

PLA polymer binder in casting core production - influence on final casting dimensions

Spoivo polimerowe PLA w wytwarzaniu rdzeni - wpływ na końcowe wymiary odlewu

Artur Soroczyński ¹ , Krzysztof Rechowicz ² 

¹ Warsaw University of Technology, Poland; artur.soroczynski@pw.edu.pl

² Virginia Digital Maritime Center, Old Dominion University, Suffolk, VA, 23435 USA; Krzysztof Rechowicz; krechowi@odu.edu; (K.R.)

* Correspondence: artur.soroczynski@pw.edu.pl; (A.S.)

Received: 15.11.2025; Accepted: 13.12.2025; Published: 24.12.2025

Abstract: The foundry industry is seeking an ecological alternative to synthetic molding resins. This study evaluates the technological properties of core sands bonded with biodegradable polylactide (PLA). Cores prepared on a 2% quartz sand matrix were subjected to casting processes using two alloys with extremely different pouring temperatures: gray cast iron (approx. 1200 °C) and AK11 silumin (approx. 710 °C). The research methodology included macroscopic assessment, dimensional analysis using 3D scanning (GOM Inspect), and qualitative knock-out assessment supported by numerical temperature field simulation. The results showed that the high crystallization temperature of cast iron leads to complete thermal degradation of the binder, ensuring excellent knock-out properties.

Streszczenie: Przemysł odlewniczy poszukuje ekologicznej alternatywy dla syntetycznych żywic formierskich. Niniejsza praca ocenia właściwości technologiczne mas rdzeniowych wiązanych biodegradowalnym polilaktydem (PLA). Rdzenie przygotowane na osnowie piasku kwarcowego z 2% udziałem spoiwa poddano procesom odlewniczym z wykorzystaniem dwóch stopów o skrajnie różnych temperaturach zalewania: żeliwa szarego (ok. 1200 °C) oraz siluminu AK11 (ok. 710 °C). Metodyka badań obejmowała ocenę makroskopową, analizę wymiarową z wykorzystaniem skanowania 3D (GOM Inspect) oraz jakościową ocenę wybijałości, wspartą numeryczną symulacją pola temperatury. Wyniki wykazały, że wysoka temperatura krystalizacji żeliwa prowadzi do całkowitej degradacji termicznej spoiwa, zapewniając doskonałą wybijałość.

Keywords: polylactide; foundry; sand cast molds; dimension accuracy of casting

Słowa kluczowe: polilaktyd (PLA); odlewanie; formach piaskowe; wybijałość rdzeni; dokładność wymiarowa

Wprowadzenie

Współczesny przemysł odlewniczy charakteryzuje się stale rosnącymi wymaganiami jakościowymi stawianymi procesom wytwórczym. Kluczowe kryteria obejmują nie tylko niską chropowatość powierzchni i wysoką precyzję wymiarowo-kształtową, ale także ścisłą powtarzalność właściwości fizykochemicznych oraz minimalizację wad strukturalnych. W tym kontekście krytycznym aspektem procesu staje się zachowanie rdzenia odlewniczego podczas zalewania formy. Element ten, odpowiedzialny za odwzorowanie wewnętrznej geometrii odlewu, poddawany jest ekstremalnym obciążeniom termicznym i mechanicznym, często przewyższającym te działające na samą formę. Interakcja termiczna z ciekłym metalem inicjuje szereg zjawisk, takich jak rozszerzalność cieplna, mięknięcie termoplastyczne oraz destrukcja termiczna materiału wiążącego. Suma tych oddziaływań determinuje stabilność geometryczną układu, bezpośrednio rzutując na jakość końcowego produktu [1].

Aby prawidłowo spełnić swoją funkcję w tak agresywnym środowisku, rdzeń musi wykazywać się specyficznym zespołem cech. Kluczowa jest wysoka wytrzymałość mechaniczna i ogniotrwałość, zapewniające stabilność kształtu [1,2]. Równie istotne są właściwości technologiczne, takie jak wysoka przepuszczalność i niska gazotwórczość (zapobiegające wadom gazowym) oraz podatność na skurcz krzepnącego metalu [3,4]. Cykl produkcyjny zamyka wymóg łatwej wybijałości, wynikający z degradacji

spoiwa po procesie [5], przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej precyzji wymiarowej i odporności na wilgoć na etapie magazynowania [6–8].

