

Status quo i perspektywy rozwoju odlewania pod ciśnieniem. Część II

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).
- 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 2025 r., 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 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.

Pierwsza część artykułu odnosząca się do tematyki poruszanej podczas obu wydarzeń została opublikowana w Przeglądzie Odlewnictwa 7–8/2025. Poniżej prezentujemy II część artykułu.

Dlaczego odlewy ze stopów magnezu?

Ogólnie rozwój magnezu i jego stopów można umownie podzielić na cztery etapy (rys. 14) [17].

Etap 1. W 1808 roku angielski chemik Humphry Davy wyizolował magnez metaliczny, ale dopiero w 1828 roku Antoine-Alexander Bussy wyizolował czysty Mg z bezwodnego chlorku magnezu $MgCl_2$. Już w latach 80. XIX w. Niemcy założyły pierwszą na świecie fabrykę elektrolitycznego Mg, w której rozpoczęto przemysłową produkcję jego stopów. W latach trzydziestych zeszłego wieku Niemcy pierwsi zastosowali stop Mg w przemyśle samochodowym. Kilka lat później ówczesny rząd radziecki wprowadził stop Mg do produkcji samolotów, a Anglia po raz pierwszy zastosowała stop Mg w obudowie skrzyni biegów motocykla. Produkcja stopu Mg osiągnęła w tym okresie 1200 ton/rok.

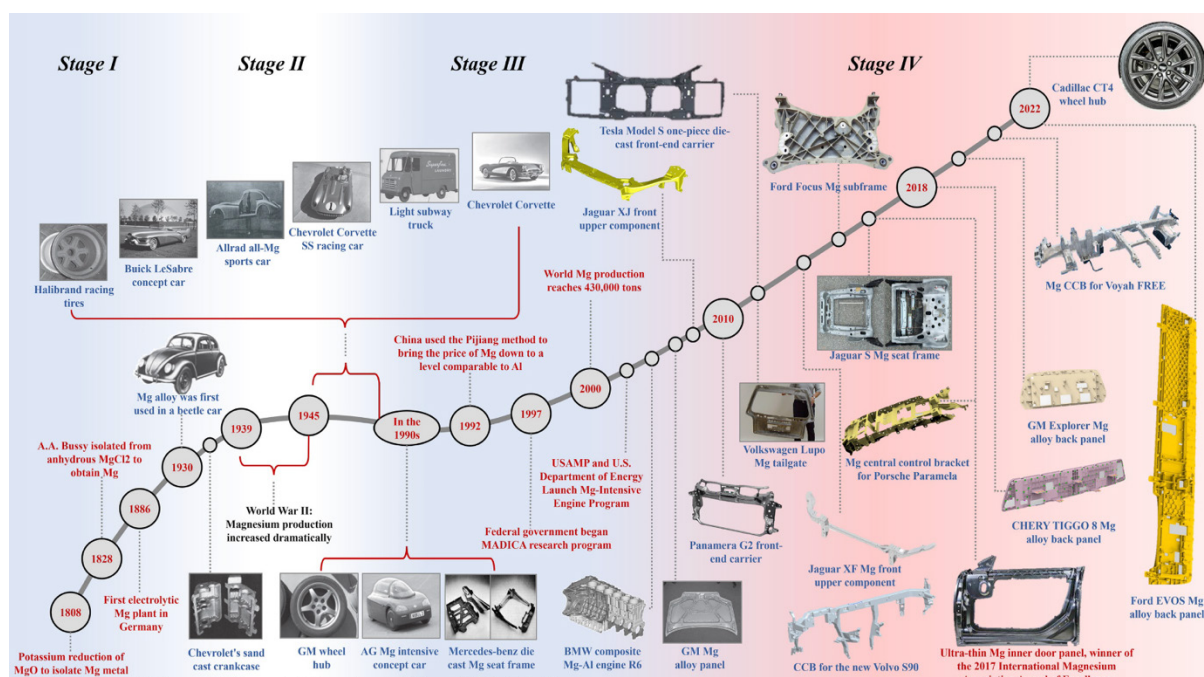
Etap 2. Podczas II wojny światowej produkcja stopów Mg gwałtownie wzrosła w związku z produkcją sprzętu wojskowego. W okresie powojennym, po 1946 roku, rozwój stopów Mg zaczął się stabilizować.

