

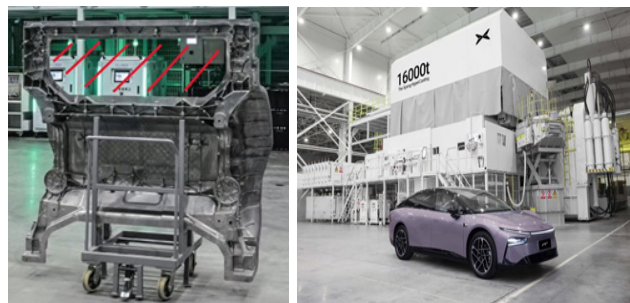
Status quo i perspektywy rozwoju odlewania pod ciśnieniem. Część I

Odlewanie ze stanu ciekło-statego, megaodlewanie, odlewy ze stopów aluminium, odlewy ze stopów magnezu, thixomolding i wysokotemperaturowa inżynieria stanu ciekłego

Zamiast wstępu

W dniach 26-28 marca bieżącego roku, w położonym nad rzeką Jangcy chińskim mieście Nanjing, pod hasłem „Jeden świat – jedno odlewnictwo ciśnieniowe”, miał miejsce ważny 20. Kongres Odlewnictwa Ciśnieniowego [1]. Uczestniczyło w nim ponad 600 uczestników z Chin, Europy, Ameryki Północnej i całej Azji w celu wymiany spostrzeżeń na temat najnowszych osiągnięć technologicznych i strategicznych trendów w światowym odlewnictwie ciśnieniowym. Poruszane w trakcie kongresowych obrad kwestie zdominowały następujące problemy:

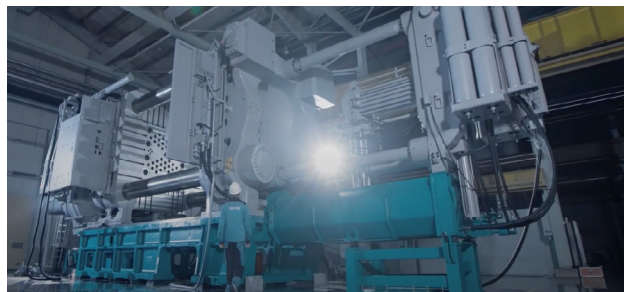
- Wytwarzania wyrobów z magnezu i jego stopów.
- Transformacje technologiczne w odlewnictwie.
- Filozofia „Megaodlewania” i integracja elementów łączonych, w tym odlewów (typowy przykład: zamiast kilku mniejszych odlewów wykonujemy jeden zintegrowany odlew).



Rys. 2. Odlew tylnej części nadwozia samochodu Xpeng X9 ze stopu aluminium (odlew RUB – rear under body) (a), wykonany na maszynie ciśnieniowej firmy LK Technology o sile zwierania 16.000 ton (fotografie z przełomu lat 2023/2024) (b) [5]



Rys. 3. Odlewy ze stopu aluminium (a), (b), wykonane na maszynie ciśnieniowej o sile zwierania 4.400 ton w odlewni Volkswagena w Kassel, Niemcy (projekt pilotażowy) [7]

