu chemicznego w mikroobszarach (*ang. Energy Dispersive Spectroscopy, EDS*).
- do obrazowania cyfrowego wykorzystano mikroskop cyfrowy KEYENCE (zestaw: VHX-S750E; VHX-7100; obiektywy VHX-E00 $\times 5$ i $\times 20$, VHX-E500 $\times 500$ i $\times 2500$; kamera VHX-7020).

Odlewy próbne wykonano z wykorzystaniem zestawu kokil do pomiarów procesowych i diagnostyki właściwości ciekłego metalu na stanowisku MetalHealth® Centre (N-Tec Ltd.) (Rys. 51).



Rys. 51. Stanowisko pomiarowe MetalHealth® Centre.

System składa się z modułowych form badawczych oraz stołu odlewniczego z kontrolą termiczną. Został zaprojektowany do pracy w kontrolowanych i powtarzalnych warunkach, co zapewnia porównywalność wyników między seriami badań. Duży nacisk został położony na standaryzację procedur. Rdzeniem stanowiska jest stół odlewniczy z dwiema niezależnymi płytami grzejnymi, układem regulatorów grzania oraz gniazdami do podłączenia termoelementów umieszczonych w formach. Formy wykonane są z żeliwa szarego w układzie wieloczęściowym ułatwiającym demontaż odlewów. Formy można utrzymywać w zadanej temperaturze (do ok. 430 °C), a temperatura jest monitorowana z użyciem termoelementów osadzonych w specjalnych otworach form.

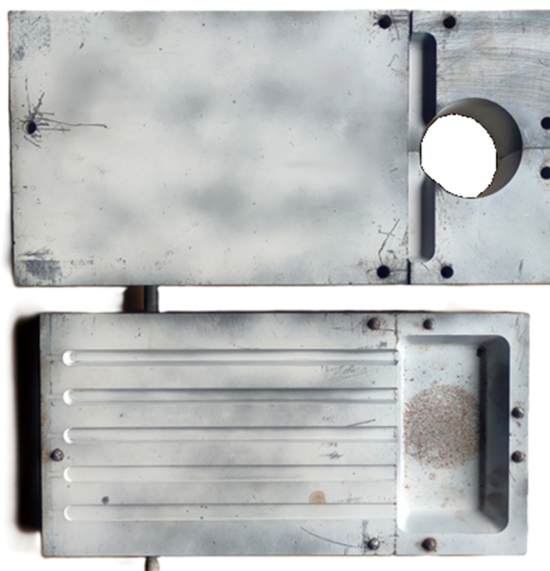
Przy wykorzystaniu systemu MetalHealth® Centre wykonane zostały następujące próby:

- K-test —próba do identyfikacji wtrąceń gruboziarnistych, specjalna geometria odlewu z karbami wymusza pęknięcia w zdefiniowanych miejscach, co ułatwia zliczanie widocznych wtrąceń lub defektów (Rys. 52);



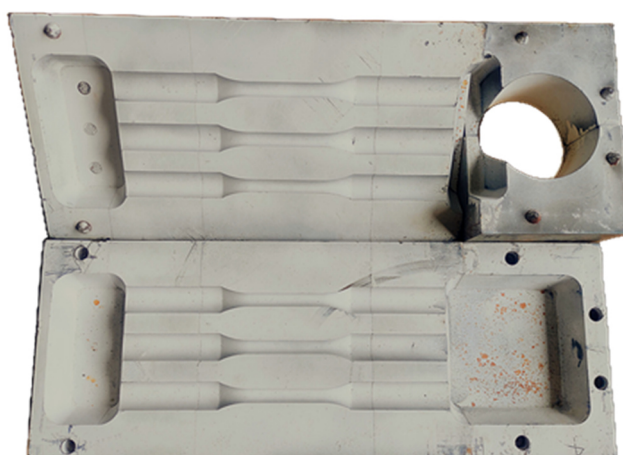
Rys. 52. Forma – K-test.

- próba lejućności – forma (Rys. 53) pozwala na ukształtowanie odlewu składającego się z pięciu prętów o zróżnicowanych przekrojach trapezowych, co pozwala ocenić zdolność wypełniania cienko- i grubościennych sekcji, wynikiem próby jest łączna długość odlanych segmentów (wskaźnik wypełnienia) oraz rozkład długości poszczególnych prętów (charakterystyka lejućności);



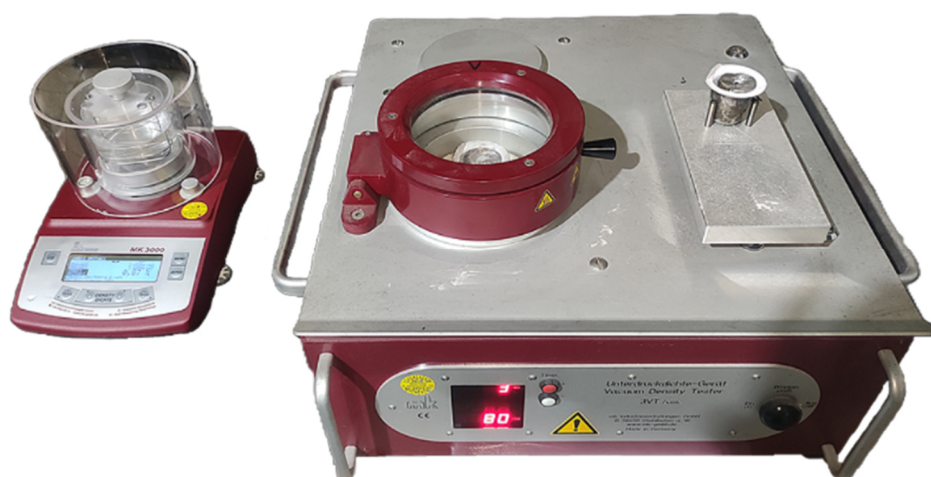
Rys. 53. Forma do próby lejućności.

Kokile systemu MetalHealth® wykorzystano do odlania próbek do badania właściwości wytrzymałościowych na rozciąganie. Forma pozwala na równoczesne ukształtowanie trzech prętów o wysokiej integralności, przy szybkości krzepnięcia zbliżonej do odlewania kokilowego (Rys. 54).



Rys. 54. Forma – właściwości wytrzymałościowe.

Do wyznaczenia indeksu gęstości (DI) wykorzystano stanowisko 3VT basic z wagą MK 3000 firmy MK Industrievertretungen GmbH (Rys. 55). Stanowisko umożliwia wykonanie odlewów w warunkach obniżonego ciśnienia (RPT – *ang. Reduced Pressure Test*), na podstawie których możliwa jest ocena jakości ciekłego metalu w zakresie skłonności do powstawania porowatości gazowej.



Rys. 55. Stanowisko 3VT basic z wagą MK 3000.

Metoda pomiaru polega na porównaniu próbek krzepnących w różnych warunkach ciśnienia. Jedna próbka krzepnie w warunkach obniżonego ciśnienia, co intensyfikuje wydzielanie się gazu. Próbkę ciekłego metalu o masie około 90 g zalewa się do pokrytego powłoką ochronną stalowego tygla, umieszczonego w komorze próżniowej urządzenia. Proces krzepnięcia przebiega przy podciśnieniu rzędu 80 mbar, a czas stygnięcia wynosi zwykle 3–5 minut, w zależności od rodzaju badanego stopu. Druga próbka odlewana jest do identycznego tygla i krzepnie w warunkach otoczenia.

Do wyznaczenia indeksu gęstości (DI - Density Index) wykorzystano stacjonarną wagę elektroniczną MK 3000 z oprogramowaniem sterującym procedurą wyznaczenia gęstości próbek. Wskaźnik ten stanowi jeden z najważniejszych parametrów kontrolnych jakości ciekłego metalu.

5. Wyniki badań i ich analiza

5.1 Analiza składu chemicznego

Do badań składu chemicznego wykorzystano fragmenty układu zalewowego próbników do testów lejności (kokila systemu MetalHealth®). Uzyskane wyniki przedstawione w tabeli 7 potwierdziły zgodność udziału wagowego głównych pierwiastków stopowych z danymi przedstawionymi w atestach producenta.

Tab. 7. Skład chemiczny stopów WT-1, WT-2 oznaczony z pobranych próbek odlewów, [% wag.].

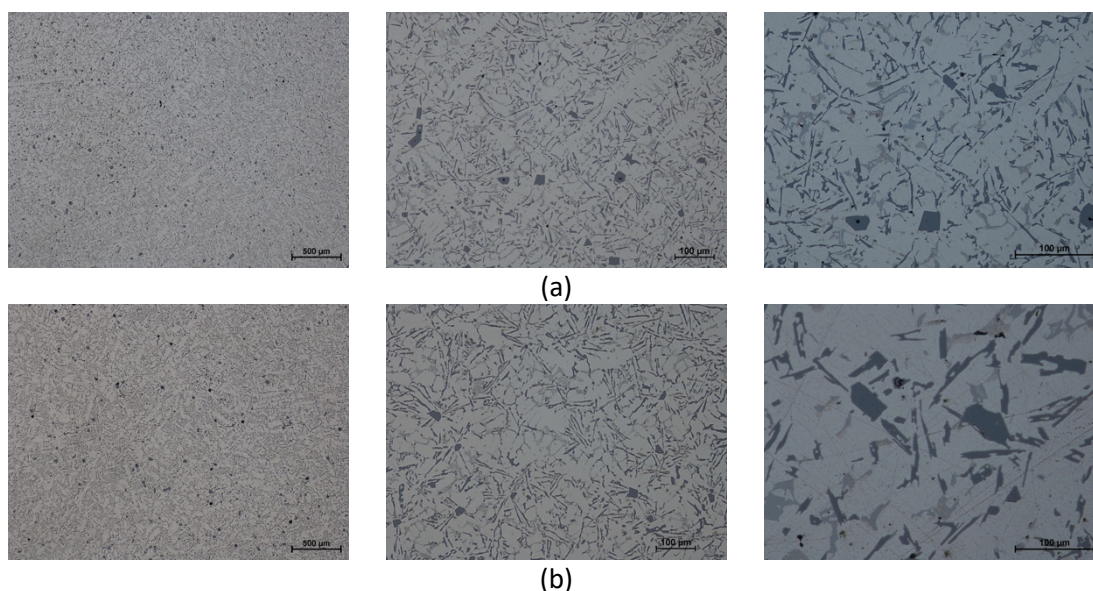
WT-1									
Palenie	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Al
1	12,10	0,47	0,99	0,16	1,13	0,89	0,08	0,02	84,15
2	11,90	0,43	1,06	0,15	1,07	0,95	0,08	0,02	84,33
3	11,80	0,39	1,05	0,15	1,01	1,00	0,07	0,02	84,50
4	12,20	0,46	0,97	0,16	1,11	0,96	0,07	0,02	84,04
Średnia	12,00	0,44	1,02	0,16	1,08	0,95	0,08	0,02	84,26
Atest	12,05	0,43	0,97	0,15	1,14	0,90	0,07	0,03	Reszta

WT-2									
Palenie	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Al
1	12,80	0,48	1,08	0,18	1,10	0,96	0,13	0,03	83,25
2	12,70	0,48	1,00	0,18	1,14	0,92	0,15	0,03	83,40
3	12,30	0,51	1,13	0,18	1,12	1,01	0,13	0,02	83,60
4	11,80	0,47	1,11	0,18	1,08	0,93	0,14	0,02	84,28
Średnia	12,40	0,48	1,08	0,18	1,11	0,96	0,13	0,03	83,63
Atest	12,44	0,45	1,03	0,18	1,20	0,92	0,15	0,02	Reszta

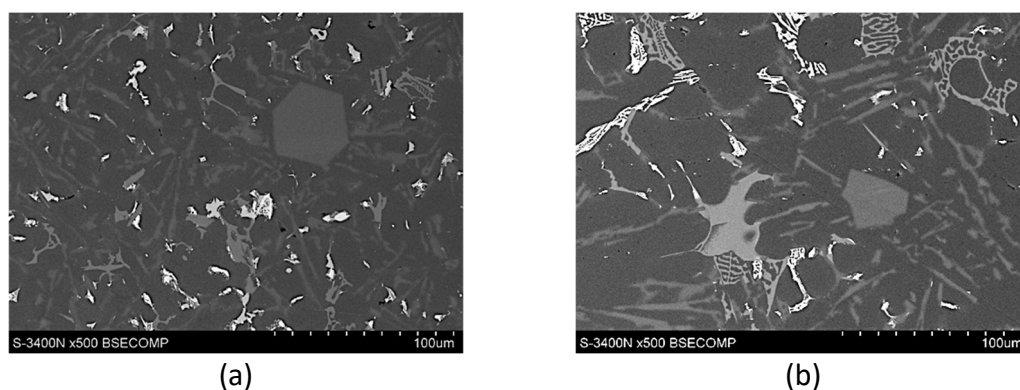
Nie stwierdzono istotnych odchyłeń pomiędzy wynikami uzyskanymi w badaniach a wartościami deklarowanymi przez dostawców w atestach materiałowych. Jednocześnie należy zaznaczyć, że analiza składu chemicznego materiału pobieranego z próbek odlewniczych obarczona jest naturalnym rozrzutem wyników, zależnym od miejsca pobrania próbki oraz lokalizacji wykonania tzw. paleń. Rozrzut ten wynika m.in. z niejednorodności składu w makro i mikroskali, będącej konsekwencją zjawisk zachodzących w czasie krzepnięcia i krystalizacji.

Wybrane obrazy mikrostruktury stopów WT-1 i WT-2 w stanie po odlaniu (LM, SEM) oraz wyniki analizy rozkładu powierzchniowego pierwiastków (SEM/EDS) przedstawiono na rysunkach 56-59. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono występowanie podobnych składników strukturalnych. W mikrostrukturze obu badanych stopów potwierdzono występowanie dendrytów roztworu stałego α -Al, eutektycznej mieszaniny α -Al+ β -Si oraz faz międzymetalicznych. Faza krzemowa występowała w postaci płytkowych lub iglastych wydzieleni, co jest charakterystyczne

dla stopów niemodyfikowanych. Zarówno w stopie WT-1, jak i w stopie WT-2 zidentyfikowano wydzielenia złożonych faz międzymetalicznych o różnej morfologii z układów takich jak: Al-Ni-Cu, Al-Mg-Si-Ni, Al-Fe-Mn-Ni-Cu, oraz Al-Si-Mg-Ni-Fe, co korelowało ze składem chemicznym badanych materiałów (Rys. 58-59).

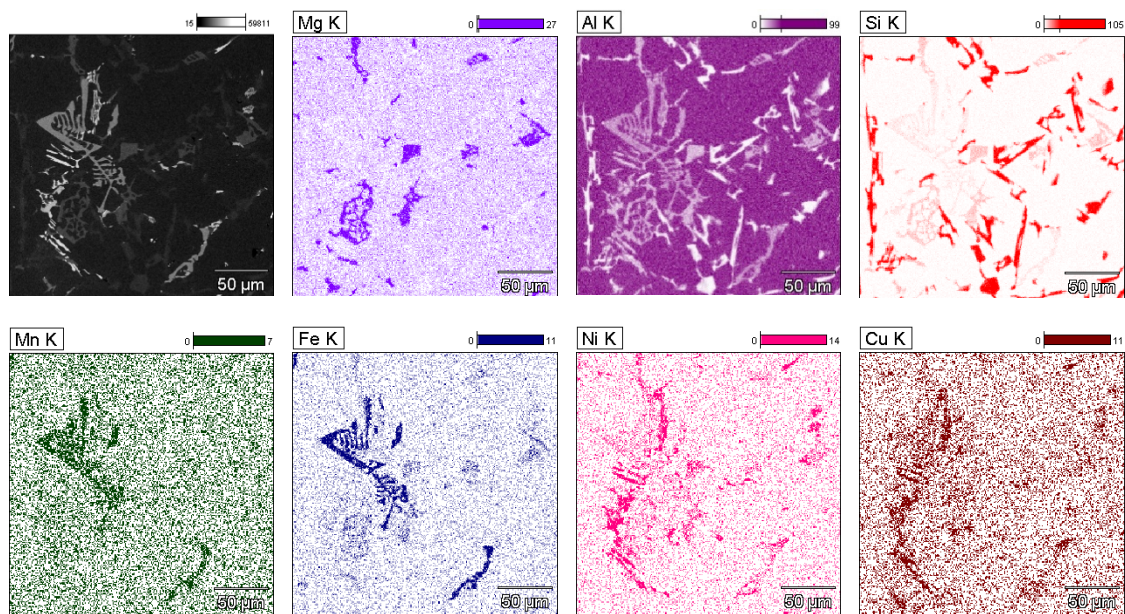


Rys. 56. Mikrostruktura badanych stopów: (a) WT-1, (b) WT-2 w stanie nietrawionym, LM.