Masa rdzeniowa stanowi układ heterogeniczny, w którym osnowa ziarnista (najczęściej piasek kwarcowy) jest stabilizowana przez czynnik wiążący. To właśnie właściwości fizykochemiczne spoiwa w głównej mierze determinują końcowe parametry technologiczne rdzenia [8]. Współczesne uwarunkowania ekologiczne wymuszają poszukiwanie materiałów wiążących o zminimalizowanym wpływie na środowisko naturalne.

W tym kontekście polilaktyd (PLA) jawi się jako obiecująca alternatywa biodegradowalna [9], jednakże jego wpływ na stabilność wymiarową i precyzję odwzorowania kształtu rdzenia wymaga dogłębnej weryfikacji. Mimo obszernej literatury dotyczącej ogólnych aplikacji przemysłowych PLA oraz metod modyfikacji jego właściwości mechanicznych [10–13], implementacja [14,15] tego polimeru w technologiach odlewniczych pozostaje ograniczona. Potencjał aplikacyjny PLA jako spoiwa wynika z jego korzystnych właściwości reologicznych oraz zdolności adhezyjnych w stosunku do ziaren osnowy. Badania wskazują, że masy rdzeniowe bazujące na kompozycie piasek-PLA wykazują właściwości technologiczne porównywalne do tradycyjnych mas wiązanych żywicami syntetycznymi [16–18].

Materiały i procedura badawcza

Materiały wsadowe

Jako osnowę mas rdzeniowych wykorzystano piasek kwarcowy o średnim uziarnieniu, dostarczony przez Przedsiębiorstwo Robót Górniczych i Podwodnych RETRANS. Jako spoiwo zastosowano laktyd (prod. Sigma-Aldrich). Formy odlewnicze wykonano z klasycznej, syntetycznej masy formierskiej z lepiszczem bentonitowym (udział ok. 10% wag.) o wilgotności roboczej na poziomie ok. 3%.

Przygotowanie rdzeni i form

Kompozycja masy rdzeniowej składała się w 98% wag. z osnowy kwarcowej oraz w 2% wag. ze spoiwa polilaktydowego (PLA). Spoiwo wprowadzono do osnowy poprzez proces fizykochemicznego osadzania PLA na powierzchni ziaren piasku, zgodnie z metodyką opisaną w literaturze [16,17]. Proces sieciowania (utwardzania) kształtek prowadzono w piecu oporowym bez atmosfery ochronnej. Próbkę wygrzewano w temperaturze 230 °C przez 20 minut. Zastosowany układ regulacji temperatury zapewniał stabilność procesu z dokładnością ± 3 °C. Po obróbce termicznej rdzenie studzono w warunkach otoczenia przez 30 minut, po czym dokonano ich demontażu z rdzennic. Przygotowano cztery zestawy form o tożsamy parametrach technologicznych masy. Modele odlewnicze wytworzono w technologii przyrostowej FDM (Fused Deposition Modeling) przy użyciu drukarki 3D MakerBot Replicator 2X.

Plan eksperymentu i przebieg procesu odlewania

Zaprojektowano odlew próbny o geometrii przedstawionej na **Fig 1**. Wymiary modelu dobrano w sposób zapewniający uzyskanie współczynnika akumulacji ciepła przez rdzeń na poziomie 0,5, co miało na celu symulację warunków powolnego przegrzewania się rdzenia.

Do badań wytypowano dwa tworzywa odlewnicze o zróżnicowanych temperaturach krzepnięcia:

- żeliwo szare (temperatura zalewania $T_{zal} \approx 1200$ °C),
- silumin AK11 (temperatura zalewania $T_{zal} \approx 710$ °C).

Dla każdego ze stopów przygotowano po dwie formy, wprowadzając zmienną w postaci stanu powierzchni rdzenia:

- rdzeń referencyjny: bez powłoki ochronnej.
- rdzeń badawczy: z powłoką grafitową (preparat w aerozolu dedykowany do zastosowań odlewniczych).