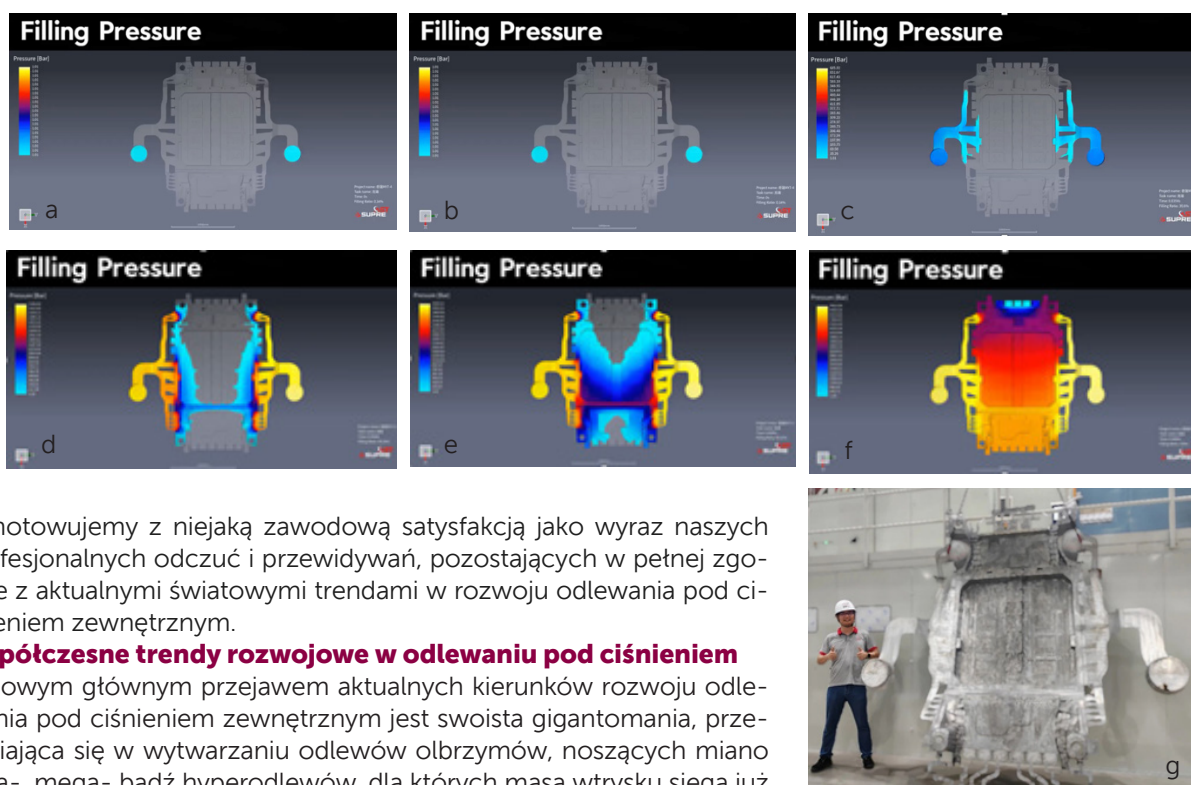


Rys. 1. Maszyna ciśnieniowa Buhler Carat 920 wtryskuje do formy ponad 200 kilogramów ciekłego stopu aluminium, wytwarzając nowy komponent samochodowy w czasie krótszym niż dwie minuty [4]

- Innowacje w e-mobilności, w tym rola odlewnictwa.
- Dominacja Chin jako światowego lidera w dziedzinie odlewnictwa (gospodarze z dumą podkreślali fakt pracy w chińskich odlewniach grupy 500 certyfikowanych, wysokokwalifikowanych specjalistów).

Raptem dwa miesiące później, w dniach 19–21 maja, nad pięknym polskim Bałtykiem, w Gdańsku, odbyła się doroczna STOP-owska, już XVII, Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Innowacje w Odlewnictwie Ciśnieniowym” [2]. *Toutes proportions gardées*, czyli zachowując wszelkie proporcje, wiele z poruszanych w Chinach tematów znalazło odbicie także i w wystąpieniach uczestników Konferencji, organizowanej przez Oddział Łódzki STOP wraz z ZG STOP [3]. Przedstawiamy Państwu autorską wersję naszej prezentacji, przygotowanej jeszcze przed chińskim Kongresem, która, można rzec, zawiera tożsame treści, co





Rys. 4. Poszczególne etapy symulacji wypełnienia formy eksperymentalnego odlewu płyty podłogowej samochodu osobowego segmentu A (a–f). Odlew ze stopu aluminium (g) wykonano na maszynie eksperymentalnej 13.000 T Giga Press z dwoma agregatami prasowania (double injection system – węzłami wtrysku ciekłego metalu) w Centrum Badawczym LK Machinery, Chiny [8]

odnotowujemy z niejaką zawodową satysfakcją jako wyraz naszych profesjonalnych odczuć i przewidywań, pozostających w pełnej zgodzie z aktualnymi światowymi trendami w rozwoju odlewania pod ciśnieniem zewnętrznym.

Współczesne trendy rozwojowe w odlewaniu pod ciśnieniem

Typowym głównym przejawem aktualnych kierunków rozwoju odlewania pod ciśnieniem zewnętrznym jest swoista gigantomania, przejawiająca się w wytwarzaniu odlewów olbrzymów, noszących miano giga-, mega- bądź hyperodlewów, dla których masa wtrysku sięga już 200–250 kg ciekłego metalu (dla stopów aluminium) (rys. 1). Oczywiście tak masywne odlewy wymagają również gigantycznych maszyn ciśnieniowych (Giga Press, Gigaprası), których siła zwierania form wynosi nawet do 16.000 ton (rys. 2). Zaprezentowana na rysunku 2b maszyna firmy LK Technology zapewne niezbyt długo dzierżyć będzie palmę pierwszeństwa w zakresie maksymalnej siły zwierania, albowiem w takich firmach jak Tesla czy Haitian Die Casting już trwają prace nad wdrażaniem maszyn o sile zwierania ponad 20.000 ton [6]. Nie dziwota więc, że masa ciekłego metalu może ulec zwiększeniu nawet do 250 kg ciekłego stopu aluminium.

Optymalizacja odlewów i konstrukcji form w celu zmniejszenia wymaganej siły zwarcia maszyny ciśnieniowej może prowadzić do istotnego zmniejszenia siły zwierania, stąd jest możliwe uzyskiwanie jakościowych gigaodlewów o znacznie zminimalizowanych parametrach siłowych (rys. 3).

Niezmienne nadal na topie jest kierunek uzyskiwania szczelnych odlewów o skomplikowanej geometrii wraz z optymalizacją sprawności energetycznej procesów odlewniczych.

Jedną z głównych barier dalszego rozwoju współczesnego odlewnictwa ciśnieniowego jest brak wykwalifikowanej kadry, albowiem tak gwałtowny wzrost poziomu technicznego procesu nie pozwala na jego nadmierne uproszczenie i bezawaryjną automatyzację. Dużą w tym rolę może odegrać sztuczna inteligencja (AI – Artificial Intelligence), która coraz śmielej wkracza w inteligentne, samouczące się sterowanie procesami wytwórczymi.

Konstruktorzy form ciśnieniowych także pracują nad multiplikacją węzłów prasowania, co z sukcesem przekłada się na wytworzenie „zdrowych” odlewów ciśnieniowych o istotnie rozwiniętej powierzchni (rys. 4).