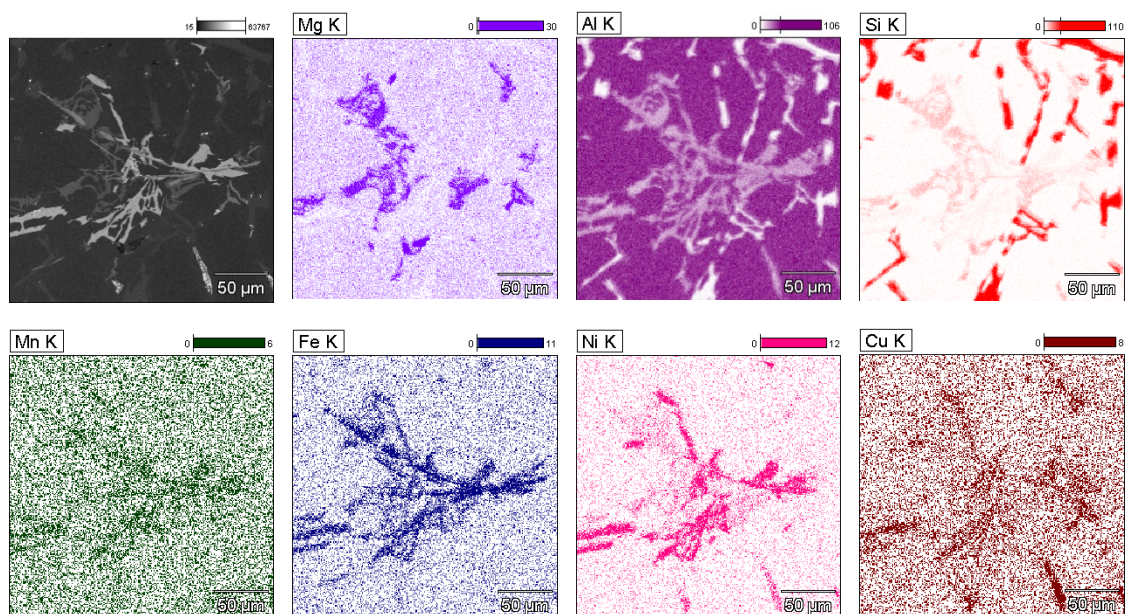


Rys. 57. Mikrostruktura badanych stopów: (a) WT-1, (b) WT-2 w stanie nietrawionym, SEM/BSE.

Obserwacje prowadzone z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego (LM) wykazały różnice w mikrostrukturze badanych stopów (Rys. 56). W próbkach pobranych z wytopu oznaczonego WT-1 zaobserwowano większe rozdrobnienie składników strukturalnych w porównaniu do próbek pobranych z wytopu oznaczonego WT-2 (Rys.57). Analiza mikrostruktury badanych materiałów z wykorzystaniem metod mikroskopii skaningowej (SEM/EDS), wykazała różnice w morfologii zidentyfikowanych faz międzymetalicznych, głównie zawierających żelazo (Rys. 58 i 59).



Rys. 58. Analiza rozkładu powierzchniowego pierwiastków w stopie WT-1, SEM/EDS.

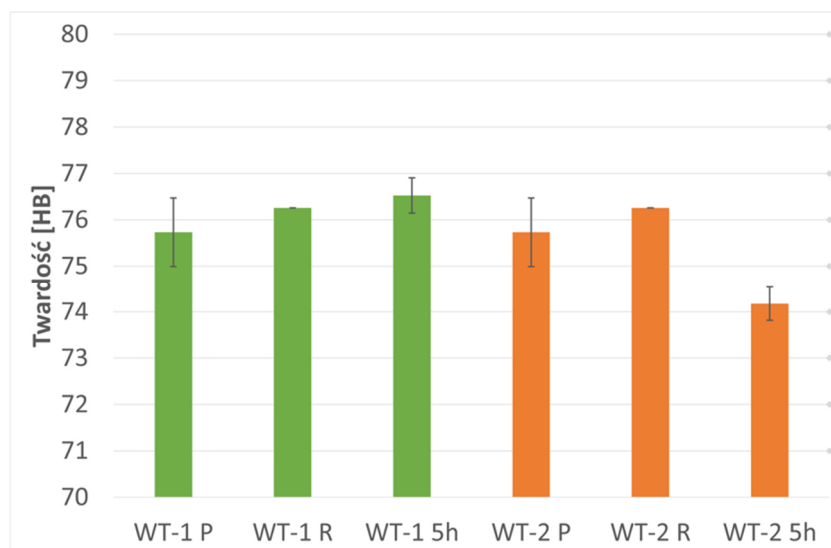


Rys. 59. Analiza rozkładu powierzchniowego pierwiastków w stopie WT-2, SEM/EDS.

5.2 Badania twardości

Próbki do oznaczenia twardości pozyskano z części układu zasilania odlewów próbek wykonanych w teście lejuć, bez obróbki cieplnej. Pomiary przeprowadzono zgodnie z wytycznymi dla metody HBW 10/1000, przy obciążeniu równym 9810 N,

co odpowiada zaleceniom normatywnym dla stopów odlewniczych. Dla każdej próbki wykonano 5 odcisków, wartości dwóch skrajnych pomiarów zostały odrzucone, uśrednienia wyników dokonano na trzech pozostałych odciskach. Przyjęta metodyka zapewnia porównywalność wyników oraz umożliwia odniesienie ich do literaturowych danych referencyjnych dla stopów aluminium stosowanych w produkcji tłoków. Wyniki pomiaru twardości zostały przedstawione na wykresie (Rys. 60).

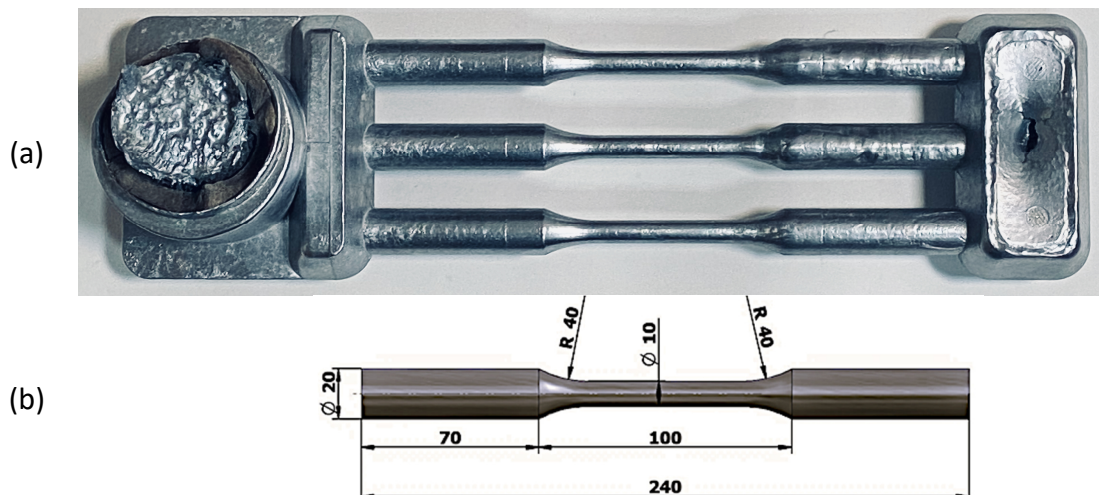


Rys. 60. Wyniki pomiaru twardości dla WT-1 i WT-2.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono brak istotnych różnic pomiędzy analizowanymi wytopami. Twardość materiału dla wytopu WT-1, niezależnie od czasu pobrania próbki, mieściła się w przedziale 75–77 HB, natomiast dla wytopu WT-2 w zakresie 74–76 HB. W obu przypadkach różnice uzyskanych wartości mieszczą się w granicach dopuszczalnego błędu pomiarowego, który dla próby wykonanej przy parametrach HBW 10/1000 wynosi $\pm 3\%$ wartości nominalnej.

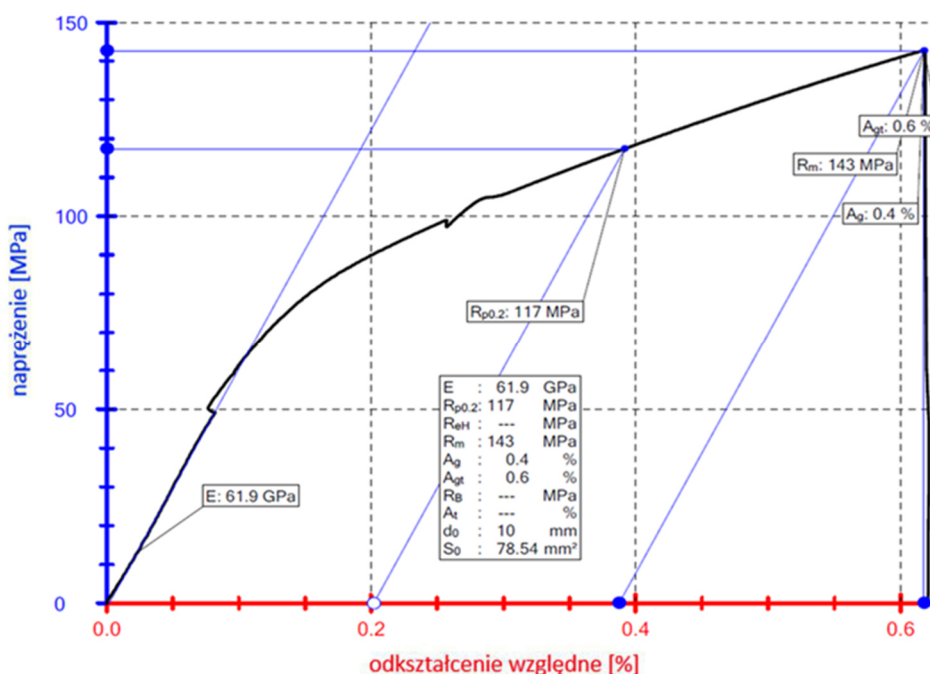
5.3 Statyczna próba rozciągania

Próbki do badań wytrzymałościowych zostały przygotowane z wykorzystaniem stanowiska MetalHealth®, które umożliwia uzyskanie 3 próbek w postaci jednego odlewu jak pokazano na rysunku 61a. Próbki nie były obrabiane cieplnie, a po wystudzeniu zostały wycięte i przygotowane jak pokazano na rysunku 61b.

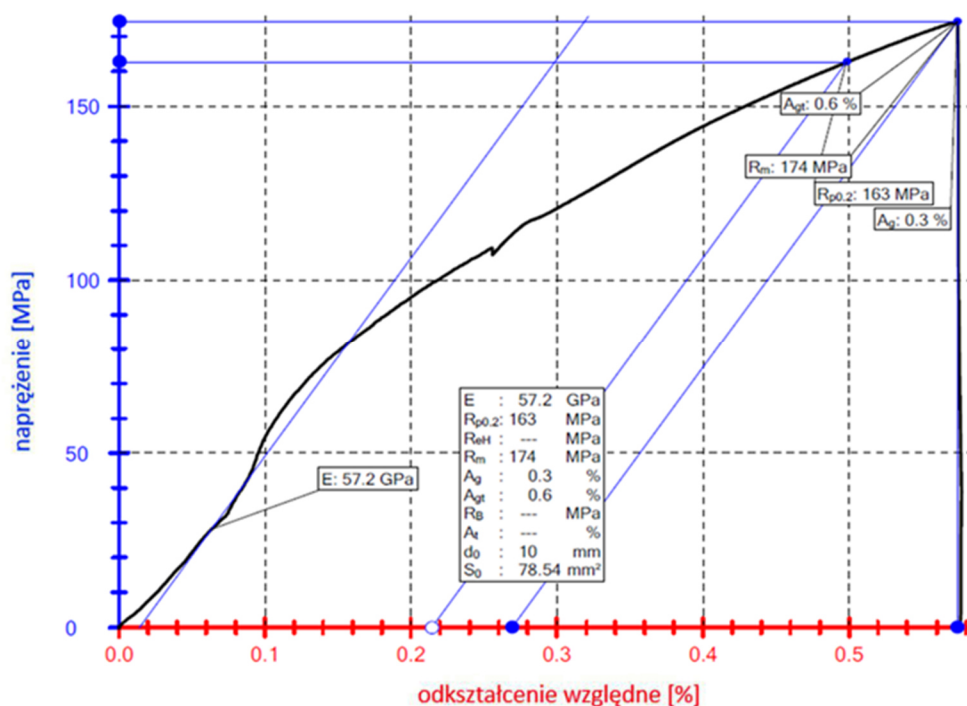


Rys. 61. Próbkki do badań wytrzymałościowych: (a) widok odlewu, (b) wymiary próbki do badań.

Dla każdego wytopu zerwane zostały 3 próbki. We wszystkich próbach zastosowano prędkość odkształcenia wynoszącą 0.0067 1/s. Próbkki obciążano jednoosiowo siłą rozciągającą, aż do momentu pęknięcia. Oprogramowanie Zwick testXpert pozwoliło na rejestrację danych w układzie obciążenie – wydłużenie. Dodatkowo w programie wygenerowano wykresy w układzie naprężenie - odkształcenie (Rys. 62, 63).

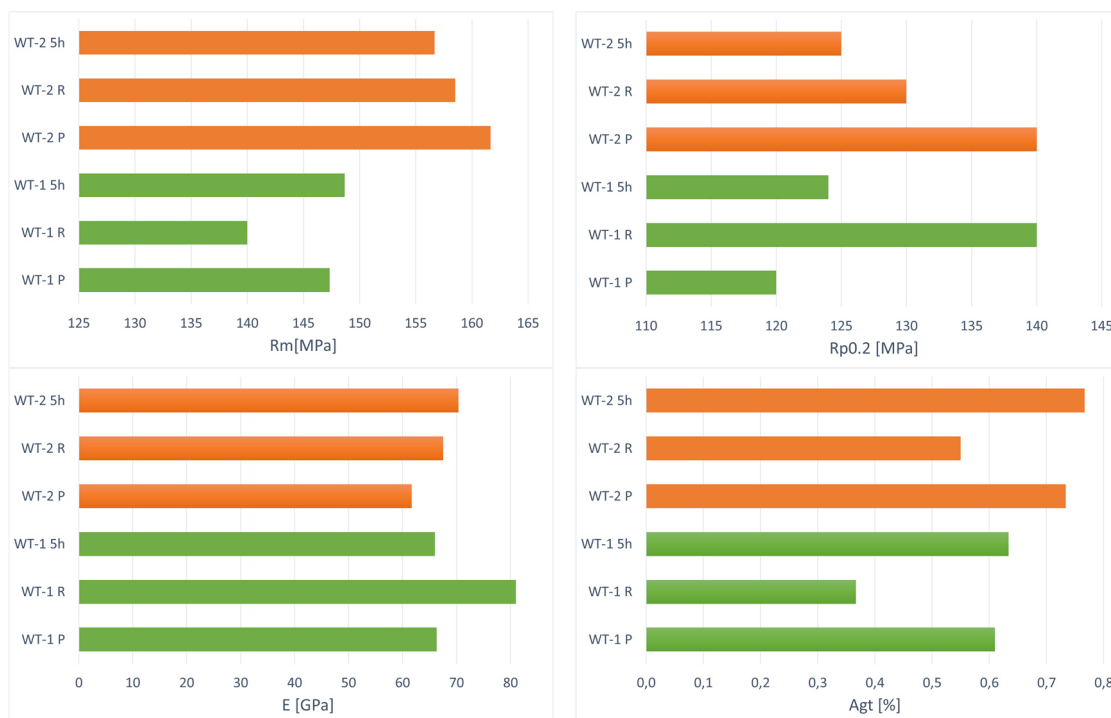


Rys. 62. Przykład wykresu uzyskanego w statycznej próbie rozciągania próbek wykonanych ze stopu WT-1.



Rys. 63. Przykład wykresu uzyskanego w statycznej próbie rozciągania próbek wykonanych ze stopu WT-2.

Zbiornicze zestawienie wyników uzyskanych w próbie rozciągania przedstawiono na rysunku 64.

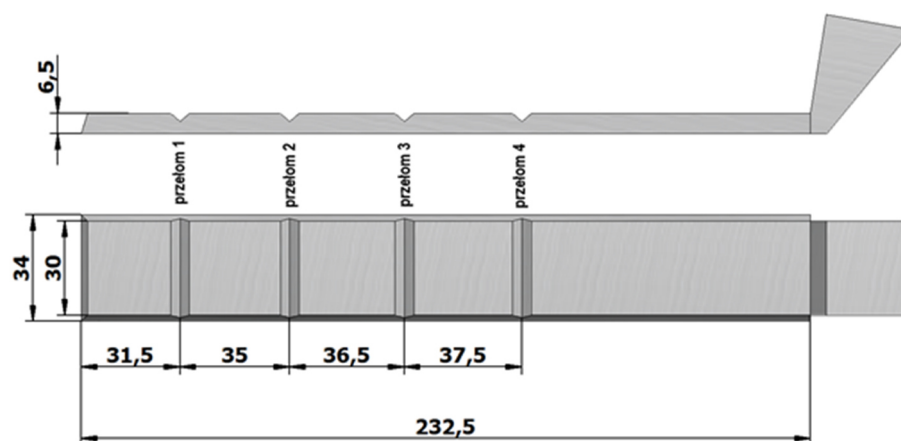


Rys. 64. Wyniki statycznej próby rozciągania: R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_{p0.2} – umowna granica plastyczności, E – moduł sprężystości (moduł Younga), A_{gt} – odkształcenie równomierne próbki (odkształcenie do momentu osiągnięcia maksymalnej siły (*ang. uniform elongation*)).