Etap 3. Do lat 90-tych XX wieku, z uwagi na rosnącą emisję spalin silników samochodowych, zużycia energii i polityki ochrony środowiska, kraje na całym świecie zaczęły zwracać uwagę na rozwój i badania magnezu i jego stopów.

Etap 4. W naszym stuleciu, wskutek osiągnięcia doskonałych właściwości materiałowych, zastosowanie stopów Mg w nadwoziach i częściach zamkniętych szybko rośnie, szczególnie w pojazdach czysto elektrycznych i hybrydowych. Zwłaszcza w ciągu ostatnich 20 lat główni producenci „oryginalnego wyposażenia” OEM (Original equipment manufacturer) zwiększali wykorzystanie stopów Mg w samochodach, w wyniku czego na rynku pojawiło się wiele części ze stopów magnezu.

W odniesieniu do aktualnej sytuacji, wielkość globalnego rynku stopów magnezu została wyceniona na 1,7 mld USD w 2022 i przewiduje się, że osiągnie wartość 7,0 mld USD do 2031 ze skumulowanym rocznym wskaźnikiem wzrostu CAGR (Compound Annual Growth Rate) na poziomie 16,8% w okresie do 2031 [18].

Według zeszłorocznego raportu firmy Mordor Intelligence [18] wzrost popytu na pojazdy elektryczne i zmiana preferencji konsumentów skłoniły producentów samochodów do zastąpienia cięższych komponentów lekkimi elementami, wykonanymi ze stopów aluminium i właśnie stopów magnezu. Główni producenci pojazdów wykorzystują stopy magnezu do produkcji takich elementów, jak obudowy lusterek, kolumny kierownicze, obudowy poduszek powietrznych kierowcy, ramy siedzeń i obudowy deski rozdzielczej. Rosnąca tendencja do zwiększania wydajności



Rys. 14. Schemat historii rozwoju tworzyw na bazie magnezu w umownym podziale na cztery etapy [17]

akumulatorów i procesu spalania paliwa, wraz z popytem na lepsze osiągi, spowodowała wzrost zainteresowania stopami magnezu odlewany ciśnieniowo (planowany wzrost wielkości produkcji odlewów ciśnieniowych ze stopów magnezu z 4,85 mld USD w 2025 do 7,68 mld USD w 2030). Stopy magnezu charakteryzują się doskonałym połączeniem właściwości mechanicznych i najwyższym stosunkiem wytrzymałości do masy spośród wszystkich stopów metali konstrukcyjnych.

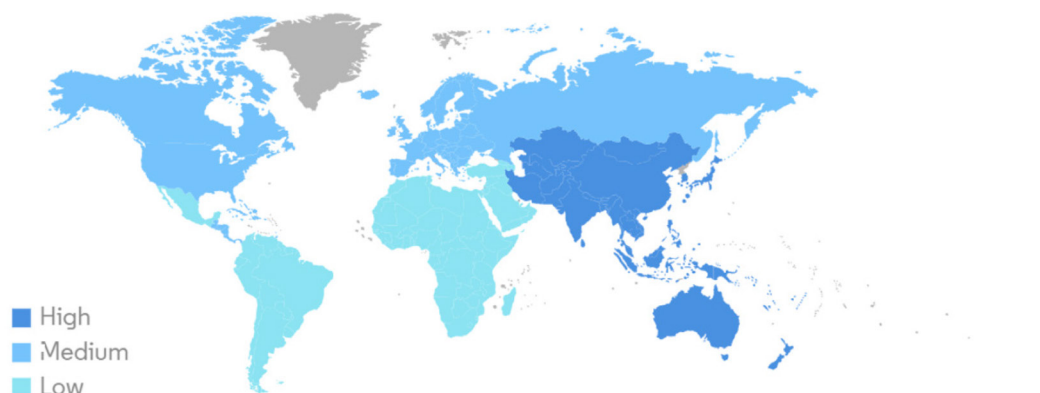
W okresie prognozy 2025–2030, to kraje Azji i Pacyfiku będą dominować na rynku, albowiem właśnie tam działają duże przedsiębiorstwa produkcyjne, co może stworzyć okazję dla rozwoju produkcji odlewów ze stopów magnezu na części samochodowe (rys.15).