Ekspansja metod odlewania pod ciśnieniem ze stanu ciekło-statego

Jednym z najbardziej znaczących kierunków rozwojowych odlewania metali i stopów z wykorzystaniem ciśnienia zewnętrznego jest gwałtowny rozwój procesów odlewania ze stanu ciekło-statego (SSM – semi-solid metal [casting]), nazywanym w kraju odlewaniem ze stanu stało-ciekłego, półciekłego bądź półstatego. Niekiedy uży-

wany jest termin „formowanie bądź kształtowanie w stanie półciekłym” lub wręcz, już technologicznie szczegółowo, z użyciem zanglizowanych tworów „formowanie/odlewanie tiksotropowe” czy „formowanie/odlewanie reocasting” a nawet „odlewanie zawieszinowe” [9].

W danym opracowaniu preferować będziemy określenie „odlewanie ze stanu ciekło-statego”, podkreślając tym samym odlewnicze korzenie nowej technologii, związanej z wysokotemperaturową inżynierią ciekłego metalu. Skrótowno używać będziemy także wyrażenia „technologia SSM”. Badania nad stanem ciekło-stałym stopów metali rozpoczęły się jeszcze w latach siedemdziesiątych zeszłego wieku i uważa się, że zapoczątkowały je działania grupy badawczej M.C. Flemingsa w Massachusetts Institute of

Technology [10, 11]. Działania tego zespołu twórców doprowadziły do precyzyjnego sformułowania pojęcia „stanu tiksotropowego”, jako stanu pośredniego w sensie fizycznym/reologicznym, w którym warunki procesu tworzą ciąg technologiczny, uwzględniający – nawet niezwykle wąskie – ale odczuwalne różnice temperatury poszczególnych parametrów wytwarzania. Stąd też czyste metale i stopy o zerowym zakresie temperatur krzepnięcia nie spełniają wymogów procesu: możemy go skutecznie zaadoptować tylko do stopów z niezerowym zakresem temperatury likwidus-solidus.

Przedrostek „thixo-” wywodzi się od greckiego słowa „thixis”, które oznacza „dotyk” lub „ściskanie.” W języku naukowym nawiązuje do zdolności materiału do zmiany swojej lepkości pod wpływem działania mechanicznego, np. wstrząsów lub mieszania. W cieczach tiksotropowych występuje zależność lepkości od czasu działania sił ścinających, które na ten „płyn” działają. Płyny tiksotropowe mogą stać się przez pewien czas mniej lepkie, gdy podda się je intensywnemu mieszaniu – po ustaniu mieszania płyny znowu gęstnieją. Płyny tiksotropowe są jednym z rodzajów płynów nienewtonowskich, a sama tiksotropia jest więc procesem odwracalnym; do zniszczenia

struktury tiksotropowej płynu nie wymagane jest dostarczenie energii.

Przedrostek „rheo-” pochodzi z greckiego słowa „rheos,” które oznacza „przepływ”. W kontekście rheocastingu odnosi się do procesów odlewania, w których materiał wskutek przepływu temperatury w czasie przechodzi ze stanu ciekłego do stałego (i odwrotnie) i jest kształtowany w formach właśnie podczas tego przejścia.

Technologia odlewania w stanie ciekło-stałym z użyciem ciśnienia zewnętrznego oferuje szereg zalet, do których można zaliczyć:

- Obniżone parametry temperaturowe całego procesu.
- Możliwość odlewania stopów do przeróbki plastycznej.
- Wytwarzanie odlewów o dokładnym odwzorowaniu kształtu i powierzchni (NNS – Near Net Shape),
- Wytwarzanie odlewów bez nieciągłości strukturalnych (bezporowatych), co daje możliwość przeprowadzenia pełnej obróbki cieplnej.
- Otrzymanie niezwyklej równomierności strukturalnej odlewów (osiągalna jest praktycznie absolutna izotropowość właściwości).
- Łatwość automatyzacji procesu.

Tabela 1

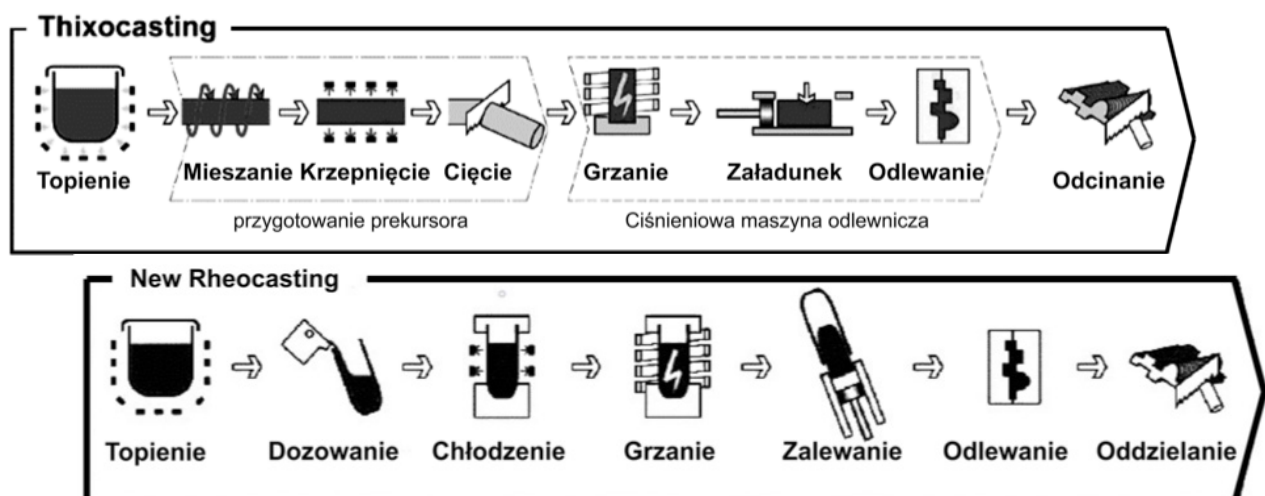
Warianty technologiczne odlewania pod ciśnieniem ze stanu ciekło-stałego