Aplikację powłoki ograniczono do powierzchni walcowej rdzenia, stanowiącej strefę bezpośredniego kontaktu z ciekłym metalem. Po złożeniu pakietów form i przetransportowaniu ich na stanowisko odlewnicze, dokonano zalania wnek ciekłym metalem. Temperaturę procesu kontrolowano w czasie

rzeczywistym przy użyciu termopary zanurzeniowej. Po całkowitym zakrzepnięciu i ostygnięciu odlewów przystąpiono do wybicia. Wstępnej oceny makroskopowej oraz analizy powierzchni odlewów dokonano bezpośrednio po demontażu górnej skrzynki formierskiej.

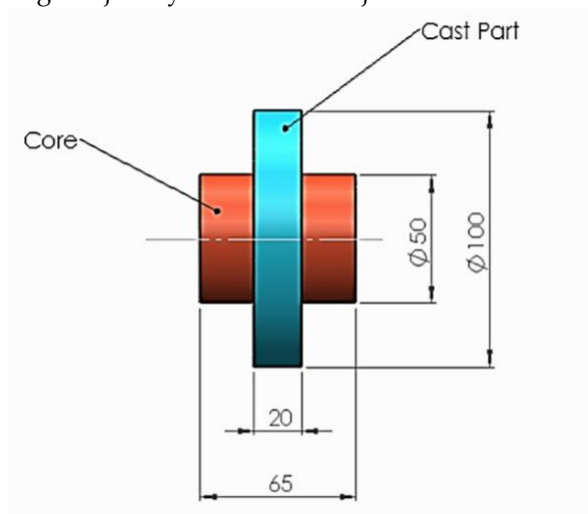


Fig. 1. Casting and core geometry

Fig. 1. Geometria odlewu i rdzenia

Metodyka pomiarów geometrycznych

Ze względu na specyfikę powierzchni surowych odlewów, charakteryzujących się znaczną chropowatością, odstąpiono od konwencjonalnych metod pomiarowych (suwmiarka, średnicówka), które obarczone byłyby dużym błędem pomiarowym. Do weryfikacji wymiarowej zastosowano techniki inżynierii odwrotnej oraz metrologii optycznej [19].

Proces pomiarowy przebiegał dwuetapowo. Geometryczny kształt odlewów został odwzorowany przy użyciu skanera 3D, w wyniku czego uzyskano chmurę punktów przekonwertowaną do formatu STL. Na podstawie zaimportowanych modeli cyfrowych przeprowadzono wirtualną inspekcję w oprogramowaniu GOM Inspect. W celu wyznaczenia rzeczywistej średnicy otworu zastosowano algorytm aproksymacji, wpisując w geometrię wewnętrzną odlewu walce najlepiej dopasowane (metoda best-fit). Pozwoliło to na uśrednienie nierówności powierzchni i uzyskanie wiarygodnych wyników pomiarowych (Fig. 2).