W Europie liderem w produkcji odlewów ze stopów magnezu są Niemcy (ponad 9000 ton), następnie Włochy (2500 t) i Wielka Brytania (1500 t) (rys. 16). Zauważalne ilości odlewów ze stopów magnezu produkuje się w Turcji, Czechach i na Węgrzech.

W Polsce, oprócz krakowskiej firmy NeoCast Technologie Metali Lekkich (www.neocast.eu) i Aludyne z Bieska Białej, produkcja odlewów magnezowych jest w zaniku.

Wzrastające zainteresowanie wytwarzaniem wyrobów ze stopów magnezu jest spowodowane ich unikatowymi właściwościami, które w sposób niemalże perfekcyjny spełniają aktualne kryteria szybkiego rozwoju przemysłu samochodowego (ogólnie komunikacji naziemnej), awiacji, przemysłu obronnego

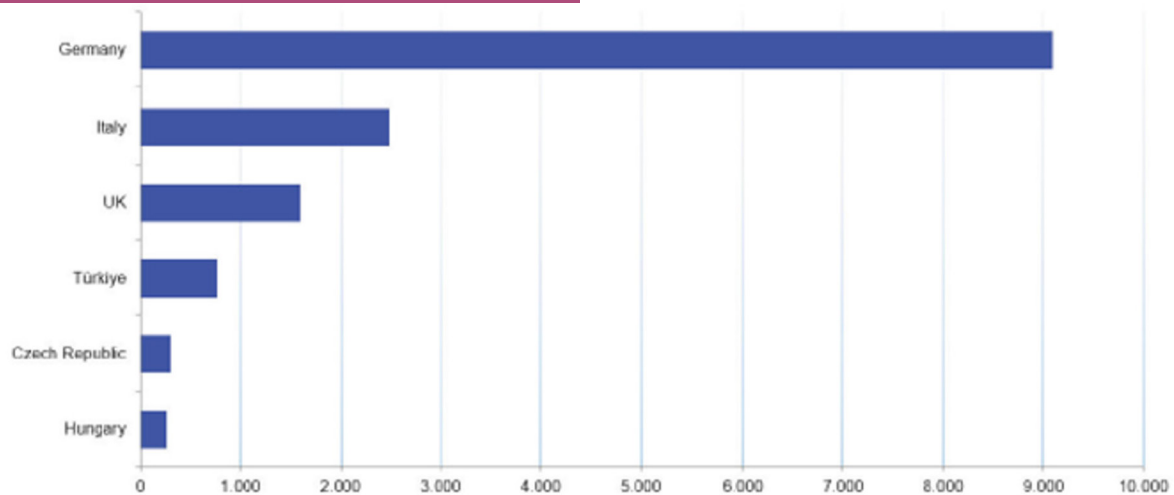
Automotive Parts Magnesium Die Casting Market - Growth Rate by Region (2022 -2027)



Source: Mordor Intelligence



Rys. 15. Tempo wzrostu rynku odlewów ciśnieniowych ze stopów magnezu przeznaczonych dla przemysłu samochodowego w latach 2022–2027 w zależności od rejonu świata (im ciemniejszy kolor, tym wyższe tempo wzrostu) [18]



Rys. 16. Główni europejscy producenci odlewów ze stopów magnezu (wielkość produkcji podano w tonach) w odniesieniu do 2023 roku [19]