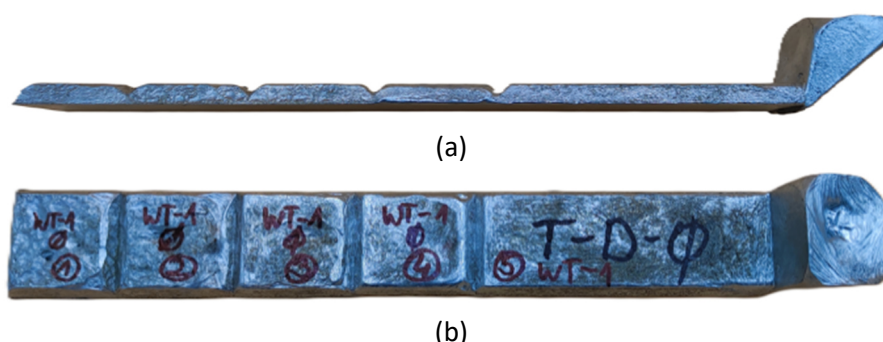
Uzyskane wyniki badań wskazują, że proces rafinacji nie wywiera istotnego wpływu na moduł sprężystości analizowanych stopów, co sugeruje, iż właściwości sprężyste materiału pozostają w dużej mierze niezależne od przebiegu procesu przygotowania ciekłego metalu. Niemniej jednak, zaobserwowano wyraźne różnice w odkształcalności oraz w wytrzymałości na rozciąganie pomiędzy poszczególnymi próbkami WT-1 i WT-2, co może wskazywać na pewien wpływ niewielkich różnic w składach chemicznych badanych stopów na ich właściwości mechaniczne.

5.4 Badanie wtrąceń gruboziarnistych (K-test)

Kolejnym etapem badań, mającym na celu identyfikację ewentualnych różnic pomiędzy wytopami WT-1 i WT-2, były analizy wtrąceń gruboziarnistych metodą K-test. Próbki przygotowano zgodnie z wymaganiami systemu MetalHealth® (Rys. 65).

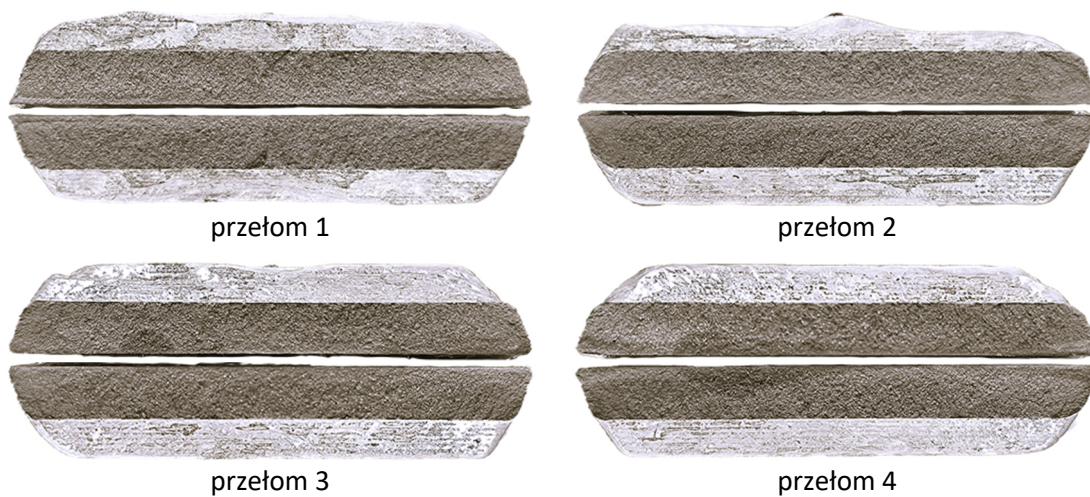


Rys. 65. Widok schematu próbki do wykonania K-test.

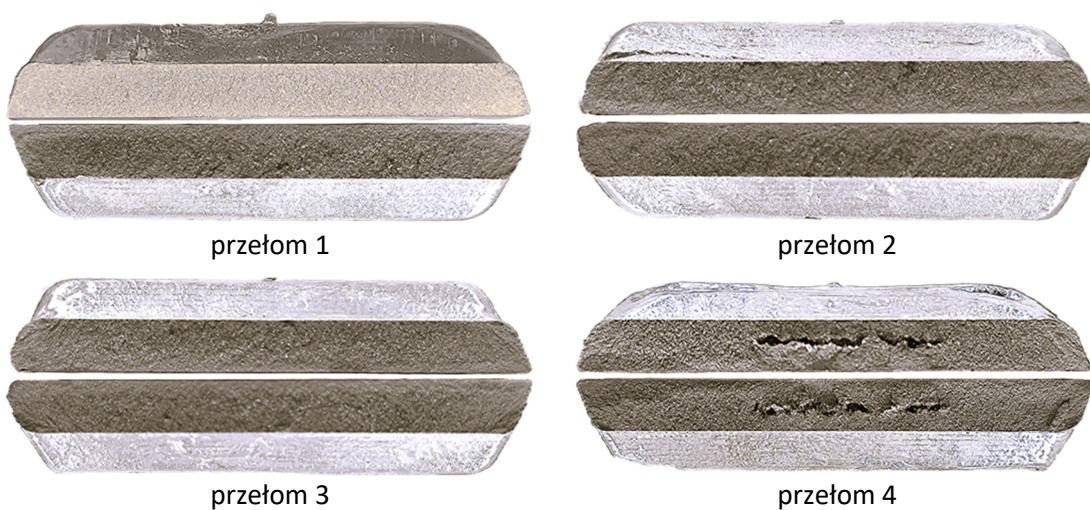


Rys. 66. Przykład odlewu K-test dla próbki WT1: (a) widok z boku, (b) widok z góry.

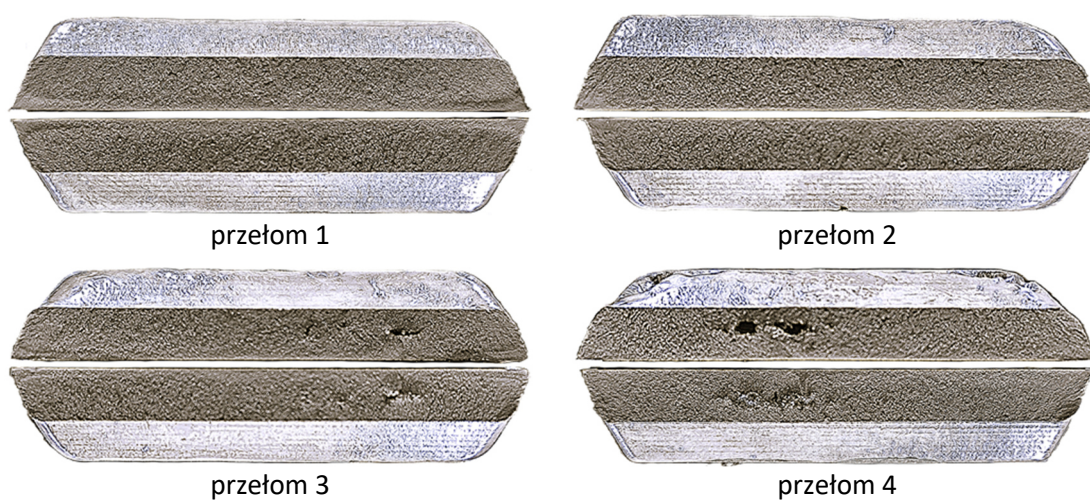
Po odlaniu i wystudzeniu próbek (Rys. 66) dokonano ich przełamania w miejscach karbów, co umożliwiło ocenę występowania zanieczyszczeń na powierzchni przełomów. Widok przełomów przedstawiono na rysunkach poniżej (Rys. 67–72).



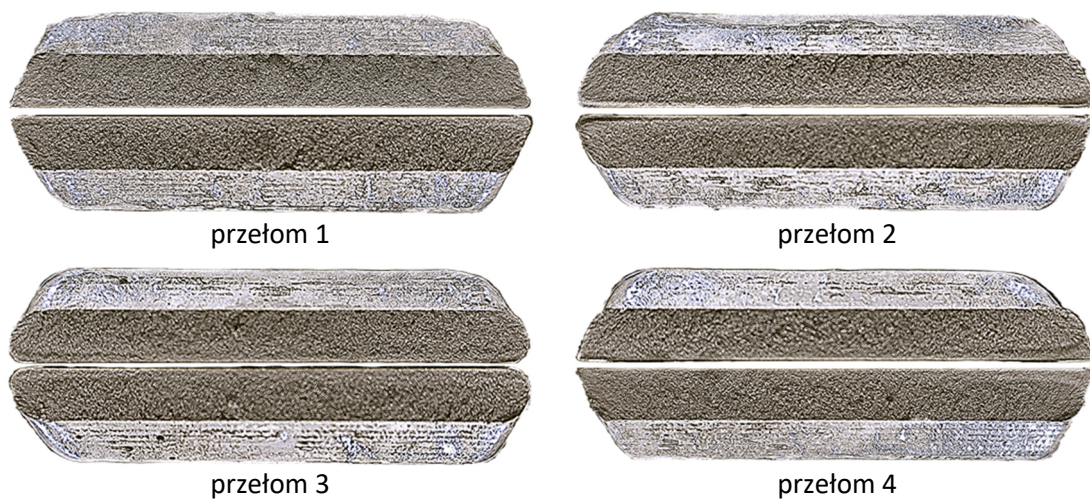
Rys. 67. Przełomy próbki WT-1 P w próbie K-test.



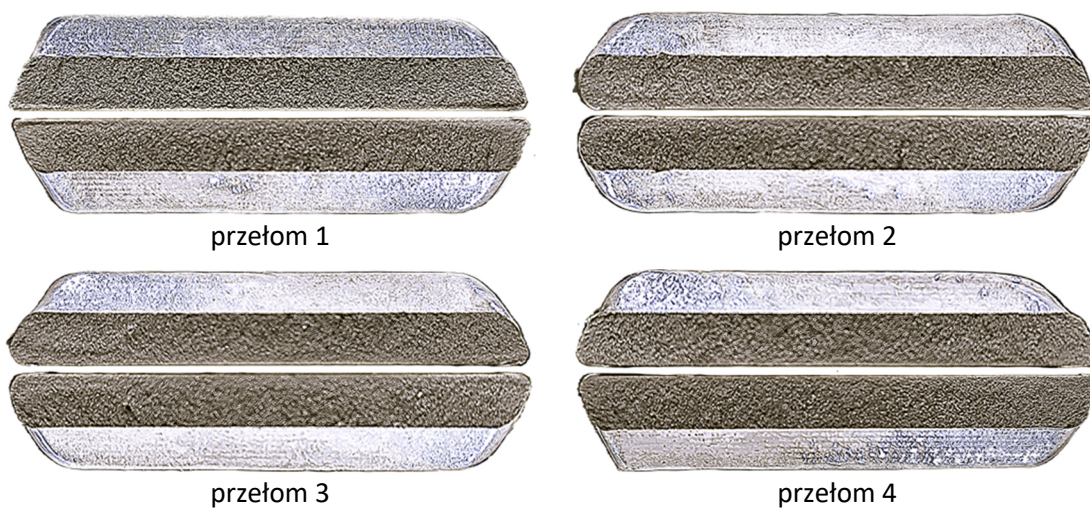
Rys. 68. Przełomy próbki WT-1 R w próbie K-test.



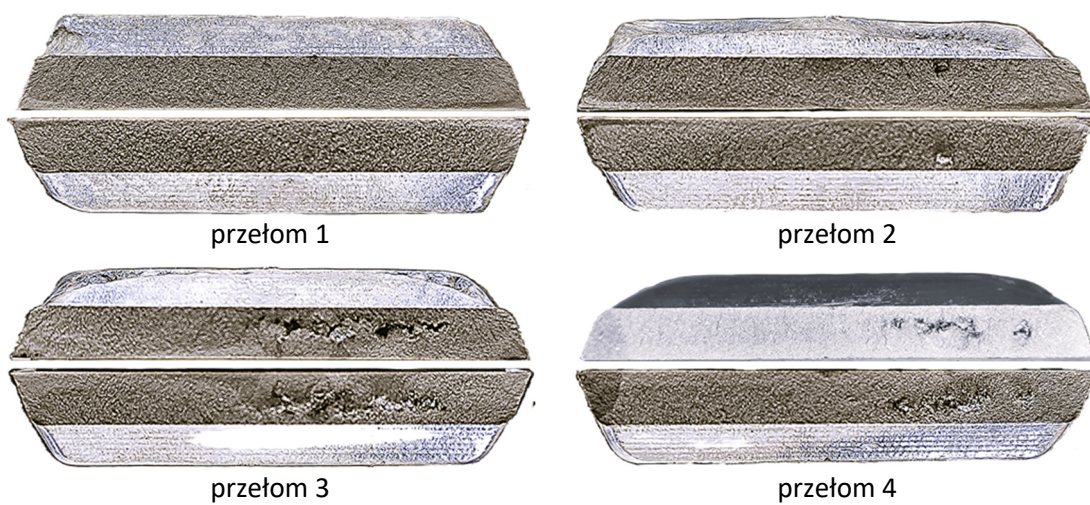
Rys. 69. Przełomy próbki WT-1 5h w próbie K-test.



Rys. 70. Przełomy próbki WT-2 P w próbie K-test.



Rys. 71. Przełomy próbki WT-2 R w próbie K-test.

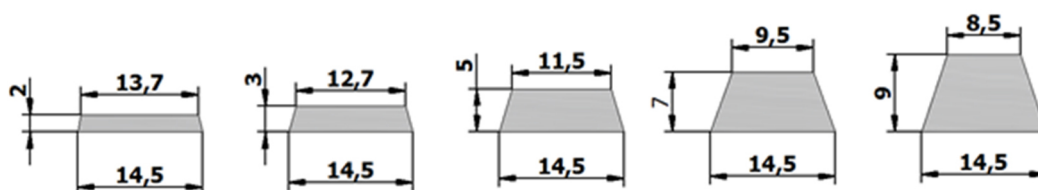


Rys. 72. Przełomy próbki WT-2 5h w próbie K-test.

W analizowanych obrazach nie stwierdzono obecności wtrąceń gruboziarnistych. Powierzchnie przełomów we wszystkich próbkach wykazywały podobny charakter. Zaobserwowano natomiast występowanie wad w postaci jam skurczowych w próbkach wykonanych ze stopu WT-1: na czwartym przełomie próbki po rafinacji oraz na trzecim i czwartym przełomie próbki po pięciogodzinnym wytrzymaniu. Podobne jamy skurczowe zidentyfikowano w próbkach ze stopu WT-2, odpowiednio na trzecim i czwartym przełomie próbki po pięciogodzinnym wytrzymaniu. Obserwowane zjawisko powstawania jam skurczowych można wiązać z ograniczoną lejnością oraz obecnością gazów w ciekłym stopie, co sprzyja lokalnym zaburzeniom procesu krzepnięcia.

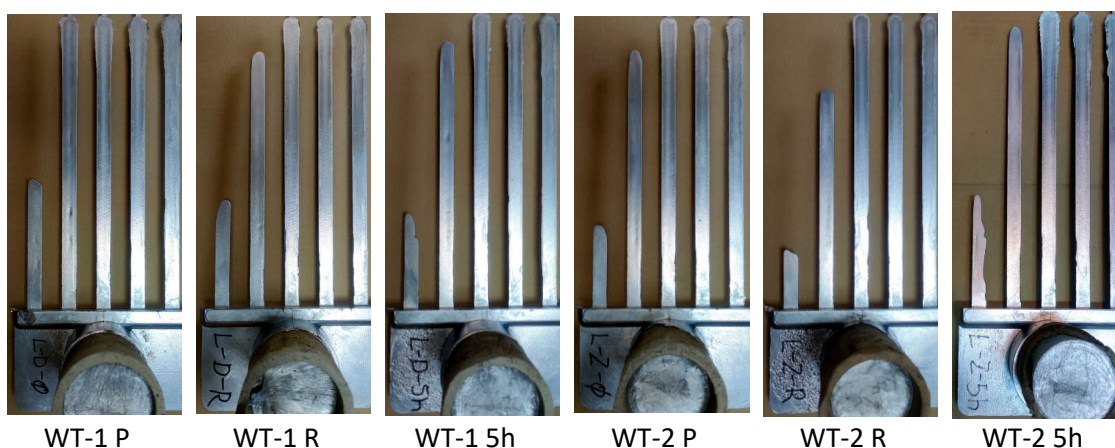
5.5 Badania lejności

Badania lejności przeprowadzono z wykorzystaniem stanowiska pomiarowego MetalHealth®, które umożliwia ocenę zdolności ciekłego stopu do wypełniania cienkościennych oraz zróżnicowanych geometrycznie fragmentów formy. Wymiar przekrojów poprzecznych kanałów formy przedstawiono na rysunku 73. Jako parametr oceny lejności stopu wykorzystano pomiar długości ramion odlewu.



Rys. 73. Przekrój poprzeczny kanałów formy do badania lejności.

Na rysunku 74 przedstawiono odlewy próbek lejności.



Rys. 74. Próbkę wykonaną w badaniu lejności.

Po usunięciu wyływek każda próbka została zwymiarowana przy użyciu wysokościomierza Digimahr 817 CLM. Jest to precyzyjne urządzenie do pomiarów wysokości i wymiarów liniowych, powszechnie stosowane w kontroli jakości elementów odlewanych i obrabianych. Wysokościomierz wyposażony jest w system elektroniczny umożliwiający bezpośredni odczyt wartości oraz zapisywanie wyników z wysoką dokładnością. Typowy zakres pomiarowy wynosi 0–600 mm, przy niepewności wymiarowej rzędu 0.001 mm. Stabilna podstawa granitowa minimalizuje wpływ drgań i zapewnia powtarzalność pomiarów. Przykładową analizę niepewności pomiarów dla reprezentatywnej próbki WT-1 P przedstawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Przykład obliczeń niepewności rozszerzonej dla próbki WT-1 P.