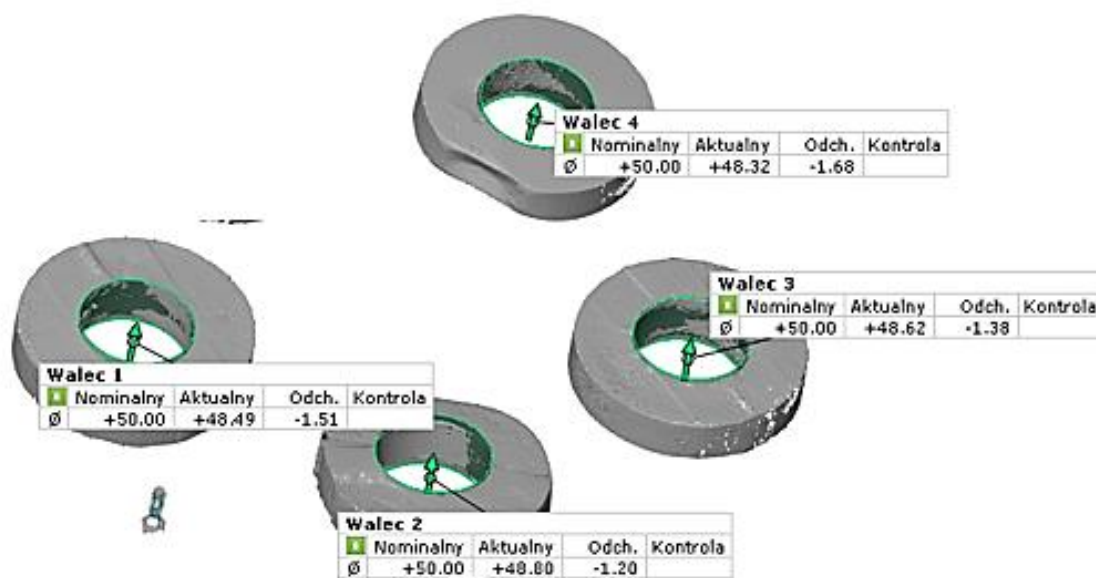


Fig. 2. Hole measurements using the GOM Inspect tool

Fig. 2. Pomiary otworów z wykorzystaniem narzędzia GOM Inspect

Wyniki badań

Analiza makroskopowa i ocena jakości powierzchni

Wstępna ocena jakości wykonanych odlewów opierała się na obserwacjach makroskopowych, ze szczególnym uwzględnieniem wierności odwzorowania geometrii rdzenia (otwór walcowy $\phi 50$). W przypadku obu badanych materiałów – żeliwa szarego oraz siluminu – stwierdzono poprawne odwzorowanie kształtu geometrycznego otworu. Analiza porównawcza wykazała zróżnicowany wpływ powłoki ochronnej na topografię powierzchni odlewu w zależności od zastosowanego stopu:

- W odlewach żeliwnych: Nie stwierdzono istotnego wpływu obecności powłoki grafitowej na jakość powierzchni wewnętrznej odlewu.
- W odlewach aluminiowych: Zaobserwowano wyraźną różnicę w strukturze powierzchni. Zastosowanie powłoki grafitowej skutkowało znacznym zmniejszeniem chropowatości powierzchni. W przypadku rdzeni niepokrytych (referencyjnych), powierzchnia wewnętrzna odlewu charakteryzowała się nieregularnością, świadczącą o wystąpieniu wad powierzchniowych typu penetracja (mechaniczne wnikiwanie ciekłego metalu w pory masy rdzeniowej). Powierzchnia odwzorowana przez rdzeń z powłoką grafitową wykazywała wyższą gładkość i regularność kształtu.

Ocena wybijałości mas rdzeniowych

Kluczowym parametrem technologicznym poddanym ocenie była wybijałość, zdefiniowana jako zdolność masy do dekohezji pod wpływem czynnika termicznego. Ocenę przeprowadzono metodą jakościową po całkowitym ostygnięciu odlewów. Stwierdzono fundamentalne różnice w zachowaniu spoiwa PLA w zależności od temperatury zalewania stopu:

- Dla żeliwa szarego ($T_{\text{zal}} \approx 1200$ °C): Wysoka entalpia krzepnięcia oraz temperatura procesu doprowadziły do całkowitej degradacji termicznej mostków spoiwa PLA. Zaobserwowano całkowity rozpad masy rdzeniowej – piasek odzyskał sypkość, nie wykazując obecności aglomeratów (zestalonych brył masy). Stan ten świadczy o doskonałej wybijałości, niezależnie od obecności powłoki ochronnej.
- Dla siluminu AK11 ($T_{\text{zal}} \approx 710$ °C): Ze względu na niższą temperaturę zalewania, proces degradacji spoiwa zachodził z mniejszą intensywnością. Rozpad masy (dekohezja) nastąpił jedynie w strefie bezpośredniego kontaktu z metalem (warstwa przypowierzchniowa). Rdzeń zachował swoją integralność w objętości, co wymusiło konieczność zastosowania energii mechanicznej w celu usunięcia go z wnętrza odlewu. Mimo częściowej degradacji, geometria wewnętrzna została zachowana.