Warianty technologii	Stopy	Forma materiału wejściowego	Urządzenie	Udział fazy ciekłej, % obj.
Thixocasting	Al, Mg	Wlewki (uprzednio „globularyzowane”)	Maszyna ciśnieniowa	40-70
Rheocasting	Al, Mg	Wlewki	Maszyna ciśnieniowa	30-50
New Rheocasting	Al, Mg	Wlewki	Maszyna do squeeze casting	30-50
Thixomoulding	Mg	Granulat, wióry	Maszyna do thixomoulding	0-40

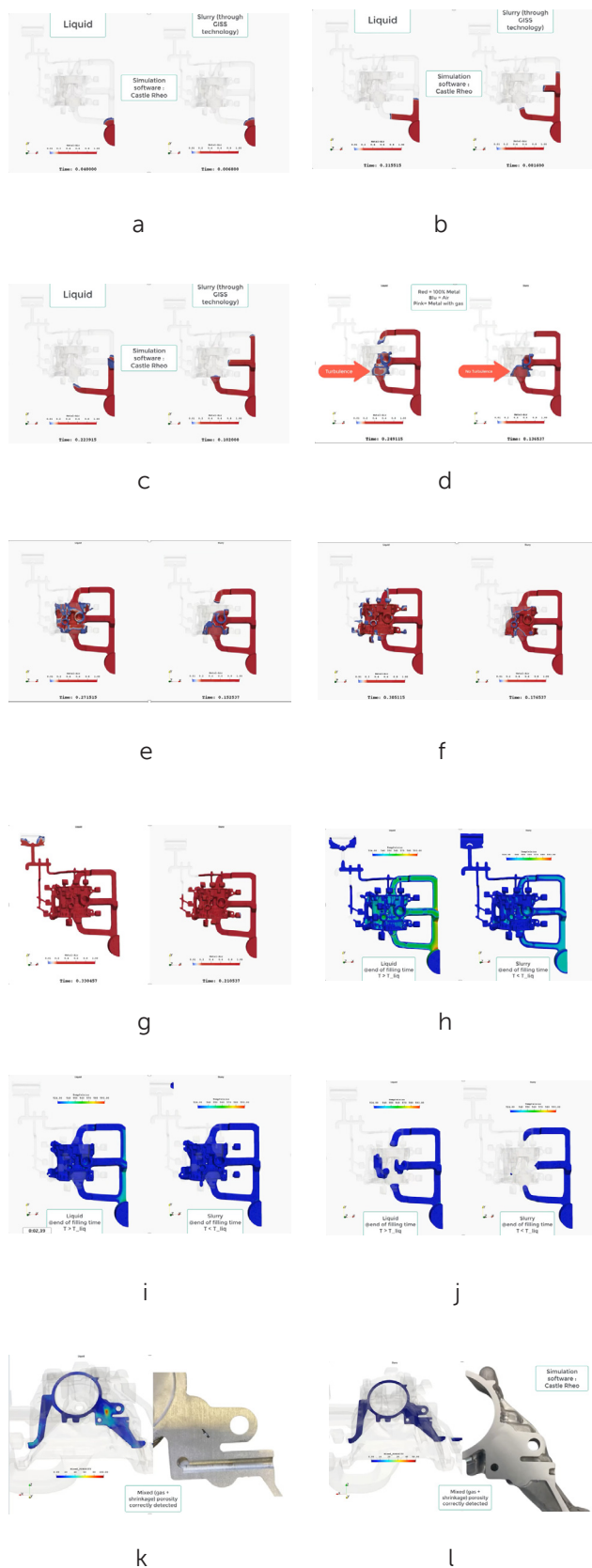
- Znaczną redukcję wymaganej siły zwarcia formy maszyny ciśnieniowej w porównaniu z klasycznym odlewaniem pod ciśnieniem (HPDC).

- Uzyskanie wymaganej racjonalności ekonomicznej procesu (jakość versus koszty).