WT-1 P					
Pomiar / obliczenia	R1	R2	R3	R4	R5
1	298,078	297,675	297,856	297,945	131,28
2	298,077	297,673	297,869	297,962	131,252
3	298,082	297,665	297,856	297,955	131,244
4	298,066	297,663	297,848	297,941	131,265
5	298,069	297,665	297,864	297,971	131,276
średnia	298,074	297,668	297,859	297,955	131,263
odch.std.	0,0060	0,0048	0,0073	0,0110	0,0137
min	298,066	297,663	297,848	297,941	131,244
max	298,082	297,675	297,869	297,971	131,28
niepewność A	0,0027	0,0021	0,0033	0,0049	0,0061
delta x	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
niepewność B	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
niepewność całkowita	0,003	0,002	0,003	0,005	0,006
stopnie swobody	4	4	4	4	4
z rozkładu t Studenta, dla α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
k dla p=0.05	2,776	2,776	2,776	2,776	2,776
niepewność rozszerzona	0,008	0,006	0,009	0,014	0,017
U-	298,066	297,662	297,850	297,941	131,246
U+	298,082	297,674	297,868	297,969	131,280
+/-	298,074+/-0,008	297,668+/-0,006	297,859+/-0,009	297,955+/-0,014	131,263+/-0,017
przedział	298,066÷298,082	297,662÷297,674	297,85÷297,868	297,941÷297,969	131,246÷131,28

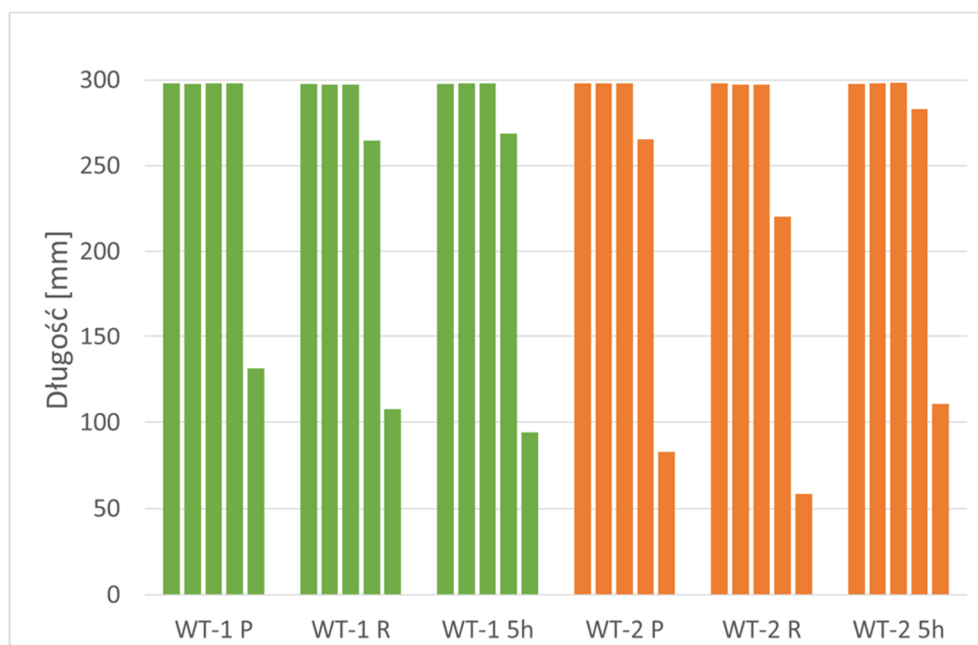
Ponieważ niepewność pomiaru była poniżej 0.01 mm dla kolejnych próbek przyjęto średnią długość z 5 pomiarów. Wyniki przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Wartości uśrednione pomiarów z prób lejności.

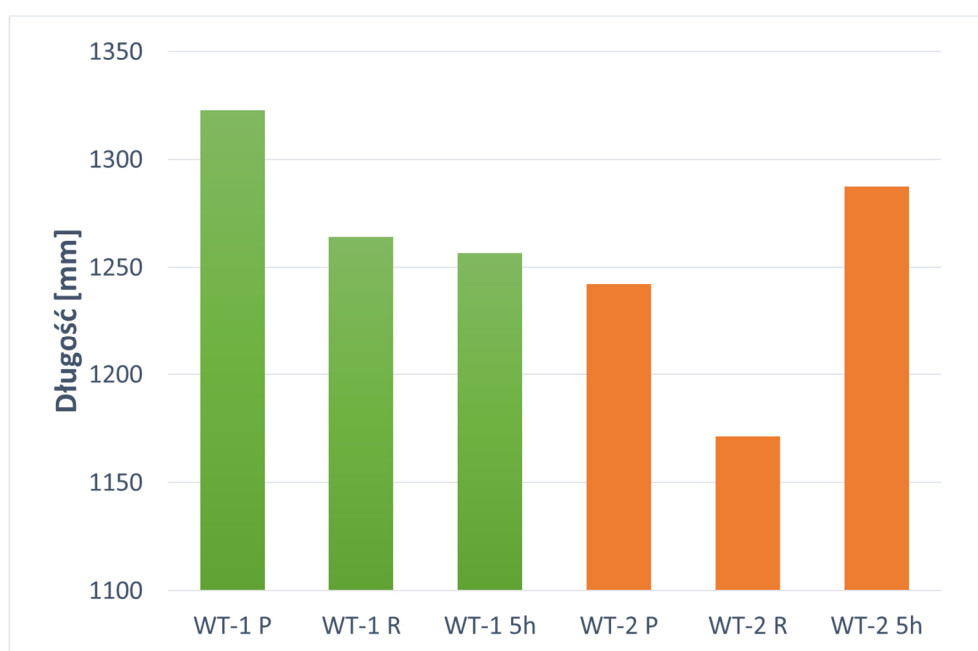
Nazwa próbki	R1	R2	R3	R4	R5	LC
WT-1 P	298,1	297,7	297,9	298,0	131,3	1322,8
WT-1 R	297,8	297,1	297,1	264,6	107,5	1264,1
WT-1 5h	297,7	297,8	298,1	268,8	94,3	1256,7
WT-2 P	298,0	298,0	298,0	265,5	82,8	1242,4
WT-2 R	298,1	297,4	297,3	220,2	58,4	1171,4
WT-2 5h	297,7	297,9	298,2	283,1	110,6	1287,4

gdzie LC - całkowita długość wypełnionych kanałów.

Na podstawie uzyskanych wyników została opracowana charakterystyka lejności dla każdej z próbek (Rys.75) oraz wskaźnik wypełnienia – LC (Rys. 76).



Rys. 75. Charakterystyka lejności badanych materiałów.



Rys. 76. Wskaźnik wypełnienia – LC.

Uzyskane wyniki wskazują na istotne różnice wskaźnika wypełnienia wnętrza formy (LC). Proces rafinacji w wyraźny sposób ograniczył lejność stopu WT-2, co uwidoczniło się w zdolności do wypełnienia kanałów o wysokości 3 mm i 2 mm.

5.6 Badania indeksu gęstości DI

Pomiar indeksu gęstości (DI) przeprowadzono na stanowisku 3VT Basic. Próba polegała na równoczesnym krzepnięciu w standaryzowanych cienkościennych kokilach metalowych dwóch próbek. Jedna krzepła w komorze w warunkach obniżonego ciśnienia (0.008 MPa, 80 mbar), natomiast druga w warunkach atmosferycznych (ok. 0.0985 MPa, 985 bar). Na Rys. 77 przedstawiono komplet próbek podczas procesu ich wykonywania – po lewej stronie widoczna jest próbka w trakcie krzepnięcia w komorze podciśnieniowej, natomiast po prawej próbka odlana w warunkach atmosferycznych.



Rys. 77. Próbkę DI w czasie krzepnięcia na stanowisku 3VT Basic.

Indeks gęstości (DI) został wyznaczony na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu zautomatyzowanej wagi hydrostatycznej MK 300. Urządzenie określa gęstości próbek wykonanych w atmosferze oraz w warunkach podciśnienia zgodnie z prawem Archimedesusa, a następnie automatycznie oblicza wartość indeksu gęstości (DI), zgodnie ze wzorem (1).

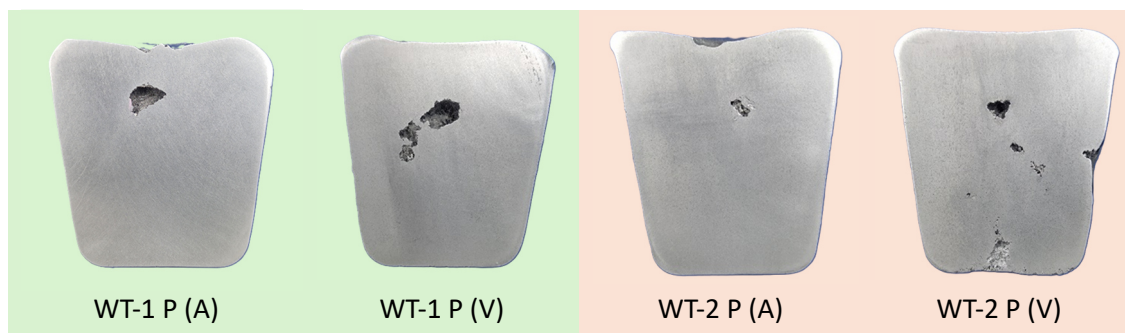
$$DI = \frac{\rho_A - \rho_V}{\rho_A} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

ρ_A – gęstość próbki wykonanej w atmosferze, $\frac{g}{cm^3}$,

ρ_V – gęstość próbki wykonanej w warunkach obniżonego ciśnienia (0.008 MPa, 80 mbar), $\frac{g}{cm^3}$

Wybrane przykłady makrostruktury analizowanych wlewków na podstawie, których wyznaczono indeksy gęstości dla wytopów WT-1 i WT-2 przedstawiono na rysunku 78.

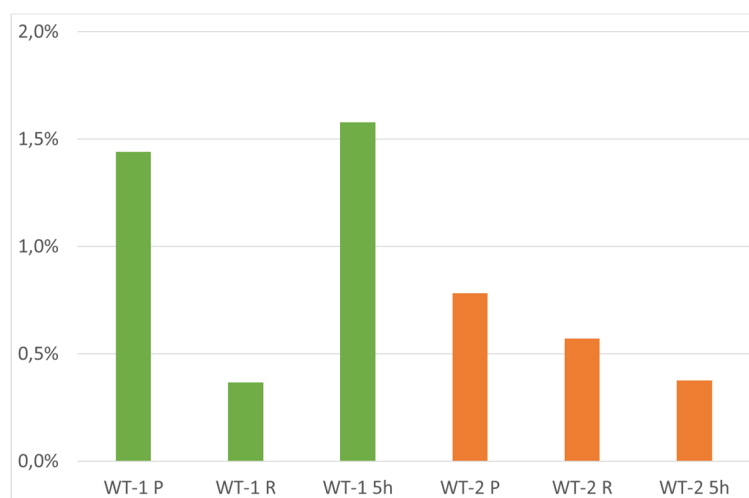


Rys. 78. Przekrój próbek DI – (A) próbka krzepnąca w atmosferze normalnej, (V) próbka krzepnąca w warunkach obniżonego ciśnienia (0.008 MPa, 80 mbar).

Niższa wartość wskaźnika DI jest charakterystyczna dla stopów o mniejszej zawartości wodoru i wtrąceń, a tym samym wykazujących mniejszą skłonność do tworzenia porowatości gazowej w gotowych odlewach. Wyższe wartości DI wskazują na podwyższony poziom zanieczyszczeń gazowych lub tlenkowych i potencjalnie wyższą brakowość odlewów. Połączenie próby podciśnieniowej 3VT basic z analizą gęstości na wadze MK 3000 pozwala nie tylko na jakościową ocenę porowatości w próbkach, ale także na uzyskanie mierzalnego parametru DI, który umożliwia porównywanie wyników pomiędzy poszczególnymi wytopami (WT-1, WT-2) oraz śledzenie zmian jakości stopu w funkcji czasu i zabiegów rafinacyjnych. Zestawienie wyników pomiarów gęstości przedstawiono w tabeli 10, natomiast wartość indeksu gęstości DI zilustrowano graficznie na rysunku 79.

Tab. 10. Wyniki pomiaru gęstości oraz indeksu gęstości (DI).

Parametr	WT-1 P	WT-1 R	WT-1 5h	WT-2 P	WT-2 R	WT-2 5h
ρ_A [g/cm ³]	2,6336	2,6137	2,6372	2,6197	2,6150	2,6083
ρ_V [g/cm ³]	2,5957	2,6041	2,5956	2,5992	2,6045	2,5934
DI [%]	1,44%	0,37%	1,58%	0,78%	0,57%	0,37%



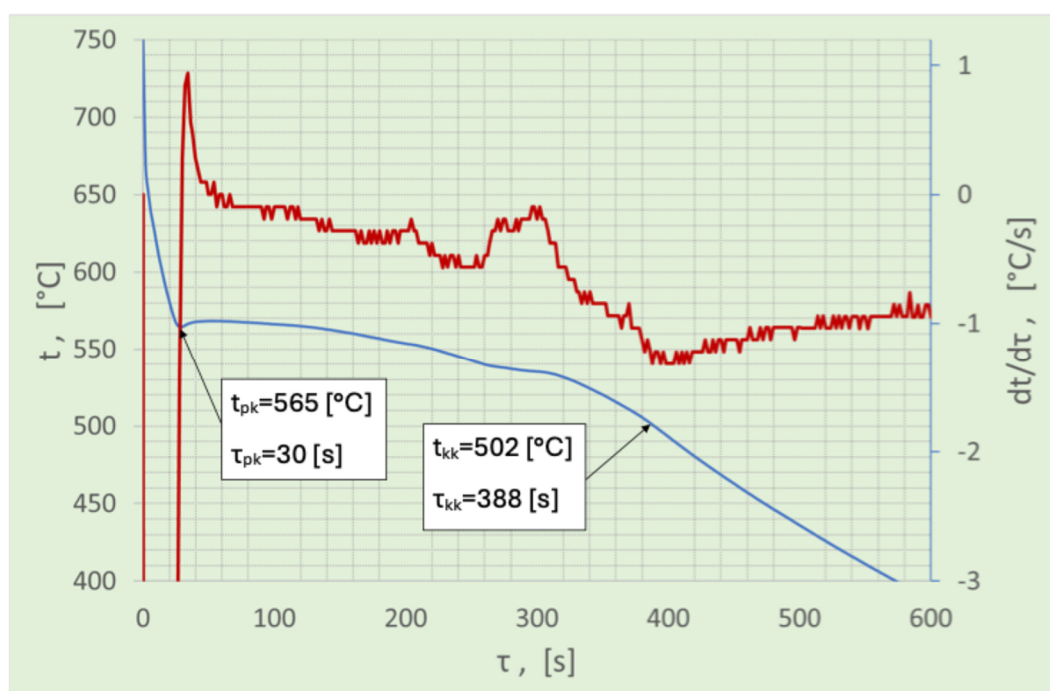
Rys. 79. Wyniki pomiaru indeksu gęstości (DI).

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wartości wskaźnika DI dla próbek z wytopu WT-2 utrzymywały się na ogólnie niższym poziomie niż w przypadku próbek z wytopu WT-1. Zgodnie z oczekiwaniami, przeprowadzenie rafinacji barbotażowej spowodowało obniżenie wartości DI w obu wytopach. W dalszych obserwacjach zauważono, że w próbkach WT-1 następowało stopniowe podwyższanie wartości wskaźnika DI, co należy wiązać z rozpuszczaniem wodoru atmosferycznego w ciekłym metalu, czyli ze zjawiskiem wtórnego zawodorowania, charakterystycznym i powszechnie obserwowanym w procesach odlewniczych. Odmienny efekt zaobserwowano natomiast dla próbek WT-2, gdzie po pięciogodzinnym wytrzymaniu odnotowano dalsze obniżenie wartości wskaźnika DI.

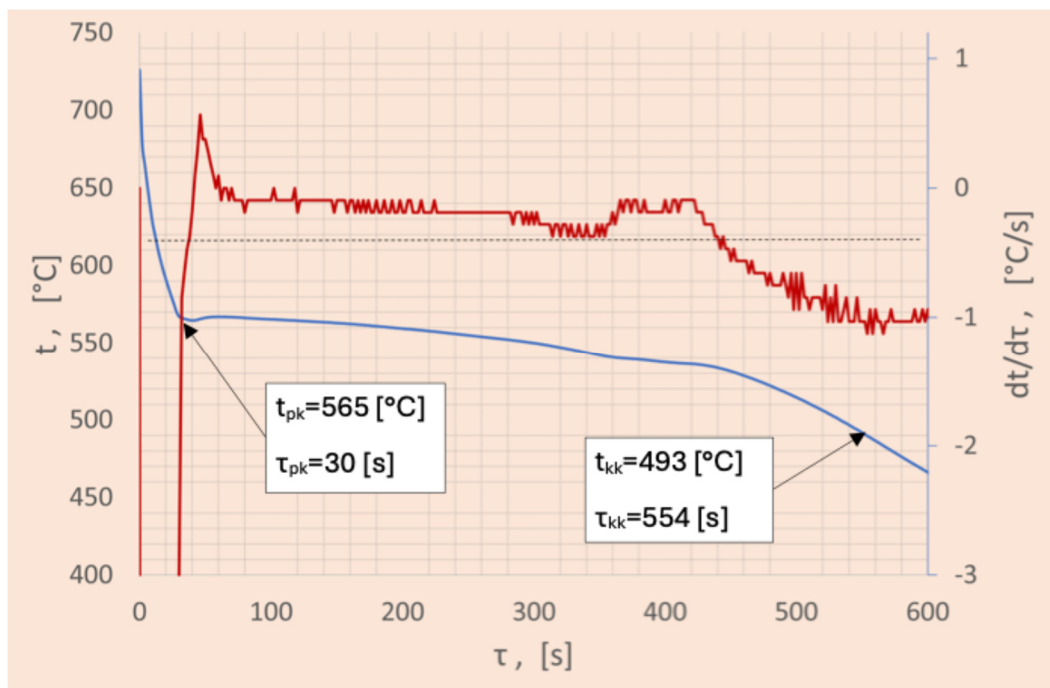
5.7 Analiza termiczna

Dane zarejestrowane w czasie krzepnięcia i stygnięcia odlewu w kubkach Quick Cup pozwoliły na wyznaczenie charakterystycznych punktów na krzywej krzepnięcia takich jak: temperatura początku krystalizacji (t_{pk}) oraz temperatura końca krystalizacji (t_{kk}). Przykładowe wykresy przedstawiające przebieg krzepnięcia (TA) oraz wyniki analizy termiczno-derywacyjnej (ATD) zestawione zostały na rysunkach 80 i 81.