Analiza dokładności wymiarowej

Badania koncentrowały się na analizie wymiaru charakterystycznego odwzorowanego przez rdzeń – średnicy $\phi 50$ mm. Otrzymane wyniki odniesiono do normy PN-ISO 8062:1997, regulującej system tolerancji wymiarów i naddatków na obróbkę dla odlewów. Dla technologii formowania w masach piaskowych przyjęto klasę tolerancji CT12 [20]. Zgodnie z normą, dla wymiaru nominalnego z zakresu obejmującego 50 mm, całkowita tolerancja wynosi 5,6 mm. Przyjmując symetryczny rozkład pola tolerancji, dopuszczalne wartości graniczne wynoszą: wymiar maksymalny: $\phi 52,8$ mm minimalny $\phi 47,2$ mm. Wyniki pomiarów zestawiono w Table I. Analiza danych wskazuje, że wszystkie uzyskane wymiary mieszczą się w dopuszczalnym polu tolerancji CT12. Należy odnotować, iż wszystkie zarejestrowane odchyłki przyjmują wartości ujemne. Jest to zjawisko uzasadnione występowaniem skurczu odlewniczego, który dla badanych materiałów wynosi odpowiednio:

- Silumin AK11 (stop eutektyczny): skurcz liniowy ok. 1,1% – 1,2%,
- Żeliwo szare: skurcz liniowy ok. 0,8% – 1,2%.

Ujemne odchyłki wymiarowe otworów (zmniejszenie średnicy) są naturalną konsekwencją swobodnego skurczu krzepnącego metalu na rdzeniu, przy czym obserwowana częściowa podatność rdzeni (szczególnie w przypadku żeliwa) nie zablokowała całkowicie tego procesu.

Table I Wymiary otworów odlewu. Z indeksem 1 bez pokrycia, z indeksem 2 z pokryciem

Żeliwo 1	Żeliwo 2	Aluminium 1	Aluminium 2
$\phi 48,90$	$\phi 48,49$	$\phi 48,32$	$\phi 48,80$

W celu wyjaśnienia fundamentalnych różnic w procesie wybijałości rdzeni z odlewów żeliwnych i aluminium, przeprowadzono analizę porównawczą rozkładu temperatur wewnątrz rdzenia na etapie krzepnięcia **Rys. 3**. Zestawienie wyników symulacji z charakterystyką fizykochemiczną spoiwa PLA (temperatura zeszklenia $T_g \approx 60$ °C, początek degradacji $T_{onset} \approx 200$ °C, degradacja właściwa 300-380 °C) pozwala na zdefiniowanie stref oddziaływania termicznego.

Strefa przypowierzchniowa (powierzchnia styku metal-rdzeń) występuje w obszarze bezpośredniego styku z ciekłym metalem (Callout 6), dla obu materiałów odnotowano temperatury przekraczające próg degradacji termicznej polilaktydu:

- żeliwo szare: 387,33 °C (maksimum szybkości rozkładu),
- silumin AK11: 330,81 °C (zakres degradacji).

W obu przypadkach w cienkiej warstwie brzegowej następuje gwałtowna piroliza wiązań estrowych. Tłumaczy to dobrą jakość powierzchni wewnętrznej i brak przywar zarówno w odlawach żeliwnych, jak i aluminium – spoiwo ulega tam całkowitemu zgazowaniu. W strefie pośredniej następuje propagacja ciepła w głąb rdzenia, co stanowi kluczową różnicę, determinującą wybijałość. Ujawnia się ona w głębszych warstwach rdzenia (Callout 3), co wynika z drastycznie różnej entalpii układu (temperatura zalewania 1200 °C dla żeliwa vs 710 °C dla aluminium):

- dla żeliwa (**Rys. 3a**): Temperatura w punkcie pośrednim (Callout 3) osiąga 254,73 °C. Wartość ta przekracza temperaturę T_{onset} (200 °C). Oznacza to, że front degradacji termicznej spoiwa przesunął się głęboko w strukturę rdzenia. Wiązania polimerowe ulegają zerwaniu nie tylko na powierzchni, ale w znacznej objętości masy,
- dla aluminium (**Rys. 3b**): W analogicznym punkcie (Callout 3) temperatura wynosi zaledwie 125,25 °C. Jest to wartość powyżej temperatury zeszklenia, ale znacznie poniżej temperatury degradacji chemicznej. W tej strefie spoiwo PLA jedynie mięknie (plastyfikuje się), lecz nie ulega dekohezji. Po ostygnięciu materiał ten ponownie twardnieje, zachowując mechaniczną spójność rdzenia.