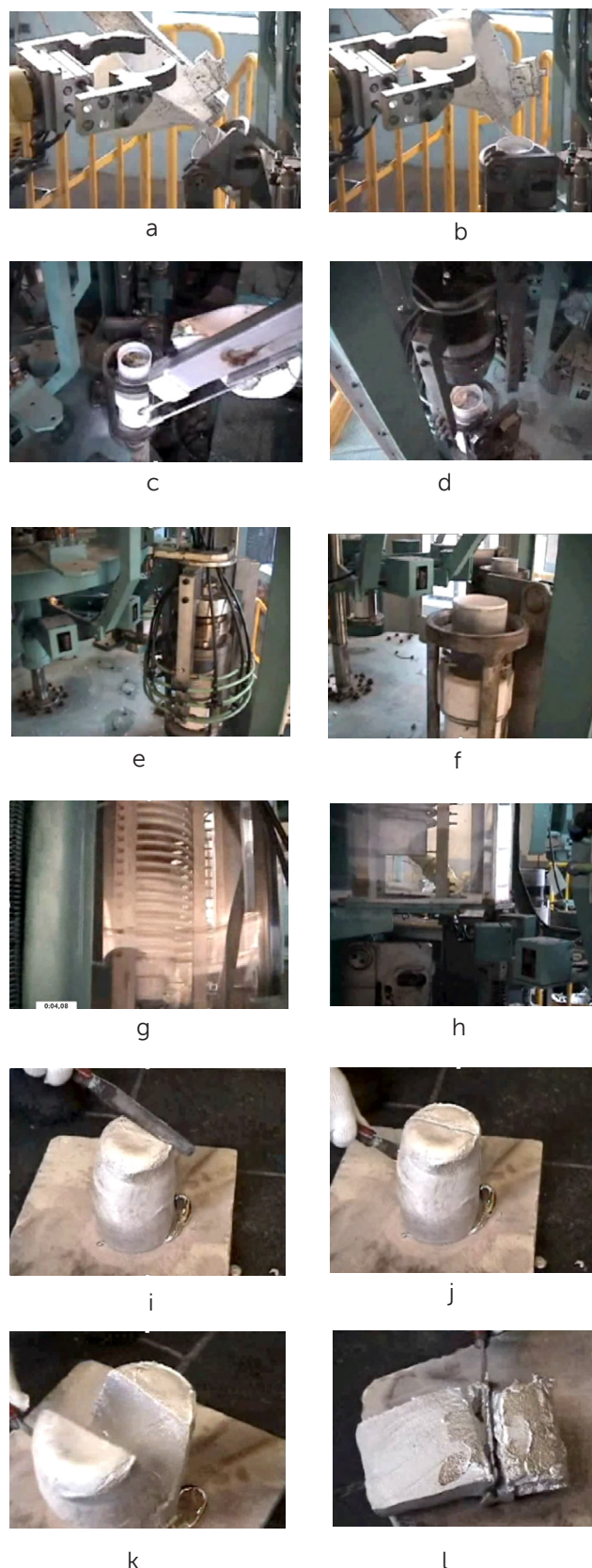
Za główną niedogodność procesu i jego niezbyt liczne wdrożenia w przemyśle odlewniczym, szerzej wytwórczym, uznaje się wysokie wymagania



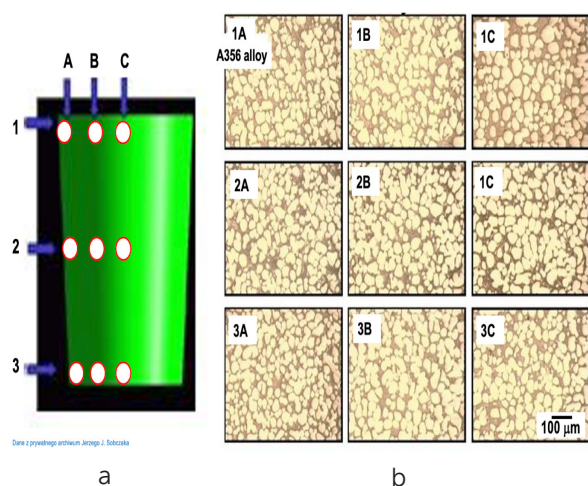
Rys. 5. Schematy ilustrujące różnice pomiędzy wariantami w technologii SSM: thixocasting i rheocasting



Rys. 6. Poszczególne etapy symulacji wypełnienia formy ciśnieniowej metalem w stanie ciekłym (w każdej komórce tabeli po lewej) i półciekłym (w komórkach po prawej) (a–j), wykonanej w programie Castle Rheo. Porównanie wyników symulacji z przekrojem wykonanego odlewu: ze stanu ciekłego (k) i ciekło-stałego (l) (na podstawie [12])



Rys. 7. Kolejne stadia uzyskiwania wlewu w wariacie rheocasting w tyglu ceramicznym chłodzonym (powietrzem) i podgrzewanym (indukcyjnie) na urządzeniu karuzelowym (a–h) na stanowisku firmy UBE Industries. Uzyskany wlewk SSM (i–l) wprowadzany jest następnie do komory wlewowej maszyny ciśnieniowej, następuje wtrysk metalu w stanie ciekło-stałym (ze zmniejszoną szybkością) do formy, w której następuje kształtowanie gotowego odlewu (dzięki uprzejmości UBE Ind.)