Obliczono również przedziały temperaturowe (Tab. 11) oraz czas trwania krzepnięcia, w których proces ten zachodził (Rys. 82-83).



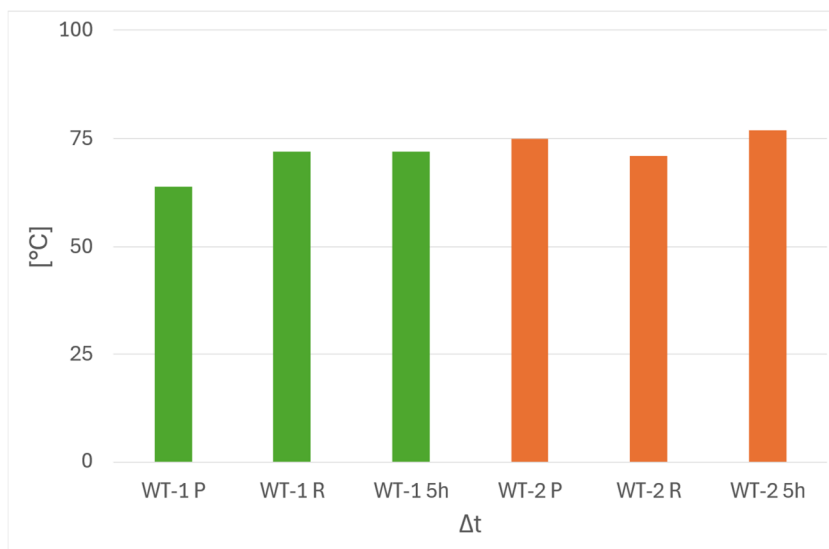
Rys. 80. Krzywa krzepnięcia stopu WT-1.



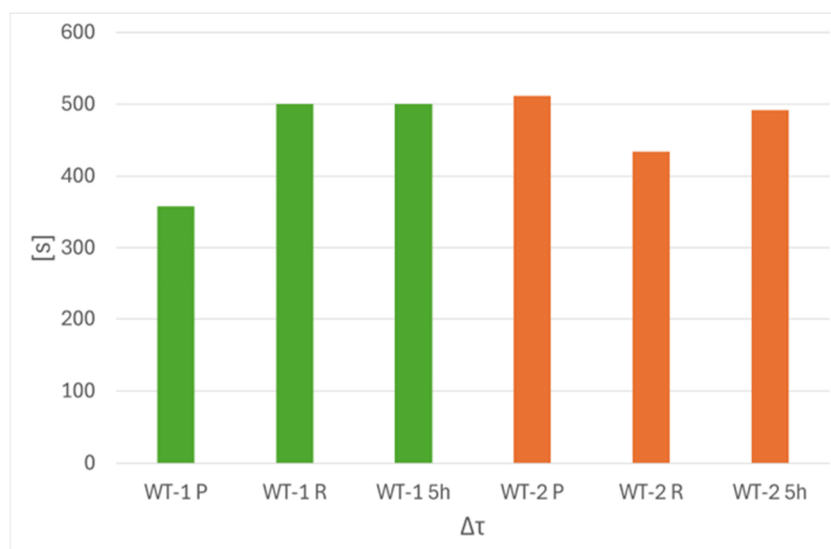
Rys. 81. Krzywa krzepnięcia stopu WT-2.

Tab. 11. Charakterystyka przebiegu krzepnięcia.

Nazwa próbki	t_{pk}	t_{kk}	τ_{pk}	τ_{kk}	Δt	$\Delta \tau$
WT-1 P	565	502	30	388	63	358
WT-1 R	566	502	30	530	64	500
WT-1 5h	565	500	36	536	65	500
WT-2 P	565	493	42	554	72	512
WT-2 R	565	493	36	470	72	434
WT-2 5h	567	493	40	532	74	492



Rys. 82. Przedział temperaturowy krzepnięcia.



Rys. 83. Czas krzepnięcia.

Zaobserwowane różnice w końcowej temperaturze krzepnięcia oraz w czasie trwania procesu mogą wynikać z niewielkich, lecz istotnych różnic w zawartości pierwiastków takich jak krzem, miedź i tytan. Krzem i miedź wpływają na rozszerzenie zakresu krystalizacji eutektycznej, natomiast tytan, występujący w roli modyfikatora i zarodka krystalizacji, może przyczyniać się do zmian w morfologii ziaren oraz w przebiegu końcowego etapu krzepnięcia. Wskazuje to, że nawet niewielkie różnice w składzie chemicznym mogą mieć zauważalny wpływ na przebieg przemian fazowych i właściwości strukturalne uzyskanych stopów.

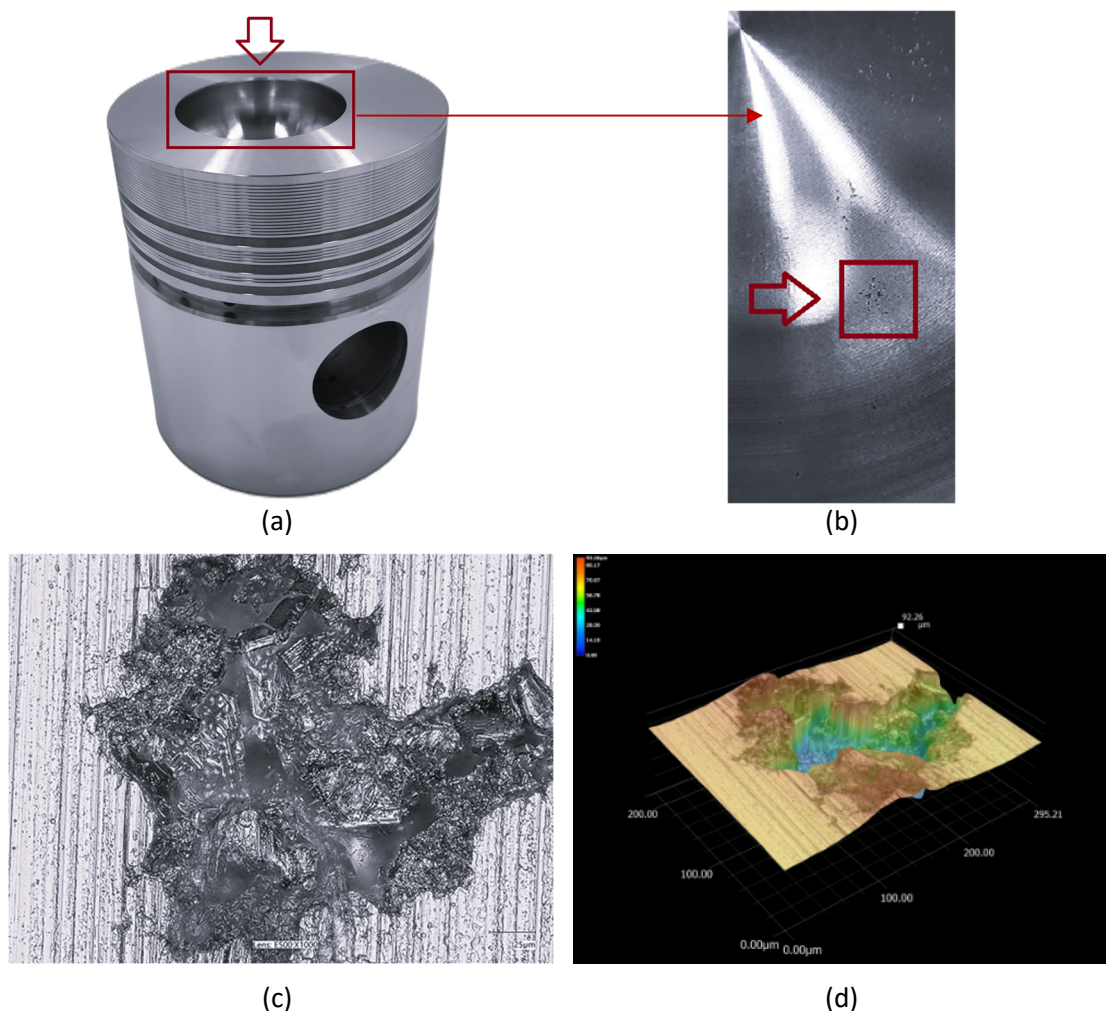
5.8 Podsumowanie fazy pierwszej badań

Wstępną analizę uzyskanych wyników przedstawiono w pracy [72]. Pomimo tego, że składy chemiczne obu wytopów (WT-1, WT-2) mieściły się w dopuszczalnym zakresie wskazanym w normie PN-EN 1676, różniły się one właściwościami, zwłaszcza w zakresie wartości wskaźnika indeksu gęstości, który jest miarą stopnia odgazowania stopu.

Mikroporowatość w obszarze komory spalania stanowi jedną z najczęstszych przyczyn kwalifikowania tłoków jako braki w przedsiębiorstwie Złotecki Sp. z o.o. W dotychczasowej praktyce produkcyjnej wady te utożsamiano głównie z błędami występującymi bezpośrednio podczas procesu odlewania, w tym z niekorzystnymi zjawiskami towarzyszącymi wypełnianiu wnęki formy, bądź też z porowatością gazową wynikającą z niedostatecznej rafinacji ciekłego stopu przed rozpoczęciem zalewania.

Na podstawie przeprowadzonej analizy braków produkcyjnych stwierdzono, że w zdecydowanej większości przypadków przyczyną odrzutu tłoków wykonanych

z materiału WT-2 była mikroporowatość skurczowa w strefie komory spalania (Rys. 84). Potwierdzają to wyniki obserwacji powierzchni dna komory spalania, tj. strefy występowania potwierdzonych wad.

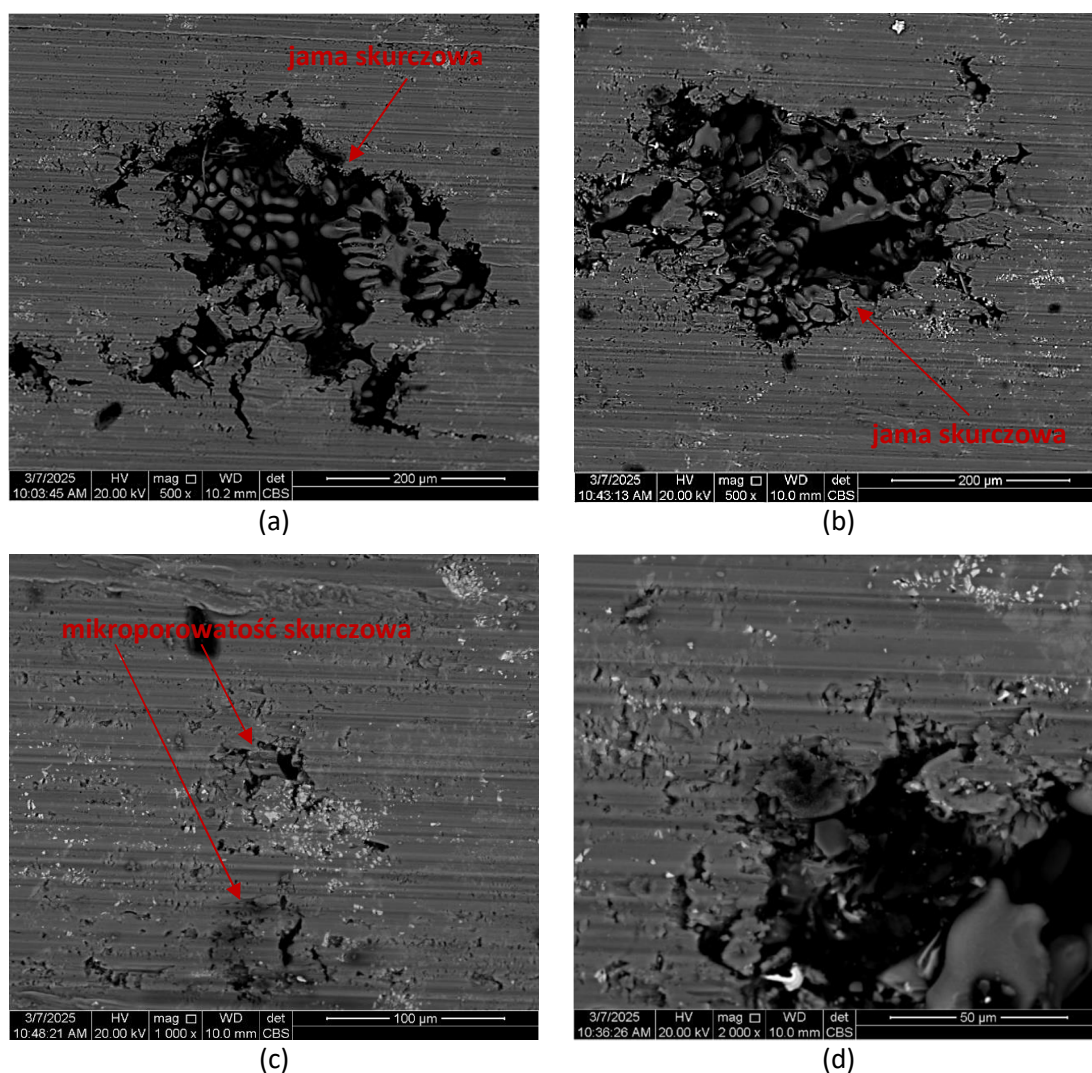


Rys. 84. Mikroporowatość skurczowa zidentyfikowana w komorze spalania tłoka:
 (a) tłok $\varnothing 110$ mm z zaznaczonym miejscem występowania wad;
 (b) powiększenie fragmentu komory spalania - makrostruktura badanego obszaru;
 (c) wada powierzchniowa, pow. x1000; (d) obraz cyfrowy 3D, pow. x1000.

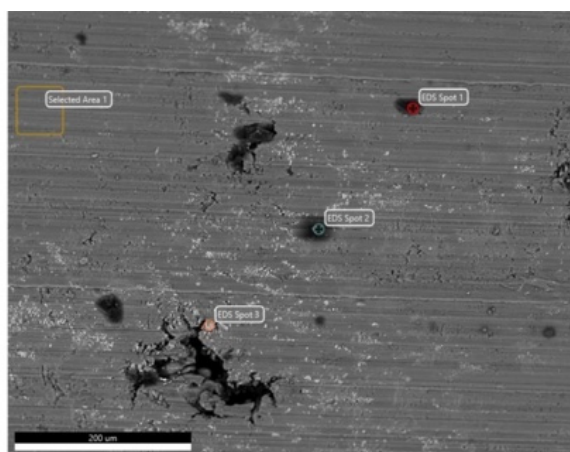
Komora spalania jest usytuowana w obszarze odlewu o największej grubości ścianki, co istotnie wpływa na warunki wymiany ciepła i przebieg krzepnięcia. Na tym etapie badań zaobserwowano, że w przypadku, gdy zawartość wodoru w ciekłym metalu jest niska (niski poziom DI), w końcowej fazie krzepnięcia (w stanie półstałym), mimo zapewnionego dopływu ciekłego metalu, może dochodzić do zaburzenia mechanizmu kompensacji skurczu. Zdolność stopu do wyrównania ubytku objętości powstającego podczas krzepnięcia poprzez dopływ ciekłego metalu lub wydzielanie się gazów jest ograniczona. W takich warunkach, w trakcie przejścia fazowego, zamiast mikropęcherzyków gazowych, powstają jamy skurczowe oraz mikroporowatość

skurczowa. Ich rozmieszczenie i intensywność zależą od zawodorowania stopu, bilansu cieplnego oraz warunków zasilania odlewu. W przypadku odlewów tłokowych zjawisko to występuje w największym nasileniu w newralgicznym obszarze tłoka jakim jest komora spalania.

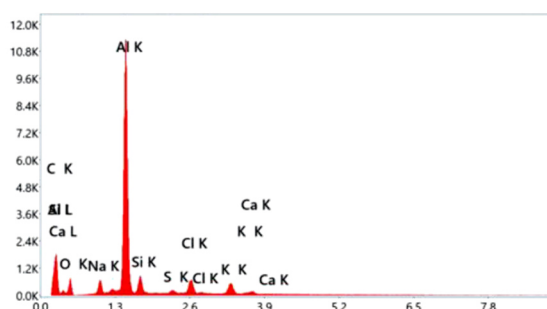
Na rysunku 85 przedstawiono wybrane obrazy mikrostruktury stopu WT-2 z widoczną mikroporowością w komorze spalania ujawnioną na etapie obróbki skrawaniem tłoka. Charakterystyczną mikrostrukturę obszaru wadliwego oraz wyniki punktowej analizy jakościowej przedstawiono na rysunkach 86 i 87.