Rys. 17. Tommy Milton, zwycięzca wyścigu Indy 500 za kierownicą samochodu Frontenac, w którego silniku zamontowano magnezowe tłoki Dowmetal. Taki samochód w 1921 roku mógł rozwijać prędkość ponad 140 km/godz. [21]

i potrzeb związanych z opanowywaniem przestrzeni kosmicznej. Nie bez znaczenia pozostaje ta okoliczność, że magnez zajmuje 8 miejsce pod względem występowania na Ziemi (około 3% Mg zawiera skorupa ziemska) i jest na 3 miejscu występowania w wodzie morskiej (0,12%). Magnez nie wykazuje właściwości toksycznych, biorąc udział w 300 reakcjach biochemicznych; dla przykładu, ciało ludzkie wymaga dostarczenia około 400 mg magnezu dziennie. Do najbardziej atrakcyjnych właściwości magnezu i jego stopów można zaliczyć [20]:

1. Niezwykłą lekkość: magnez jest najlżejszym metalem konstrukcyjnym, tylko 1,7 razy cięższym od wody.
2. Wystarczającą wytrzymałość doraźną; wytrzymałość właściwa magnezu jest 2,5 razy większa niż stopów na bazie żelaza.
3. Nowoczesne stopy magnezu już posiadają podwyższoną odporność korozyjną, co do niedawna stanowiło barierę w ich szerszym zastosowaniu.
4. Stopy magnezu mają wysoką zdolność tłumienia energii, wibracji (DE – excellent damping capacity).
5. Stopy magnezu są doskonałym materiałem na obudowy urządzeń elektronicznych, chroniąc owe urządzenia przed promieniowaniem niejonizującym (ESE – electromagnetic shielding effectiveness).
6. Nowe stopy magnezu mogą pracować w temperaturze nawet do 350°C, dobrze przewodząc ciepło.
7. Są wystarczająco dobrze obrabialne skrawaniem.
8. Mają zdolność samoanihilacji, czyli ulegają samozniszczeniu w przypadku konieczności np.



Rys. 18. Zastosowanie stopów magnezu w drzwiach samochodowych: (a) Aston Martin Vanquish S (z wewnętrznymi odlewami drzwiami bocznymi); (b) Jeep Wrangler 2018, wyprodukowany z tylną klapą z Mg; (c) Chrysler Pacifica przedstawiający zespół klapy tylnej z wewnętrznym odlewem Mg; (d) tył modelu T Mercedes-Benz Klasy E z hybrydową tylną klapą ze stopu Mg-Al; (e) wewnętrzna rama drzwi Daimler-Chrysler SL Roadster; (f) koncepcja Forda: wewnętrzne drzwi z odlewanej ciśnieniowo stopu Mg o otwartej architekturze; (g) zintegrowane wewnętrzne drzwi Mg z odlewem Mg (część projektu GMC); (h) wewnętrzne super cienkie drzwi z ultralekkiego stopu Mg [17]



Rys. 19. Odlewy ciśnieniowe ze stopów magnezu znalazły już zastosowanie w samochodach jako części dachu, pokrywy bagażnika, zderzaków i wsporników [17]

bezpiecznej utylizacji części magnezowych pochodzących z przestrzeni okołozemskiej).

9. Są łatwe w recyklingu.
10. Są nietoksyczne, biodegradowalne; wykazują optymalną kompatybilność biomechaniczną, posiadając charakterystyki zbliżone do cech ludzkiej kości.
11. Wytrzymałość właściwa ultralekkiego i wysokowytrzymałego stopu Mg-14Li-7Al (LA147, %wag.) wynosi około 350 Nm/kg (czyli 350 metrów!), co nie ma sobie równych w przypadku wszystkich innych stopów inżynierskich [17].

Stopy magnezu wykazują zdolność do tłumienia drgań około 15 razy większą niż w przypadku stopów aluminium i 60 razy większą niż w przypadku stali [17]. Konwencjonalne stopy odlewnicze Mg, w tym Mg-Al-Zn (AZ), Mg-Al-Mn (AM) i Mg-Al-RE (AE), są szeroko stosowane ze względu na doskonałą lejącość i niski koszt, chociaż, póki co, poziom ich wytrzymałości jest niższy w porównaniu z odlewniczymi stopami Al [21]. Do zastosowań związanych z odlewaniem ciśnieniowym stopy Mg-Al-Ca wykazują znacznie lepszą granicę plastyczności przy rozciąganiu oraz wydłużenie i odporność na pękanie lepsze niż inne stopy Mg [21]. Stopy Mg-Ce-Mn charakteryzują się wysoką plastycznością i wystarczającą wytrzymałością. Stopy Mg-Al-Sn także mogą być utwardzane wydzieleniowo. Stopy te można dalej optymalizować pod kątem zwiększenia lejącości i odporności na korozję [21].