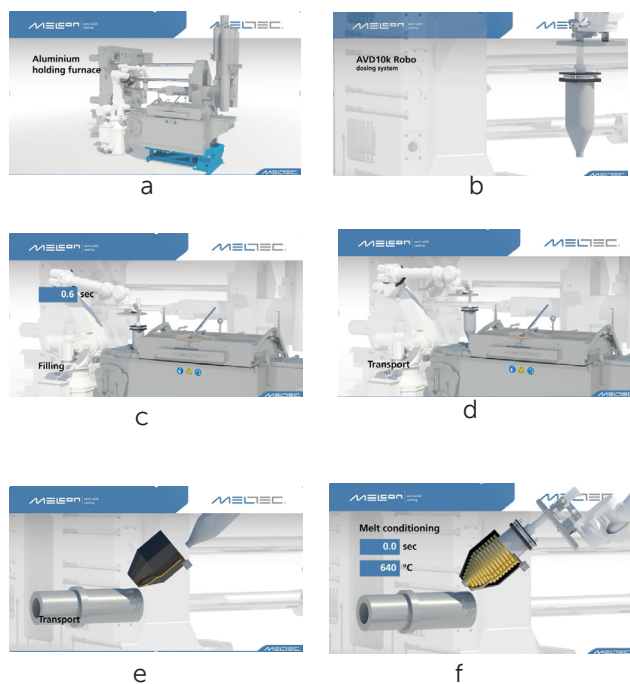


Rys. 8. Struktury wlewka ze stopu A356, wykonanego w wariantcie NRC (a). Próbkę do zgładów pobrano z różnych miejsc cylindrycznego odlewu o średnicy 60x100 mm (b) (ze zbiorów prywatnych)

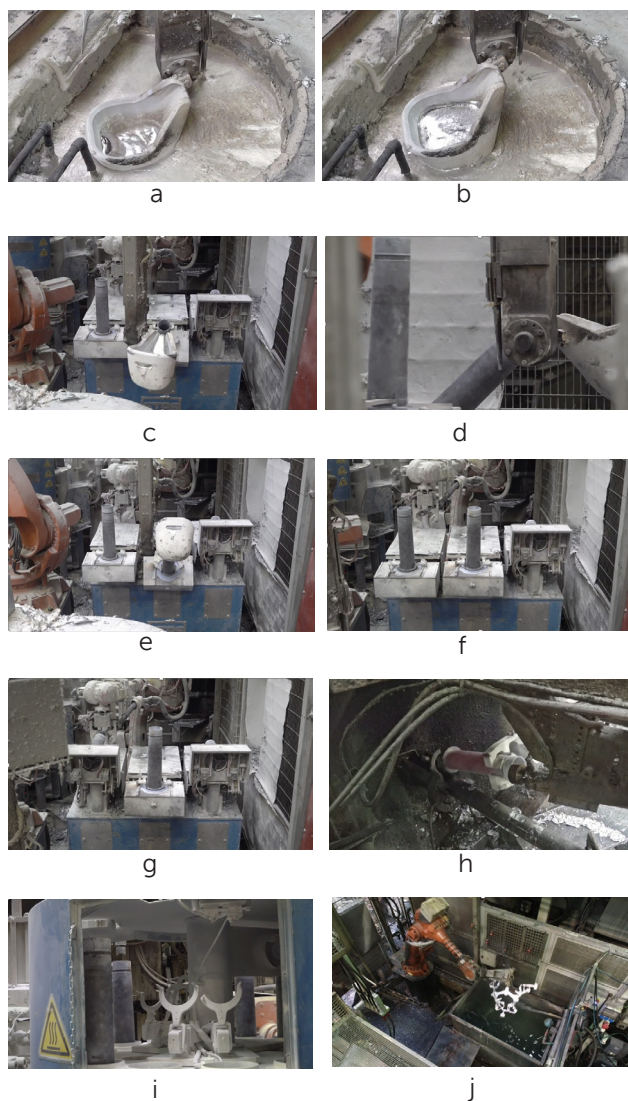
względem poziomu technologicznego produkcji, w tym pogłębionej wiedzy, doświadczenia i profesjonalnego szkolenia operatorów.

Na danym etapie rozwoju, zaadaptowanego jedynie do stopów aluminium i magnezu, technologia SSM wygenerowała trzy podstawowe warianty, różniące się zwłaszcza udziałem fazy ciekłej w procesie kształtowania odlewu (tab. 1):

- Thixocasting (spolszczany jako „tiksocasting”) z maksymalnym udziałem fazy ciekłej (do 70% obj.).
- Rheocasting („reocasting” z podwariantem new rheocasting, który na dobrą sprawę różni się od rheocasting wyspecjalizowanym instrumentarium



Rys. 9. Poszczególne etapy realizacji procesu wytwarzania odlewów SSM w firmie MelTec, Austria (na podstawie [13])



Rys. 10. Poszczególne etapy realizacji procesu rheocasting w firmie Kovolis (Czechy) (na podstawie [14])