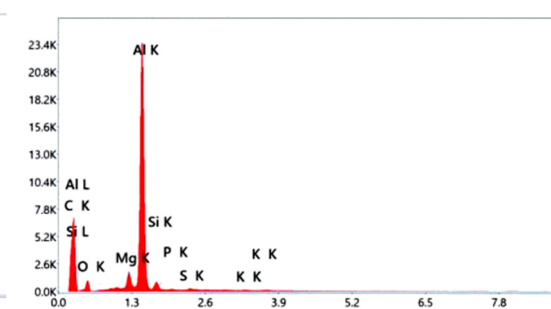
Rys. 85. Charakterystyczne przykłady wad odlewniczych zidentyfikowane w toku badań:
 (a) i (b) jamy skurczowe, (c) mikroporowość skurczowa,
 (d) powiększenie jamy skurczowej z widoku (b), SEM.



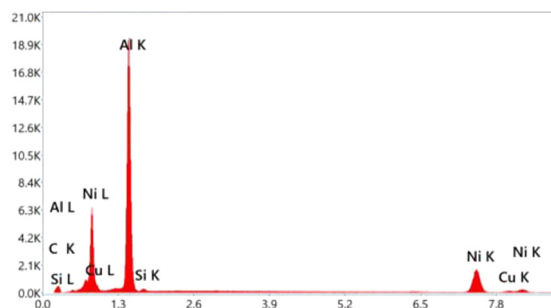
(a)



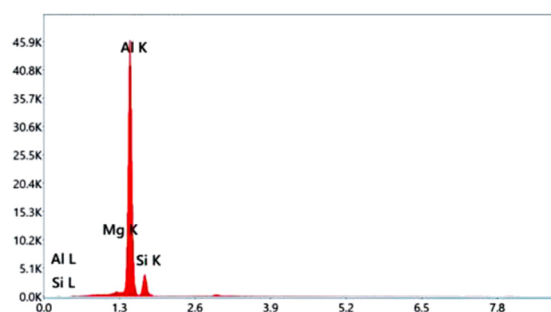
(b)



(c)

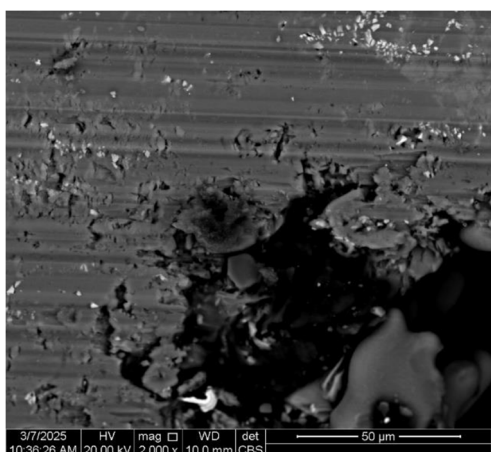


(d)

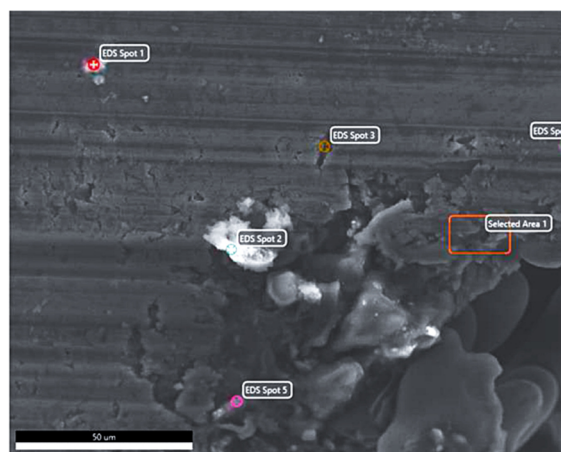


(e)

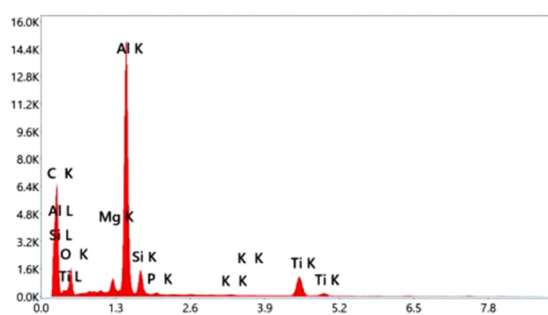
Rys. 86. (a) Mikrostruktura w obszarze zidentyfikowanych wad oraz wyniki punktowej analizy jakościowej w: (b) pkt. 1, (c) pkt. 2, (d) pkt. 3, (e) w obszarze 1, SEM/EDS.



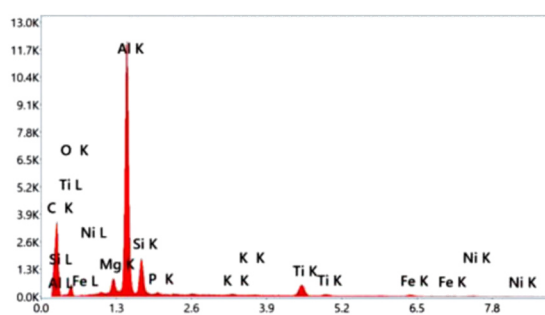
(a)



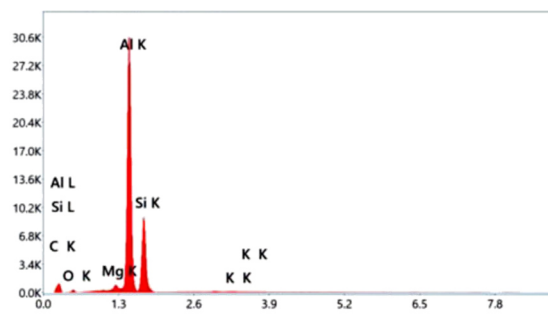
(b)



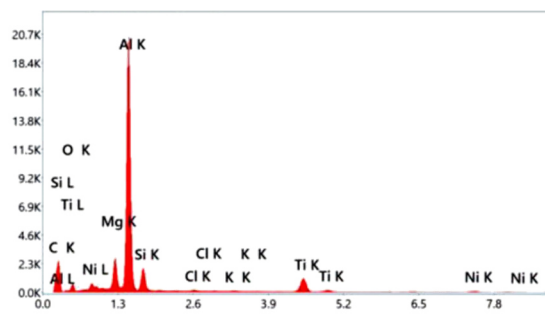
(c)



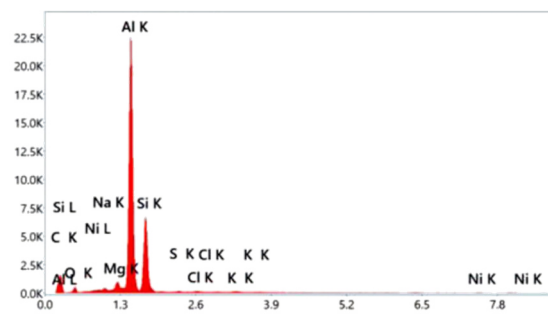
(d)



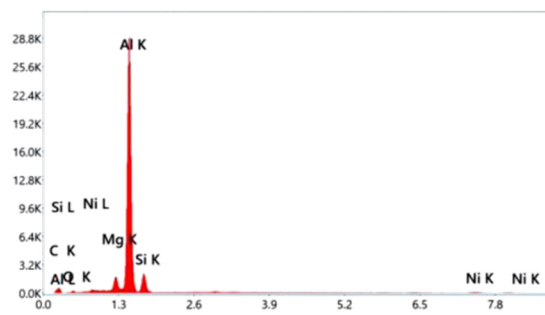
(e)



(f)



(g)



(h)

Rys. 87. (a) Mikrostruktura w obszarze zidentyfikowanych wad oraz wyniki mikroanalizy jakościowej w: (c) pkt. 1, (d) pkt. 2, (e) pkt. 3, (f) pkt. 4, (g) pkt. 5, (h) w obszarze 1, SEM/EDS.

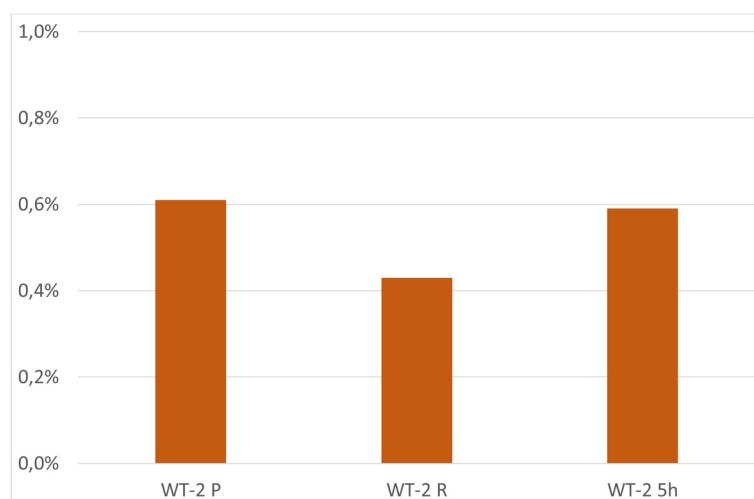
5.9 Modyfikacja stopnia zawodorowania stopu

Na podstawie wyników prac w etapie pierwszym podjęto decyzję o przeprowadzeniu dodatkowych badań stopu WT-2, mających na celu potwierdzenie lub wykluczenie wysuniętych przypuszczeń.

W kolejnym badaniu wyznaczono indeks gęstości jedynie dla stopu WT-2. Materiał do badań przygotowano zgodnie z wcześniej opisaną procedurą, a próbki pobrano w identycznych odstępach czasowych jak w poprzedniej serii badań. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tabeli 12 oraz na rysunku 88.

Tab. 12. Wyniki DI, druga próba.

Parametr	WT-2 P	WT-2 R	WT-2 5h
DI	0,61%	0,43%	0,59%



Rys. 88. Wyniki DI, druga próba.

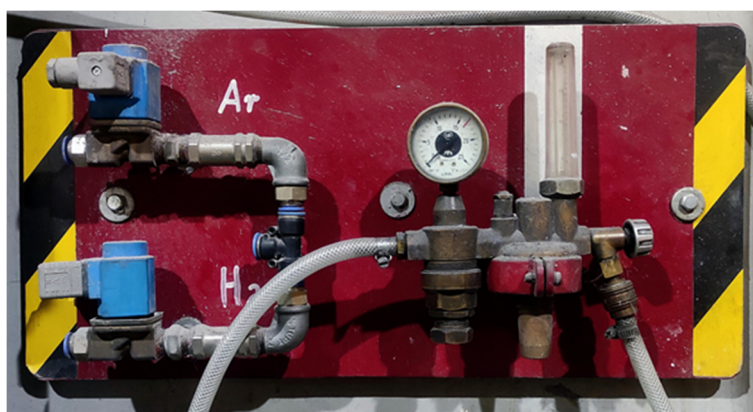
Kolejne badanie potwierdziło bardzo niski poziom wskaźnika DI w próbkach z wytopu WT-2. Ponownie zaobserwowano, że stop nie absorbował wodoru atmosferycznego w okresie pięciogodzinnego wytrzymania. Minimalny wzrost wartości DI, rzędu 0.1%, należy uznać za pomijalny i prawdopodobnie wynikający z niedokładności zastosowanej metody pomiarowej.

Potwierdzenie rezultatów w tej serii badań stało się przesłanką do podjęcia dalszych działań ukierunkowanych na opracowanie rozwiązania produkcyjnego, które pozwoli na określenie akceptowalnego poziomu zawodorowania stopu oraz

wypracowanie powtarzalnej metody jego uzyskiwania, niezależnie od zmienności jakościowej poszczególnych partii surowca.

W tej części pracy przeprowadzono serię pięciu prób technologicznych. Dla każdej z nich przygotowano pojedynczy wsad pieca o masie około 200 kg, wykonany ze stopu WT-2. Po stopieniu materiał został poddany standardowej rafinacji barbotażowej z wykorzystaniem argonu o czystości 99,99999% (dostarczany przez Air Products). Parametry procesu rafinacji wynosiły: czas barbotażu – 10 min, natężenie przepływu – 10 dm³/min, prędkość obrotowa rotora – 350 obr./min.

Następnie, przy użyciu opracowanego stanowiska do przełączania źródeł gazu (Rys. 89), zmieniono medium robocze rafinatora na mieszaninę 95% Ar + 5% H₂ (R1ArH5, Air Products) w celu przeprowadzenia wtórnego zagazowania ciekłego metalu. Parametry stałe tego etapu wynosiły: natężenie przepływu – 15 dm³/min, obroty rotora – 350 obr./min, natomiast czas wtórnego zagazowania był różnicowany w poszczególnych próbach (Tab. 13).



Rys. 89. Widok przełącznika gazów.

W trakcie prób technologicznych wykonywane były odlewy tłokowe oraz prowadzono bieżącą kontrolę indeksu gęstości (DI). Dla każdej próby pobierano próbki w stałych, powtarzalnych odstępach czasu: po rafinacji (t_0), po 20 min, 40 min, 60 min i 80 min. Pomiar gęstości próbek oraz wyznaczenie DI realizowano zgodnie z procedurą opisaną wcześniej, zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 13.

Z każdego przygotowanego wsadu wykonywano odlewy dwóch różnych tłoków (zgodnie z numeracją zleceń produkcyjnych). Po zakończeniu procesów odlewania i obróbki skrawaniem prowadzono nadzór jakościowy ukierunkowany na identyfikację wad odlewniczych zgodnie z instrukcją dotyczącą wad odlewniczych obowiązującą w zakładzie w celu ujednolicenia oceny. Dane o brakowości przedstawiono w tabeli 13.

Tab. 13. Wyniki prób doboru wskaźnika DI.

Numer próby	R1ArH5 czas barbotażu	DI po rafinacji [%]	DI +20 min. [%]	DI +40 min [%]	DI +60 min. [%]	DI +80 min [%]	numer ZP	ilość szt. w partii	ilość braków odlewniczych	% braków
1	brak	0,68	0,52	0,56	0,67	0,73	ZP-010	43	10	23%
							ZP-011	42	8	19%
2	2 min	0,98	1,02	1,11	1,21	1,18	ZP-012	52	4	8%
							ZP-013	53	4	8%
3	5 min	1,46	1,62	1,62	1,58	1,72	ZP-014	48	1	2%
							ZP-015	47	0	0%
4	10 min	2,31	2,42	2,28	2,47	2,61	ZP-016	44	2	5%
							ZP-017	44	3	7%
5	15 min	3,12	3,34	3,33	3,47	3,52	ZP-018	48	4	8%
							ZP-019	49	6	12%

Jak wynika z analizy uzyskanych wyników najkorzystniejsze rezultaty — rozumiane jako stabilny przebieg wartości wskaźnika DI w czasie oraz najniższą brakowość związaną z wadami odlewniczymi — uzyskano w próbie nr 3, tj. przy wtórnym zagazowaniu stopu WT-2 mieszaniną R1ArH5 w czasie 5 min. Wynik ten przyjęto jako punkt odniesienia dla dalszych rekomendacji dotyczących docelowego poziomu zawodorowania oraz powtarzalnej metody jego uzyskiwania niezależnie od partii dostarczonego surowca.

5.10 Opracowanie procedury obrotu zawrotami produkcyjnymi

W kolejnym etapie prac technologicznych podjęto próbę oceny materiału odlewniczego, w którym wykorzystywane są zawroty produkcyjne, czyli braki zidentyfikowane na różnych etapach procesu produkcyjnego oraz elementy technologiczne odlewu, takie jak układ zalewowy i zasilacze.

W badaniach wykorzystano przyjęty we wcześniejszych etapach wskaźnik DI do wyznaczenia dopuszczalnego udziału zawrotów. W tabelach poniżej (Tab. 14-15) przedstawiono wpływ modyfikacji procedury przygotowania wsadu w postaci zawrotów produkcyjnych.

Tab. 14. Wyniki indeksu gęstości (DI) dla procedury przed zmianami.

DI po przetopie	procentowy dodatek zawrotów [%]	Wagowy dodatek zawrotów	DI po dodaniu zawrotów	DI po rafinacji	DI po drugim zabiegu rafinacji
1,81	5	10	2,87	0,98	-
1,91	10	20	3,54	1,19	-
2,03	15	30	4,82	1,63	-
1,78	20	40	4,92	1,81	-
1,69	25	50	5,64	2,46	0,87
1,82	30	60	7,82	3,11	1,14

Tab. 15. Wyniki indeksu gęstości (DI) po zmianie procedury.

DI po przetopie	procentowy dodatek zawrotów [%]	Wagowy dodatek zawrotów	DI po dodaniu zawrotów	DI po rafinacji
1,68	5	10	2,38	1,02
1,75	10	20	2,54	0,97
1,81	15	30	2,86	1,12
2,11	20	40	3,01	1,26
1,71	25	50	2,98	1,48
1,92	30	60	3,29	1,36

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na wprowadzenie zmian w procesie usuwania elementów technologicznych. Porównanie procesu przed i po wprowadzeniu zmian przedstawiono w tabeli 16.

Tab. 16. Porównanie procesów usuwania elementów technologicznych.