Analiza temperatury w osi rdzenia (Callout 4) potwierdza różną dynamikę nagrzewania:

- rdzeń w żeliwie osiąga temperaturę 77,46 °C. Cała objętość rdzenia przekroczyła temperaturę zeszklenia ($T_g \approx 60$ °C), co oznacza, że cały rdzeń przeszedł w stan wysokoelastyczny, a dostarczona energia cieplna sprzyja dalszej degradacji w czasie stygnięcia,
- środek rdzenia odlewu aluminium pozostaje chłodny (21,69 °C), co świadczy o tym, że rdzeń zachował w swojej osi strukturę "szklistą" i nienaruszoną.

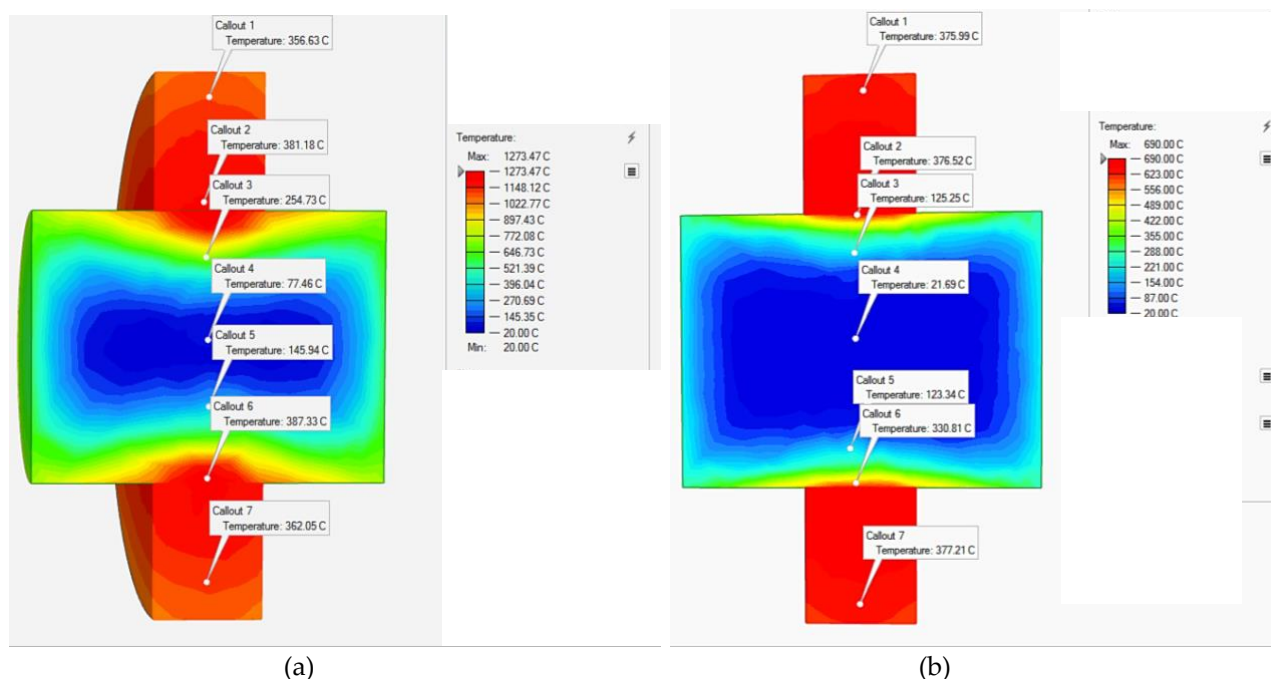


Fig. 3. Simulation results of temperature distribution during solidification of castings with a PLA binder core: a) cast iron, b) aluminum