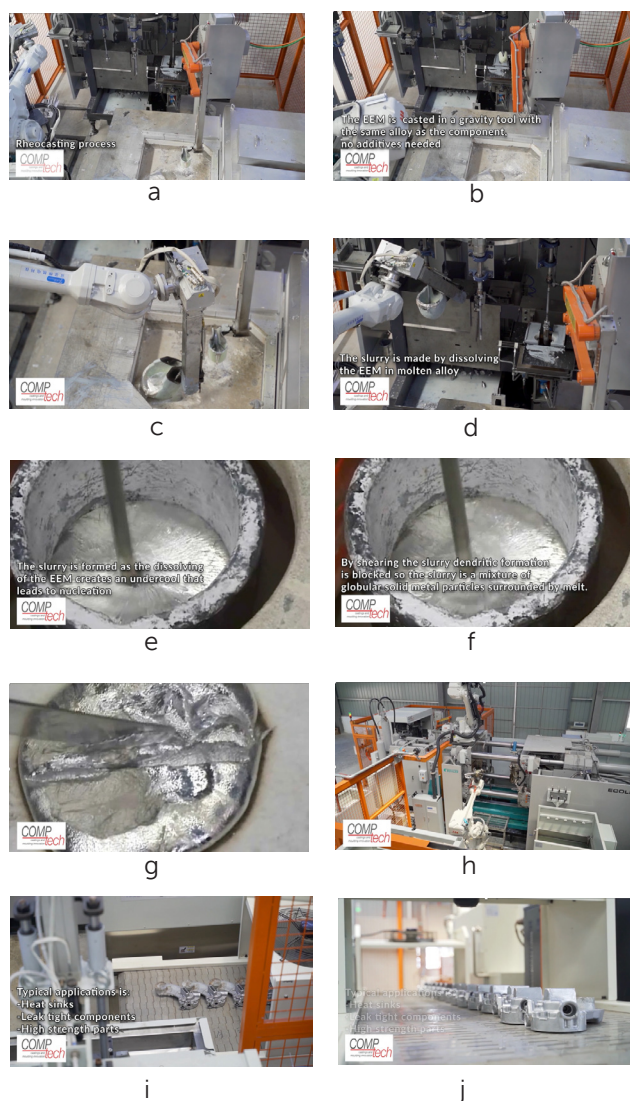
do realizacji całego procesu) ze średnim udziałem fazy ciekłej (max. 50% obj.).

- Thixomoulding („tiksomolding”) ze zminimalizowanym udziałem fazy ciekłej, nawet równym zero (na wstępnym etapie procesu), stosowany jedynie do stopów magnezu.

Różnice pomiędzy wariantami thixocasting i rheocasting (new rheocasting) zawierają się w sposobie przygotowania wstępnych wlewków (wsadów) i etapowości całego procesu (rys. 5).

W wariantcie thixocasting wlewek (zwany niekiedy prekursorem) przygotowuje się wstępnie (najczęściej drogą mieszania cieczy metalowej w stanie ciekło-stałym), a następnie schładza. Może on być następnie przetransportowany do klienta, gdzie jest podgrzewany do stanu ciekło-stałego i wprowadzany do komory maszyny ciśnieniowej a po wywarceniu stosownego ciśnienia zamienia się w gotowy odlew.

W wariantcie rheocasting wlewek jest wytwarzany bezpośrednio obok klasycznej maszyny ciśnieniowej lub wyspecjalizowanej prasy hydraulicznej (new rheocasting) do realizacji procesu prasowania w stanie ciekłym (squeeze casting) i wprowadzany do komory prasowania maszyny



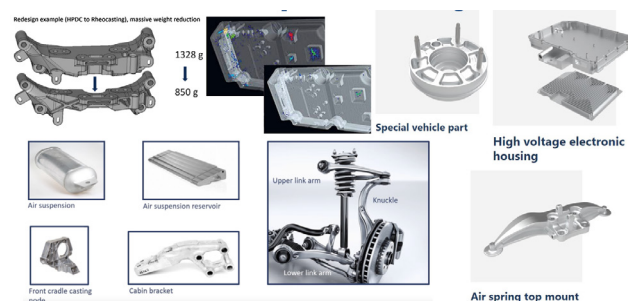
Rys. 11. Poszczególne etapy procesu wytwarzania odlewów SSM w wariancie rheocasting (a–h) w firmie CompTech, Szwecja. Na rysunku (i) oraz j przedstawiono gotowe odlewy ze stopu aluminium (na podstawie [15])

ciśnieniowej (rheocasting) lub wneki formy bądź wneki węzła prasowania prasy hydraulicznej (new rheocasting). Sposób wypełniania formy ciśnieniowej stopem, znajdującym się w stanie ciekło-stałym (zwanym czasem „zawiesiną” lub „suspensją”) różni się istotnie od takowego w przypadku zupełnie ciekłego stopu (rys.6). Przeprowadzone symulacje wykazały, że w przypadku SSM nie tylko unika się turbulencji w przepływie stopu, ale również łatwiej identyfikuje prawdopodobieństwo występowania wad nieciągłości strukturalnej i unika jej powstawania. Sposób wytwarzania wlewka w klasycznym wariancie rheocasting przedstawiono na rysunku 7. Struktura w podłużnym przekroju wlewka z siluminu podeutektycznego (stop A356 – AlSi7Mg), wytworzona w wariancie NCR (new rheocasting) jest niezwykle jednorodna, z charakterystycznymi globularnymi wydzieleniami roztworu stałego krzemu, „przenizanymi” eutektyką Al-Si (rys. 8).