	Przed zmianami procesu	Po zmianach procesu
Opis technologii	• Elementy technologiczne usuwane w procesie cięcia z wykorzystaniem emulsji chłodzącej. • Odseparowanie stalowej wkładki filtracyjnej w procesie cięcia z wykorzystaniem emulsji chłodzącej.	• Elementy technologiczne układu zalewowego usuwane poprzez odłamanie bez udziału emulsji chłodzącej. • Odseparowanie stalowej wkładki filtracyjnej poprzez odłamanie. • Odcięcie nadlewu z wykorzystaniem emulsji chłodzącej.
Wady (-) i zalety (+)	– Długi czas procesu (podział na dwie operacje). – Złożone oprzyrządowanie. – Użycie emulsji chłodzącej. – Wprowadzenie wilgoci do zawrotów (zawodorowanie stopu). – Wprowadzenie zanieczyszczeń z koncentratu emulsji chłodzącej.	+ Segregacja usuniętych elementów technologicznych na zawroty produkcyjne – suche oraz odpady w jednej operacji. + Obniżenie kosztów procesu. + Ograniczenie czasu procesu. + Prostota i uniwersalność oprzyrządowania. + Ograniczenie wykorzystania emulsji chłodzącej.

Po wprowadzeniu wyżej opisanych zmian w procesach produkcyjnych dokonano porównania poziomu brakowości odlewniczej ze zleceń produkcyjnych dla tego samego asortymentu przed i po wprowadzeniu zmian. Osiągnięto ograniczenie brakowości odlewniczej o połowę (Tab. 17).

Tab. 17. Poziom barakowości zleceń produkcyjnych.

Stan	Zlecenia produkcyjne	Ilość partii produkcyjnej	Ilość braków odlewniczych	Brakowość
Przed wprowadzeniem zmian	ZP-68	1200	106	8,8%
	ZP-46	240	22	9,2%
	ZP-126	300	25	8,3%
			Średnia:	8,8%
Po wprowadzeniu zmian	ZP-81	800	34	4,3%
	ZP-91	400	17	4,3%
	ZP-262	300	12	4,0%
			Średnia:	4,2%

6. Podsumowanie i wnioski

Porowatość w stopach Al-Si stanowi jedno z kluczowych zjawisk ograniczających jakość odlewów. Mechanizm jej powstawania związany jest przede wszystkim z dwiema przyczynami: skurczem objętościowym zachodzącym podczas krzepnięcia oraz wydzielaniem się gazów, głównie wodoru. Porowatość skurczowa rozwija się w wyniku braku kompensacji skurczu krzepnięcia przez dopływ ciekłego metalu, co prowadzi do powstawania pustek w przestrzeniach międzyczendrytycznych. Z kolei porowatość gazowa jest efektem nadmiernej zawartości wodoru, którego rozpuszczalność w stanie ciekłym jest znacznie większa niż w stanie stałym. Podczas krzepnięcia wodór wydzielają się w postaci pęcherzyków zatrzymywanych w osnowie. Istotnym czynnikiem sprzyjającym inicjacji porowatości są bi-filmy, czyli podwójne warstwy tlenkowe wprowadzone do ciekłego metalu w wyniku turbulencji. Stanowią one zarodki dla pęcherzy gazowych oraz miejsca ułatwiające rozwój pustek skurczowych. W praktyce porowatość w odlewach Al-Si ma często charakter mieszany, wynikający ze współdziałania mechanizmów gazowych, skurczowych i obecności bi-filmów.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że **jednym z najbardziej efektywnych sposobów oceny stopnia przygotowania ciekłego metalu przed rozpoczęciem procesu produkcji odlewów tłokowych jest wyznaczenie indeksu gęstości**. W warunkach przemysłowych istotnym czynnikiem jest czas przeznaczony na dodatkowe próby przed dopuszczeniem wytopu do odlewania. Testy w warunkach obniżonego ciśnienia (RPT) pozwalają uzyskać wynik w krótkim czasie – stygnięcie wlewka w warunkach obniżonego ciśnienia trwa zwykle około 5 minut, a procedura wyznaczania indeksu gęstości z wykorzystaniem oprogramowanej wagi zajmuje dodatkowe kilka minut. Uzyskana w ten sposób informacja o poziomie zagazowania stopu umożliwia szybkie podjęcie decyzji o konieczności przeprowadzenia dodatkowego odgazowania lub wtórnego zagazowania ciekłego metalu.

Wdrożenie opracowanej w toku realizacji prac badawczych **procedury kontroli jakości ciekłego stopu Al-Si w firmie Złotecki Sp. z o.o. pozwoliło na ograniczenie brakowości w produkcji dwóch różnych typów odlewów tłokowych do poziomu około 2%.**

Istotnym **rezultatem aplikacyjnym** zrealizowanych prac badawczych **jest także opracowanie i wdrożenie procedury przygotowania zawrotów produkcyjnych, wprowadzanych ponownie do obiegu surowcowego na etapie przygotowania wsadu pieca topielnego. Ograniczenie wpływu procesu mechanicznego odcinania elementów technologicznych odlewów tłokowych wykonywanych ze stopów okołoeutektycznych**

na stopień zagazowania wsadu **przyczyniło się do znacznego ograniczenia udziału wadliwych produktów odrzucanych w procesie produkcyjnym, a tym samym do obniżenia kosztów i zmniejszenia negatywnego oddziaływania procesu odlewniczego na środowisko naturalne.**

Na podstawie analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. W analizowanym procesie produkcyjnym firmy Złotecki Sp. z o. o. etap rafinacji stopu okazał się niewystarczającym zabiegiem przygotowania ciekłego stopu do wytwarzania odlewów tłokowych.
2. W przypadku stopów o bardzo niskim wskaźniku gęstości ($DI < 1\%$) ograniczona ilość gazów rozpuszczonych w metalu nie zapewnia skutecznej kompensacji skurczu objętościowego podczas krzepnięcia. Skutkuje to powstawaniem jam skurczowych i mikroporowatości skurczowej.
3. Do kluczowych parametrów procesu przygotowania ciekłego metalu należy zaliczyć czas oraz przepływ gazu w trakcie rafinacji i ewentualnego późniejszego zagazowania stopu. Ich odpowiednia regulacja pozwala na uzyskanie wskaźnika gęstości (DI) na poziomie ok. 1.5%.
4. Wykorzystanie w procesie topienia niesortowanego zawrotu produkcyjnego prowadzi do zwiększenia brakowości odlewów wynikającej z dodatkowego zagazowania stopu.
5. Zmodyfikowana procedura gospodarki zawrotami produkcyjnymi pozwoliła na ograniczenie brakowości odlewów. Jej wdrożenie przyczyniło się do znaczącego obniżenia kosztów produkcji tłoków.

Spis rysunków

Rys. 1.	Rodzaje pojazdów silnikowych.....	9
Rys. 2.	Udział sprzedanych nowych samochodów z napędem elektrycznym (BEV) i hybrydowym typu plug-in (PHEV).....	12
Rys. 3.	Liczba sprzedanych nowych samochodów elektrycznych (BEV i PHEV) i nieelektrycznych na świecie.....	12
Rys. 4.	Odsetek obecnie użytkowanych samochodów elektrycznych (BEV i PHEV).....	13
Rys. 5.	Rezerwy aluminium na świecie, dane z 2024 roku.	16
Rys. 6.	Prognoza udziału stopów wtórnych w całkowitej produkcji stopów aluminium.....	18
Rys. 7.	Prognoza popytu na stopy aluminium.	18
Rys. 8.	Podział odlewniczych stopów aluminium.....	19
Rys. 9.	Rozkład naprężeń zachodzących pod wpływem temperatury i ciśnienia gazu w tłoku silnika z zapłonem samoczynnym samochodu osobowego z chłodzeniem strumieniowym.....	23
Rys. 10.	Granice zmian zawartości krzemu w typowych grupach siluminów tłokowych.....	24
Rys. 11.	Przykłady błon tlenkowych: (a) i (b) – usuwanie warstwy tlenków z wykorzystaniem urządzenia Taylora; (c) błona tlenkowa zawieszona w stopie EN AW-1235.....	29
Rys. 12.	Schematyczne przedstawienie turbulencji w cieczy powodujących porywanie błon tlenkowych, tworzenie się podwójnych warstw i pęcherzyków.	30
Rys. 13.	Mikrofotografia FEG-SEM przedstawiająca typowe wady odlewów powstające w wyniku wciągania „bifilmów”.....	31
Rys. 14.	Przykłady przełomów próbek wykonanych ze stopów aluminium z widocznymi defektami spowodowanymi występowaniem „bifilmów”: (a) stop Al-Si-Mg-Cu; (b) i (c) stop Al-7 Si-0.3 Mg.....	31
Rys. 15.	Dwie strony defektów „bifilmu” znalezione na powierzchniach pęknięć próbek K-mold dla stopu Al-Si-Mg-Cu.....	32
Rys. 16.	Schematyczne przedstawienie mechanizmu tworzenia się porowatości w stopach Al-Si.....	33
Rys. 17.	Stop aluminium po krzepnięciu w warunkach ciśnienia atmosferycznego (a) oraz w podciśnieniu 100 mbar (b).	33
Rys. 18.	Próbka odlana w warunkach podciśnienia (100 mbar) przeznaczona do wyznaczenia wartości BI: (a) przekrój próbki, (b) pory i pustki zidentyfikowane w systemie analizy obrazu, (c) przykład pomiaru maksymalnej długości poru dla wybranego fragmentu.....	34
Rys. 19.	Przykładowe tłoki produkowane w firmie ZŁOTECKI Sp. z o.o.....	35
Rys. 20.	Przykładowe zestawy cylindrowe produkowane w firmie ZŁOTECKI Sp. z o.o..	36
Rys. 21.	Przykładowa instrukcja odlewnicza.	39
Rys. 22.	Podział tłoka na strefy kontrolne: (a) tłok silnikowy, (b) tłok sprężarkowy, (c) wyciąg z instrukcji kontrolnej „Dopuszczalne wady powierzchni tłoków” określający dopuszczalne limity akceptacji dla poszczególnych rodzajów niezgodności.	40
Rys. 23.	Postać dostarczanego surowca: (a) gąski, (b) wafle.....	41
Rys. 24.	Schemat budowy tłoka do silnika wysokoprężnego.	43
Rys. 25.	Rzeczywiste przekroje odlewów tłokowych.....	43
Rys. 26.	Model odlewu oraz przekroje wzdłuż i prostopadle do osi głównej tłoka.	44
Rys. 27.	Odlew tłoka - budowa, zasilanie i kierunek krzepnięcia.....	46
Rys. 28.	Wady odlewnicze - jamy skurczowe.	47
Rys. 29.	Wady odlewnicze – mikroporowatość skurczowa.	47
Rys. 30.	Wady odlewnicze – porowatość gazowa.	48
Rys. 31.	Wady odlewnicze – niedolania, zimne spawy.....	48

Rys. 32.	Wady odlewnicze – wtrącenie tlenkowe.	49
Rys. 33.	Schemat konstrukcji formy odlewniczej stosowanej do wytwarzania odlewów tłokowych.....	52
Rys. 34.	Zawroty produkcyjne.	54
Rys. 35.	Widok tygla pieca odlewniczego - rozpoczęcie topienia.	54
Rys. 36.	Sterownik pieca.	55
Rys. 37.	Widok tygla pieca odlewniczego - topienie gąsek.	55
Rys. 38.	Próba miseczkowa.	55
Rys. 39.	Proces barbotażu: (a) widok urządzenia; (b) widok urządzenia podczas pracy w ciekłym stopu Al-Si.	56
Rys. 40.	Etap usuwania zgarów: (a) widok po rafinacji; widoczne zanieczyszczenia i tlenki wyniesione na powierzchnię stopu; (b) przygotowanie do usunięcia zanieczyszczeń; (c) oczyszczenie stopu.	56
Rys. 41.	Próba miseczkowa – próbki porównawcze: (a) przed rafinacją, b) po rafinacji.	57
Rys. 42.	Kokilarki stosowane do wytwarzania odlewów tłokowych: (a) w układzie pionowym bez wkładki Alfin, (b) w układzie pionowym z wkładką Alfin do średnicy 105 mm, (c) w układzie poziomym z wkładką Alfin, (d) w układzie pionowym z wkładką Alfin powyżej średnicy 110 mm.	59
Rys. 43.	Oznakowane formy odlewnicze przechowywane w magazynie form odlewniczych... ..	60
Rys. 44.	Formy odlewnicze w układzie: (a) pionowym; (b) poziomym.	61
Rys. 45.	Wkłady formy odlewniczej odpowiedzialne za kształtowanie wnętrza odlewu.....	62
Rys. 46.	Kolejne etapy procesu rozgrzewania formy odlewniczej dla odlewu poziomego: 1→8.	62
Rys. 47.	Kolejne etapy procesu rozgrzewania formy odlewniczej dla odlewu pionowego: 1→5.	63
Rys. 48.	Model procesu odlewania tłoków.....	66
Rys. 49.	Piece topielno-podtrzymujące w gnieździe odlewniczym.	72
Rys. 50.	Schemat pobierania próbek do badań.....	73
Rys. 51.	Stanowisko pomiarowe MetalHealth® Centre.....	75
Rys. 52.	Forma – K-test.....	75
Rys. 53.	Forma do próby lejności.	76
Rys. 54.	Forma – właściwości wytrzymałościowe.	76
Rys. 55.	Stanowisko 3VT basic z wagą MK 3000.	77
Rys. 56.	Mikrostruktura badanych stopów: (a) WT-1, (b) WT-2 w stanie nietrawionym, LM....	79
Rys. 57.	Mikrostruktura badanych stopów: (a) WT-1, (b) WT-2 w stanie nietrawionym, SEM/BSE.	79
Rys. 58.	Analiza rozkładu powierzchniowego pierwiastków w stopie WT-1, SEM/EDS.	80
Rys. 59.	Analiza rozkładu powierzchniowego pierwiastków w stopie WT-2, SEM/EDS.	80
Rys. 60.	Wyniki pomiaru twardości dla WT-1 i WT-2.....	81
Rys. 61.	Próbki do badań wytrzymałościowych: (a) widok odlewu, (b) wymiary próbki do badań.	82
Rys. 62.	Przykład wykresu uzyskanego w statycznej próbie rozciągania próbek wykonanych ze stopu WT-1.	82
Rys. 63.	Przykład wykresu uzyskanego w statycznej próbie rozciągania próbek wykonanych ze stopu WT-2.	83
Rys. 64.	Wyniki statycznej próby rozciągania: R_m – wytrzymałość na rozciąganie, $R_{p0,2}$ – umowna granica plastyczności, E – moduł sprężystości (moduł Younga), A_{gt} - odkształcenie równomierne próbki (odkształcenie do momentu osiągnięcia maksymalnej siły (ang. uniform elongation)).	83
Rys. 65.	Widok schematu próbki do wykonania K-test.	84
Rys. 66.	Przykład odlewu K-test dla próbki WT1: (a) widok z boku, (b) widok z góry.	84
Rys. 67.	Przełomy próbki WT-1 P w próbie K-test.	85

Rys. 68.	Przełomy próbki WT-1 R w próbie K-test.	85
Rys. 69.	Przełomy próbki WT-1 5h w próbie K-test.	85
Rys. 70.	Przełomy próbki WT-2 P w próbie K-test.	86
Rys. 71.	Przełomy próbki WT-2 R w próbie K-test.	86
Rys. 72.	Przełomy próbki WT-2 5h w próbie K-test.	86
Rys. 73.	Przekrój poprzeczny kanałów formy do badania lejności.	87
Rys. 74.	Próbki wykonane w badaniu lejności.....	87
Rys. 75.	Charakterystyka lejności badanych materiałów.....	89
Rys. 76.	Wskaźnik wypełnienia – LC.	89
Rys. 77.	Próbki DI w czasie krzepnięcia na stanowisku 3VT Basic.	90
Rys. 78.	Przekrój próbek DI – (A) próbka krzepnąca w atmosferze normalnej, (V) próbka krzepnąca w warunkach obniżonego ciśnienia (0.008 MPa, 80 mbar).....	91
Rys. 79.	Wyniki pomiaru indeksu gęstości (DI).....	91
Rys. 80.	Krzywa krzepnięcia stopu WT-1.	92
Rys. 81.	Krzywa krzepnięcia stopu WT-2.	93
Rys. 82.	Przedział temperaturowy krzepnięcia.	93
Rys. 83.	Czas krzepnięcia.....	94
Rys. 84.	Mikroporowatość skurczowa zidentyfikowana w komorze spalania tłoka: (a) tłok Ø110 mm z zaznaczonym miejscem występowania wad; (b) powiększenie fragmentu komory spalania - makrostruktura badanego obszaru; (c) wada powierzchniowa, pow. x1000; (d) obraz cyfrowy 3D, pow. x1000.....	95
Rys. 85.	Charakterystyczne przykłady wad odlewniczych zidentyfikowane w toku badań: (a) i (b) jamy skurczowe, (c) mikroporowatość skurczowa, (d) powiększenie jamy skurczowej z widoku (b), SEM.	96
Rys. 86.	(a) Mikrostruktura w obszarze zidentyfikowanych wad oraz wyniki punktowej analizy jakościowej w: (b) pkt. 1, (c) pkt. 2, (d) pkt. 3, (e) w obszarze 1, SEM/EDS.	97
Rys. 87.	(a) Mikrostruktura w obszarze zidentyfikowanych wad oraz wyniki mikroanalizy jakościowej w: (c) pkt. 1, (d) pkt. 2, (e) pkt. 3, (f) pkt. 4, (g) pkt. 5, (h) w obszarze 1, SEM/EDS.	98
Rys. 88.	Wyniki DI, druga próba.	99
Rys. 89.	Widok przełącznika gazów.	100