Fig. 3. Wyniki symulacji rozkładu temperatury podczas krzepnięcia odlewów z rdzeniem ze spoiwem PLA a) żeliwa, b) aluminium

Wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne pozwoliły na kompleksową ocenę przydatności mas rdzeniowych ze spoiwem polilaktydowym (PLA) w technologii odlewania stopów żelaza i aluminium. Analiza wpływu temperatury zalewania na degradację spoiwa, jakość powierzchni oraz dokładność wymiarową, pozwala na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- wybijalność rdzeni ze spoiwem PLA jest ściśle skorelowana z entalpią krzepnięcia metalu. W przypadku żeliwa szarego ($T_{zal} \approx 1200$ °C), wysoka temperatura procesu inicjuje całkowitą degradację termiczną osnowy polimerowej (pirolizę) w całej objętości rdzenia, co skutkuje doskonałą wybijalnością (samoistnym osypywaniem się piasku). W przypadku stopów aluminium ($T_{zal} \approx 710$ °C), ilość dostarczonego ciepła jest niewystarczająca do przekroczenia temperatury degradacji PLA (>200 °C) w osi rdzenia. Prowadzi to do zachowania integralności mechanicznej środkowej strefy rdzenia, co utrudnia proces wybijania i wymaga zastosowania metod mechanicznych,
- symulacje komputerowe potwierdziły eksperymentalny mechanizm wybijalności. Analiza pól temperaturowych wykazała, że w rdzeniach zalewanych aluminium strefa degradacji spoiwa (temp. >300 °C) ogranicza się wyłącznie do cienkiej warstwy przypowierzchniowej. Wnętrze rdzenia osiąga temperatury rzędu 125 °C (strefa pośrednia) lub pozostaje bliskie temperaturze otoczenia (centrum), co skutkuje jedynie odwracalną plastifikacją spoiwa, a nie jego trwałym zniszczeniem. Dla żeliwa izoterma degradacji penetruje rdzeń niemal w całej objętości,
- wpływ powłoki grafitowej na jakość powierzchni jest zależny od rodzaju odlewanej materiału. Dla stopów aluminium zastosowanie powłoki jest kluczowe w celu wyeliminowania wad typu penetracja (wnikanie metalu w pory masy) i redukcji chropowatości. W przypadku żeliwa szarego, ze względu na gwałtowne zgazowanie spoiwa na styku z metalem, uzyskano zadowalającą jakość powierzchni zarówno dla rdzeni z powłoką, jak i bez niej,
- zastosowana technologia mas z PLA pozwala na uzyskanie odlewów o wysokiej dokładności wymiarowej. Wszystkie zmierzone charakterystyki geometryczne (otwór $\phi 50$) mieszczą się w klasie tolerancji CT12 wg normy PN-ISO 8062:1997. Odnotowane ujemne odchyłki wymiarowe są wynikiem naturalnego skurczu odlewniczego (rzędu 1,1–1,2% dla AK11 oraz 0,8–1,2% dla żeliwa), co świadczy o tym, że rdzeń, mimo swojej wytrzymałości, wykazuje pewną podatność, nie blokując całkowicie skurczu krzepnącego metalu,
- masy ze spoiwem PLA wykazują duży potencjał jako ekologiczna alternatywa w odlewnictwie stopów o wysokiej temperaturze topnienia (żeliwo), gwarantując doskonałą wybijalność. W przypadku stopów lekkich (Al, Mg) technologia ta wymaga optymalizacji – np. modyfikacji geometrii rdzeni (rdzenie cienkościennie) lub modyfikacji składu spoiwa w celu obniżenia temperatury jego degradacji, aby uniknąć problemów z usuwaniem masy z wnętrza odlewu.