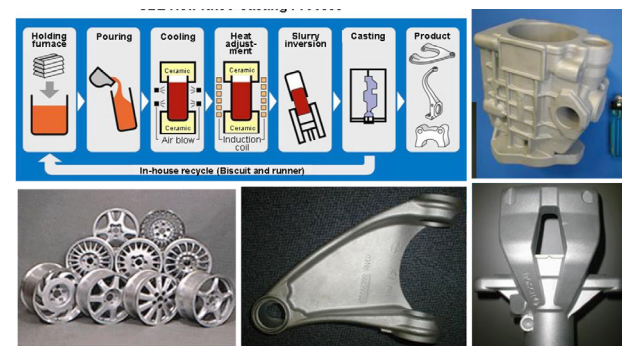
W procesie austriackiej firmy MelTec ciekły stop aluminium przetrzymywany jest w piecu podgrzewczym (rys. 9a), z którego jest zasysany do tygielka ze stożkową końcówką, umożliwiającą dolne zalewanie (rys.9b–c), a następnie transportowany do komory grzewczo-chłodzącej, umożliwiającej ścisłą kontrolę szybkości chłodzenia zawartości tygla (rys. 9d–g). Po osiągnięciu przez stop zadanej temperatury, znajdującej się w zakresie likwidus-solidus, ciekło-stała zawartość tygla jest podawana do komory prasowania maszyny ciśnieniowej (rys. 9h).

Czeska firma Kovalis zaproponowała wariant klasycznego procesu rheocasting, obejmujący czerpanie ciekłego stopu (rys. 10a–b) a następnie jego przetransportowanie do podgrzanych pionowych tulei, znajdujących się w ciągłym ograniczonym ruchu obrotowym (w płaszczyźnie poziomej), co umożliwia wygenerowanie odpowiedniego stanu SSM wraz z podaniem wlewka do komory maszyny ciśnieniowej (rys. 10c–h). Wytworzone odlewy są następnie chłodzone w wodzie, dając tym samym możliwość uproszczonego przesycania roztworowego (rys. 10i–j).

Swoisty proces samomodyfikacji w procesie wytwarzania odlewów SSM również w wariancie rheocasting jest stosowany przez szwedzką firmę ComTech (rys. 11). Idea tego procesu polega na rozpuszczaniu w ciekłym stopie aluminium wlewków w postaci wydłużonych prętów z tożsamego stopu. Takie wlewki, wytworzone uprzednio odlewaniem grawitacyjnym w kokili, noszą znamiona materiału wymiany entalpii



Rys. 12. Przykładowe odlewy ciśnieniowe za stopów aluminium wytworzone ze stanu półciekłego (ze zbiorów własnych)



Rys. 13. Przykładowe odlewy ciśnieniowe za stopów aluminium wytworzone ze stanu półciekłego (ze zbiorów własnych)

(EEM – Enthalpy Exchange Material), a ich kontrolowane rozpuszczanie w ciekłym stopie prowadzi do wytworzenia półciekłej zawiesziny, z której wykonuje się odlewy ciśnieniowe z masą półciekłego wsadu od 2,5 do 50 kg.

Wypada nadmienić, że w Polsce wlewki typu rheocast i odlewy z nich prasowane przeznaczone dla przemysłu samochodowego wytwarzano w ówczesnym Instytucie Odlewnictwa już od roku 2014 na specjalnym zautomatyzowanym kompleksie [9].

Odlewy SSM znajdują zastosowanie głównie w przemyśle samochodowym jako odpowiedzialne elementy zawieszenia oraz w elektronice (rys. 12, 13).

Parafrazując Pliniusza Starszego, cytowanego w znakomitym dziele Józefa Górnego [16], poświęconym

metalom świata starożytnego można skonstatować, że współczesne odlewanie pod ciśnieniem sięgnęło poziomu zuchwałstwa...

Część druga artykułu opublikowana zostanie na łamach Przeglądu Odlewnictwa 9–10/2025

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego – grant AGH nr 16.16.170.654/B507 w ramach realizacji subwencji Wydziału Odlewnictwa AGH oraz wsparta przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu OPUS 21, nr 2021/41/B/ST5/02787, realizowanego w latach 2022–2025.

Literatura

1. https://www.diecastexpo.cn/en/meeting/about_congress
2. <https://diecasting.foundry-conference.com/>
3. Materiały konferencyjne XVII Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Innowacje w Odlewnictwie Ciśnieniowym”, STOP, Gdańsk, 19–21 maja 2025
4. <https://www.buhlergroup.com/global/en/industries/die-casting/megacasting.html>
5. <https://www.foundry-planet.com/d/xpeng-starts-series-production-with-16000-t-giga-mega-press/>
6. Giga Presses in the Automotive Industry. and management consulting GmbH, Essen, Germany, Essen, 3rd of April 2024
7. <https://www.hna.de/lokales/kreis-kassel/baunatal-ort312516/entwickelt-baunataler-vw-mitarbeiter-haben-teil-fuer-neues-auto-91550655.html>
8. <https://x.com/lucagrecoita/status/1849079728495263894>
9. Odlewnictwo Współczesne. Poradnik Odlewnika, Tom II, Technologia i Organizacja (pod red. J.J. Sobczaka). Kraków: STOP
10. Flemings M. C. (1991). Behaviour of Metal Alloys in the Semisolid State. Metallurgical Transactions A, May, vol. 22A, p. 957
11. Flemings M.C. (2000) Semi-solid forming: the process and path forward, Metallurgical Science and Technology, Vol. 18 (2), 3–4 pp
12. <https://mambretti.tech/settori/rheocasting/>
13. <https://www.meltec.at/en/>
14. https://www.youtube.com/watch?v=Vf58f-ZtG_g&ab_channel=MiloslavPavlas
15. <https://www.comptech.com>
16. Górny J. (2010). Metale w literaturze świata starożytnego. Kraków: Wydział Odlewnictwa AGH