Spis tabel

Tab. 1.	Porównanie prognoz trzech raportów dotyczących rynku tłoków.....	14
Tab. 2.	Udział procentowy pierwiastków chemicznych w skorupie ziemskiej	15
Tab. 3.	Typowe stopy aluminium stosowane w motoryzacji ich zastosowania	22
Tab. 4.	Zakresy zawartości podstawowych dodatków stopowych oraz zanieczyszczeń w odlewniczych siluminach tłokowych	25
Tab. 5.	Skład chemiczny stopu EN AB-ALSi12CuNiMg (EN AB-48000)	41
Tab. 6.	Skład chemiczny badanych stopów według atestów	72
Tab. 7.	Skład chemiczny stopów WT-1, WT-2 oznaczony z pobranych próbek odlewów	78
Tab. 8.	Przykład obliczeń niepewności rozszerzonej dla próbki WT-1 P.	88
Tab. 9.	Wartości uśrednione pomiarów z prób lejności.	88
Tab. 10.	Wyniki pomiaru gęstości oraz indeksu gęstości (DI).....	91
Tab. 11.	Charakterystyka przebiegu krzepnięcia.....	93
Tab. 12.	Wyniki DI, druga próba	99
Tab. 13.	Wyniki prób doboru wskaźnika DI	101
Tab. 14.	Wyniki indeksu gęstości (DI) dla procedury przed zmianami	101
Tab. 15.	Wyniki indeksu gęstości (DI) po zmianie procedury	102
Tab. 16.	Porównanie procesów usuwania elementów technologicznych	102
Tab. 17.	Poziom barakowości zleceń produkcyjnych	103

Bibliografia

- [1] SAE International: *SAE J1715_202209 – Hybrid Electric Vehicle (HEV) and Electric Vehicle (EV) Terminology*. DOI: 10.4271/J1715_202209.
- [2] California Air Resources Board (CARB): *Advanced Clean Cars II – Title 13 CCR §1962.4*. Dostęp online: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2022/accii/accii1962.4.pdf>, data dostępu: 2025.07.22.
- [3] NESCAUM, ACC II: *Zero-Emission Vehicle Regulation Frequently Asked Questions*, 2024. Dostęp online: https://www.nescaum.org/documents/ACC-II-ZEV-FAQs_08-29-24.pdf, data dostępu: 2025.07.22.
- [4] International Energy Agency (IEA): *Global EV Outlook 2025*. Dostęp online: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVO Outlook2025.pdf>, data dostępu: 2025.08.20.
- [5] Ritchie H.: *Tracking global data on electric vehicles*, Our World in Data, opublikowany Luty 2024, uzupełniony Maj 2025. Dostęp online: <https://ourworldindata.org/electric-car-sales>, data dostępu: 2025.07.22.
- [6] Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA): *Navigating Electric Vehicles – A Global Overview Trends, Technologies, and a Closer Look at Israel*, 2024. Dostęp online: <https://www.oica.net/wp-content/uploads/Navigating-Electric-Vehicles-A-Global-Overview.pdf>, data dostępu: 2025.07.22.
- [7] MarketsandMarkets™: *Automotive Piston Market – Global Forecast to 2035*. Dostęp online: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotive-piston-market-83425882.html>, data dostępu: 2025.07.22.
- [8] The Business Research Company: *Aluminium Piston Global Market Report 2025–2029*, Dostęp online: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/aluminium-piston-global-market-report>, data dostępu: 2025.07.22.
- [9] IMARC Group: *Automotive Piston Market Report 2024–2033*. Dostępne online: <https://www.imarcgroup.com/automotive-piston-market>, data dostępu: 2025.07.22.
- [10] Street A., Alexander W.: *Metals In The Service Of Man: 10th Edition*, Penguin UK, 1994, ISBN-13: 978-0140148893.
- [11] ASM Handbook Committee: *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 1990, ISBN: 978-1-62708-162-7, DOI: 10.31399/asm.hb.v02.9781627081627.
- [12] US Geological Survey, U.S. Department of the Interior: *Mineral Commodity Summaries 2025*, Version 1.2, s. 32-33, 42-43, Marzec 2025.
- [13] Skinner B. J., Porter S. C., Park J.: *The Dynamic Earth: An Introduction to Physical Geology (5th ed.)*, Wiley, 2004.
- [14] Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwa naukowo techniczne. Warszawa, 2002, ISBN: 8320427932.
- [15] Oczóś K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*, WN PWN, 2012, ISBN 978-83-01-16875-9.
- [16] Andersona K., Weritz J., Kaufmana J.G.: *ASM Handbook, Volume 2A, Aluminum Science and Technology*, ASM International, 2018, ISBN: 978-1-62708-207-5, DOI: 10.31399/asm.hb.v02a.9781627082075.
- [17] Andersona K., Weritz J., Kaufmana J.G.: *ASM Handbook, Volume 2B: Properties and Selection of Aluminum Alloys*, ASM International, 2019, ISBN: 978-1-62708-210-5, DOI: 10.31399/asm.hb.v02b.9781627082105.

-
- [18] Budd G.: Resources and Production of Aluminium, TALAT Lecture 1101, European Aluminium Association, 1999, <https://aluminium-guide.com/wp-content/uploads/2019/04/1101.pdf>.
- [19] International Aluminium Institute (IAI): Global Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050, London, 2021. Dostęp online: <https://livingbusiness.com/wp-content/uploads/2022/02/Aluminium-greenhouse-gas-pathways.pdf>, data dostępu: 2025.07.23.
- [20] European Aluminium: Net-Zero by 2050 – Science-based Decarbonization Pathways for the European Aluminium Industry, Brussels, 2023. Dostęp online: https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2023/11/23-11-14-Net-Zero-by-2050-Science-based-Decarbonisation-Pathways-for-the-European-Aluminium-Industry_FULL-REPORT.pdf, data dostępu: 2025.07.24.
- [21] The Aluminum Association: North American Aluminium Industry Decarbonization Roadmap, Washington D.C., 2024. Dostęp online: https://www.aluminum.org/sites/default/files/2024-05/North-American-Decarbonization-Roadmap-Report_May2024.pdf, data dostępu: 2025.07.24.
- [22] Krall P., Weißensteiner I., Pogatscher S.: Recycling aluminum alloys for the automotive industry: Breaking the source-sink paradigm, Resources, Conservation & Recycling, 2024, 202, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107370.
- [23] Kotadia H.R. et al.: Aluminium recycling: A critical review of iron-bearing intermetallics, Materials Today Sustainability, 2025, 30, 101119, DOI: 10.1016/j.mtsust.2025.101119.
- [24] International Energy Agency (IEA): Aluminium – Tracking Report, Paris, 2023. Dostęp online: <https://www.iea.org/>, data dostępu: 2025.07.22.
- [25] CM Group: An Assessment of Global Megatrends and Regional and Market Sector Growth Outlook for Aluminium Demand, raport dla International Aluminium Institute, luty 2020, Dostęp online: https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2024/03/cm_2050_outlook_for_al_demand_20200528_4wycD18.pdf, data dostępu: 2025.07.22.
- [26] Lewandowski J.: Metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne (WNT). Warszawa, 1996, ISBN: 83-204-2082-7.
- [27] Kaufman J.G.: Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures, ASM International, 1999, ISBN 978-0871706324.
- [28] Fracchia E., Gobber F.S., Rosso M.: Effect of Alloying Elements on the Sr Modification of Al-Si Cast Alloys, Metals, 2021, 11 (2), 342, DOI: 10.3390/met11020342.
- [29] Polmear I., StJohn D., Nie J.F., Qian M.: Light Alloys Metallurgy of the Light Metals, 5th Edition, Academic Press Monash University, 2017, ISBN: 9780080994307.
- [30] Wang G, Guan Z, Wang J, Ren M, Yan R, Song J.: Effect of Cooling Rate and Modification by Strontium on the Thermal Conductivity of Al-8Si Alloy, Metals, 2021, 11(9), 1334, DOI: 10.3390/met11091334.
- [31] Tupaj M., Orłowicz A.W., Mróz M., Trytek A., Markowska O.: The Effect of Cooling Rate on Properties of Intermetallic Phase in a Complex Al-Si Alloy. Archives of Foundry Engineering, 2016, 16, 125–128, DOI: 10.1515/afe-2016-0063.
- [32] Ducker Carlisle: 2023 North American Light Vehicle Aluminum Content and Outlook Study (Public Summary), The Aluminum Association, 2023. Dostęp online: <https://drivealuminum.org/wp-content/uploads/2023/05/Ducker-ATG-2023-Summary-Report-April-2023.pdf>, data dostępu: 2025.07.26.
- [33] European Aluminium / Ducker: Aluminum Content in Passenger Vehicles (Europe) – Public Summary, 2023. Dostęp online: https://www.duckercarlisle.com/wp-content/uploads/2023/05/2023_04_Aluminum-Content-in-Cars_Ducker-study_EA-Public-Summary_Final.pdf, data dostępu: 2025.07.26.

-
- [34] Davis J.R.: Alloying: Understanding the Basics, ASM International, 2001, ISBN: 978-0-87170-744-4.
- [35] Pistons and engine testing, MAHLE GmbH, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Stuttgart 2012, ISBN 978-3-8348-1590-3.
- [36] Pietrowski S.: Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów tłokowych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1999.
- [37] Pietrowski S.: Siluminy, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2001.
- [38] Wang S.C., Starink M.J., Gao N.: Precipitation hardening in Al–Cu–Mg alloys revisited, *Scripta Materialia*, 2006, 54, 287–291, DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.09.010.
- [39] Pietrowski S.: Siluminy tłokowe, Monografia PAN nr 29, Seria: Krzepnięcie Metali i Stopów. Katowice, Bielsko-Biała, Opole, 1997.
- [40] Czekał E.: Beznikłowe siluminy tłokowe o podwyższonej stabilności wymiarowej, Kraków: Instytut Odlewnictwa, 2011.
- [41] Poloczek Ł., Kielbus A.: Wpływ czynników technologicznych na jakość odlewów ze stopów aluminium, *Zarządzanie przedsiębiorstwem*, 2016, 2, 14-19.
- [42] Eskin D.: *Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys*, 2008, ISBN: 978-1-4200-6281-6. Dostęp online: <https://www.perlego.com/book/1696477>.
- [43] Campbell J.: Perspective Chapter: A Personal Overview of Casting Processes, *Casting Processes and Modelling of Metallic Materials*. IntechOpen; 2021, DOI: 10.5772/intechopen.93739.
- [44] Saternus M.: Zanieczyszczenia ciekłego aluminium - metody ich oceny i usuwania, *Obróbka Plastyczna Metali vol. XXVI nr 2 (2015)*, 115-132.
- [45] Campbell J.: *Complete Casting Handbook 2nd ed*, Butterworth-Heinemann, 2015, ISBN: 978-0-444-63509-9. Dostęp online: <https://www.perlego.com/book/1830066>.
- [46] Campbell J.: *The Mechanisms of Metallurgical Failure*, Butterworth-Heinemann, 2020, ISBN: 978-0-12-822411-3. Dostęp online: <https://www.perlego.com/book/1814311>.
- [47] Tiryakioğlu, M.: The Effect of Hydrogen on Pore Formation in Aluminum Alloy Castings: Myth vs Reality, *Metals*, 2020, 10(3), 368, DOI: 10.3390/met10030368.
- [48] Jang H.S., Kang H.J., Park J.Y., Choi Y.S., Shin S.: Effects of Casting Conditions for Reduced Pressure Test on Melt Quality of Al-Si Alloy, *Metals* 2020, 10(11), 1422, DOI: 10.3390/met10111422.
- [49] Khalajzadeh V., Beckermann C Simulation of Shrinkage Porosity Formation During Alloy Solidification, *Metallurgical and Materials Transactions A* 2020, 10(2239-2254), DOI: 10.1007/s11661-020-05699-z.
- [50] Kannan P., Balasubramanian K.: Analysis of Crown Shrinkage in Gravity Die Cast Aluminium Alloy LM 13 Piston, *Indian Journal of Science and Technology*, 2025, 8 (35), DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i35/80092.
- [51] Anderson K., Weritz J., Kaufman J. G.: *Aluminum Science and Technology*, ASM International, 2018, ISBN:978-1-62708-207-5. DOI: 10.31399/asm.hb.v02a.9781627082075,
- [52] Becker W. T., Shipley R. J.: *Failures Related to Casting, Failure Analysis and Prevention*, Vol 11, ASM International, 2002, DOI: 10.31399/asm.hb.v11.a0003508.
- [53] Jolly M., Katgerman L.: Modelling of defects in aluminium cast products, *Progress in Materials Science*, 2022, 123, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100824.
- [54] Wagner R., Seleznev M., Fischer H., et al.: Impact of melt conditioning and filtration on iron-rich β phase in AlSi9Cu3 and its fatigue life studied by μ CT, *Materials Characterization*, 2021, 174, DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111039.
- [55] *Product Specification Standards for Die Castings 9th Edition*, NADCA, 2015. Dostęp online: <https://www.kineticdiecasting.com/NADCA-Product-Standards-for-Die-Casting.pdf>, data dostępu: 2025.07.29.

-
- [56] Standards for High Integrity and Structural Die Casting Process 7th edition, NADCA, 2018. Dostęp online: [https://cn.sinoforming.com/uploads/file1/20210421/NADCA%20Standards%20for%20High%20Integrity%20and%20Structural%20Die%20Casting%20Proc](https://cn.sinoforming.com/uploads/file1/20210421/NADCA%20Standards%20for%20High%20Integrity%20and%20Structural%20Die%20Casting%20Process.pdf) ess.pdf, dostęp: 2025.07.29.
 - [57] Bonner S. J.: A microstructural and kinetic study of molten aluminium oxidation in relation to dross formation, Phd, The University of Queensland, 2015, DOI: 10.14264/UQL.2015.897.
 - [58] Campbell J.: A Personal View of Microstructure and Properties of Al Alloys, *Materials*, 2021, 14, 1297, DOI: 10.3390/ma14051297.
 - [59] Huang Ch., Liu Z., Li J.: Evolution Behavior of the Surface Oxide Film of Al Alloy Scraps in the Melt, *Metals*, 2023, 13, 510, DOI: 10.3390/met13030510.
 - [60] Campbell J., Tiryakioglu M.: Fatigue failure in engineered components and how it can be eliminated: Case studies on the influence of Bifilms, *Metals*, 2022, 12, 1320, DOI: 10.3390/met12081320.
 - [61] Scampone G., Pirovano R., Mascetti S., Timelli G.: Experimental and numerical investigations of oxide-related defects, in Al alloy gravity die castings, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117, 1765-1780, DOI: 10.1007/s00170-021-07680-5.
 - [62] Gyarmatia G., Fegyvernekia G., Mende T., Tokar M.: Characterization of the double oxide film content of liquid aluminum alloys by computed tomography, *Materials Characterization*, 2019, 157, DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109925.
 - [63] Fox S., Campbell J.: Visualisation of oxide film defects during solidification of aluminium alloys, *Scripta Materialia*, 2000, 43, 10, 881-886, DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00506-6.
 - [64] El-Sayed M. A., Khamis Essa K., Hassanin H.: Influence of bifilm defects generated during mould filling on the tensile properties of Al–Si–Mg cast alloys, *Metals*, 2022, 12 (1), 160, DOI: 10.3390/met12010160.
 - [65] El-Sayed M.A.: An investigation of the behaviour of double oxide film defects in aluminium - magnesium cast alloys, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n11a13>.
 - [66] Dispınar D., Kahraman C., Campbell J.: Correlation Between Bifilm Index and Toughness of Aluminum Alloys, *Shape Casting*, in: Tiryakioglu M., Campbell J., Byczynski G. (eds) *Shape Casting: 5th International Symposium 2014*, Springer, Cham., DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48130-2_21.
 - [67] Erzi E., Gürsoy Ö., Yüksel C., Colak M., Dispınar D.: Determination of Acceptable Quality Limit for Casting of A356 Aluminium Alloy: Supplier's Quality Index (SQI), *Metals*, 2019, 9 (9), DOI:10.3390/met9090957.
 - [68] Galarraga H., Cortazar M.G., Arregi E., Artola A., Oncala J.L., Merchan M.: Gas Blowing Ultrasonic Aluminium Degassing Assessment with the Reduced Pressure Test (RPT) Method, *Archives of Foundry Engineering*, 2020, 2, 111-117, DOI: 10.24425/afe.2020.131312
 - [69] Dispınar D., Campbell J.: Reduced Pressure Test (RPT) for Bifilm Assessment, *Shape Casting: 5th International Symposium, TSM 2014*, DOI: 10.1007/978-3-319-48130-2_30.
 - [70] Dolata A.J., Wieczorek J., Dyzia M., Starczewski M.: Assessment of Tribological Properties of the Aluminum Matrix Composites Intended for the Cooperation with Piston Rings in Combustion Engines, *Materials*, 2022, 15, 3806, DOI: 10.3390/ma15113806.
 - [71] Piątkowski J., Kamiński P: Risk Assessment of Defect Occurrences in Engine Piston Castings by FMEA Method, *Archives of Foundry Engineering*, 2017, 17 (3), 107-110, DOI: 10.1515/afe-2017-0100.
 - [72] Starczewski M., Dolata A. J., Dyzia M.: Evaluation of the technological properties of the Al-Si eutectic alloy based on density index test, *Archives of Foundry Engineering*, 2025, 2, 13–20, DOI:10.24425/afe.2025.155349.