Author Contributions: conceptualization, A.S. and K.R.; methodology, A.S.; software, A.S.; validation, K.R.; formal analysis, K.R.; investigation, A.S.; resources, A.S.; data curation, K.R.; writing—original draft preparation, A.S.; writing—review and editing, A.S.; visualization, A.S.; supervision, A.S.; project administration, A.S.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Literatura

1. Lewandowski, J.L. *Tworzywa na formy i rdzenie*; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 1991;
2. Beeley, P.R. *Foundry Technology*; 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2001;
3. Sakwa, W.; Wachelko, T. *Teoria i praktyka materiałów formierskich*; Wydawnictwo Śląsk: Katowice, 1981;
4. Campbell, J. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2011;
5. Holtzer, M.; Dańko, R.; Żymankowska-Kumon, S. *Materiały wiążące stosowane w masach formierskich i rdzeniowych – wybrane zagadnienia*; Wydawnictwo Naukowe AKAPIT: Kraków, 2014;
6. Tabor, A.; Rączka, J.S. *Odlewnictwo*; Wydawnictwo-Dydaktyczne AGH: Kraków, 1996;
7. Jain, P.L. *Principles of Foundry Technology*; 5th ed.; Tata McGraw-Hill Education: New Delhi, 2009;
8. Ettemeyer, F.; Lechner, P.; Hofmann, T.; Andrä, H.; Schneider, M.; Grund, D.; Volk, W.; Günther, D. Digital sand core physics: Predicting physical properties of sand cores by simulations on digital microstructures. *Int. J. Solids Struct.* **2020**, *188–189*, 155–168, doi:10.1016/j.ijsolstr.2019.09.014.
9. Nowak, B.; Pająk, J. *Biodegradacja polilaktydu (PLA)*; Katedra Biochemii Wydział Biologii i Ochrony Środowiska

- Uniwersytet Śląski, 2010;
10. Fabijański, M.; Garbarski, J.; Szymaniak, Z. Modifying Polylactide with Powdered Cork Filler. *Materials (Basel)*. **2025**, *18*, 5606, doi:10.3390/ma18245606.
 11. Fabijański, M.; Gołofit, T. Influence of Processing Parameters on Mechanical Properties and Degree of Crystallization of Polylactide. *Materials (Basel)*. **2024**, *17*, 3584, doi:10.3390/ma17143584.
 12. Tyler, B.; Gullotti, D.; Mangraviti, A.; Utsuki, T.; Brem, H. Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Adv. Drug Deliv. Rev.* **2016**, *107*, 163–175, doi:10.1016/j.addr.2016.06.018.
 13. Farah, S.; Anderson, D.G.; Langer, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Adv. Drug Deliv. Rev.* **2016**, *107*, 367–392, doi:10.1016/j.addr.2016.06.012.
 14. Garlotta, D. A literature review of poly(lactic acid). *J. Polym. Environ.* **2001**, *9*, 63–84, doi:10.1023/a:1020200822435.
 15. Auras, R.; Lim, L.T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, H. *POLY(LACTIC ACID): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*; John Wiley & Sons, Inc., 2010; ISBN 9780470649848.
 16. Tryznowski, M.; Soroczyński, A. Use of biodegradable poly(lactic acid) as a binder for molding sands for foundry industry. *Przem. Chem.* **2020**, *2020*, 146–149, doi:10.15199/62.2020.10.23.
 17. Kozłowski, J.; Kocharński, A.; Perzyk, M.; Tryznowski, M. Zastosowanie PLA jako spoiwa w masach formierskich i rdzeniowych. *Arch. Foundry Eng.* **2014**, *14*, 51–54.
 18. Upadhyay, M.; Sivarupan, T.; El Mansori, M. 3D printing for rapid sand casting — A review. *J. Manuf. Process.* **2017**, *29*, 211–220, doi:10.1016/j.jmapro.2017.07.017.
 19. Gołaszewski, M.; Grygoruk, R.; Bissenik, I. 3D printing and 3D scanning processes applied to design and to produce artificial limb for animal. *Mechanik* **2015**, 682–684, doi:10.17814/mechanik.2015.8-9.498.
 20. Geometrical product specifications (GPS) - Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts - Part 1: Vocabulary (ISO 8062-1:2007) 2008.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee WTR, SIMP, Poland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).