Dodatek Gd do Mg może prowadzić do uzyskania istotnego efektu umacniania, dzięki czemu stop Mg-8Gd-3Y-0,5Zr2 (GW83K) osiąga wyjątkową granicę plastyczności (236 MPa) i wytrzymałość do 350 MPa po obróbce T6 [21].

Według dostępnych źródeł literaturowych, pierwsze zastosowanie odlewów ze stopów magnezu na tłoki silników spalinowych Dowmetal miało miejsce już w 1921 roku (rys. 17) w trakcie dorocznego wyścigu samochodowego, rozgrywanego na torze Indianapolis Motor Speedway w mieście Speedway (Indiana, USA). Uczestnicy tego rozgrywanego od 1911 roku wyścigu, odbywającego się w ostatnią majową niedzielę, mieli do pokonania dystans 500 mil (800 km) w postaci 200 okrążeń toru. Wieloletnią tradycją tego wyścigu, zna-

nego jako Indy 500 (Indianapolis 500) było i jest to, że zwycięzca na podium zamiast butelki szampana, otrzymuje butelkę mleka (sic!).

Współcześnie odlewy magnezowe wytwarzane ze stanu ciekłego, w tym odlewy ciśnieniowe, występują w przemyśle samochodowym (np. w postaci drzwi – rysunek 18, innych części – rysunek 19), elektronice, lotnictwie (ogółem komunikacji powietrznej) oraz przemyśle obronnym.

Thixomolding – konie poszły w las!

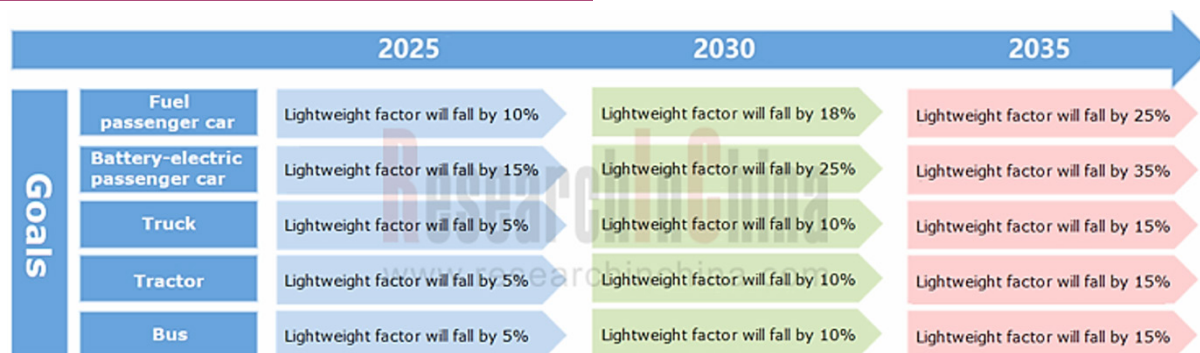
Drogą rządowych regulacji chiński przemysł *automotive* jest zachęcany do znacznego zwiększenia ilości części ze stopów Mg w konstrukcji samochodu, co zapewni znacznie zmniejszenie masy pojazdu (np. samochody osobowe tradycyjne do 25% redukcji masy do roku 2035, a samochody elektryczne aż do 35%) (rys. 20).

Uważa się, że realizacja tak ambitnej strategii w przypadku głównego światowego producenta odlewów nie będzie możliwa bez szerszego zastosowania nowych technologii i materiałów, w tym SSM, szczególnie technologii thixomolding oraz nowych tworzyw ultralekkich, zwłaszcza na bazie stopów magnezu.

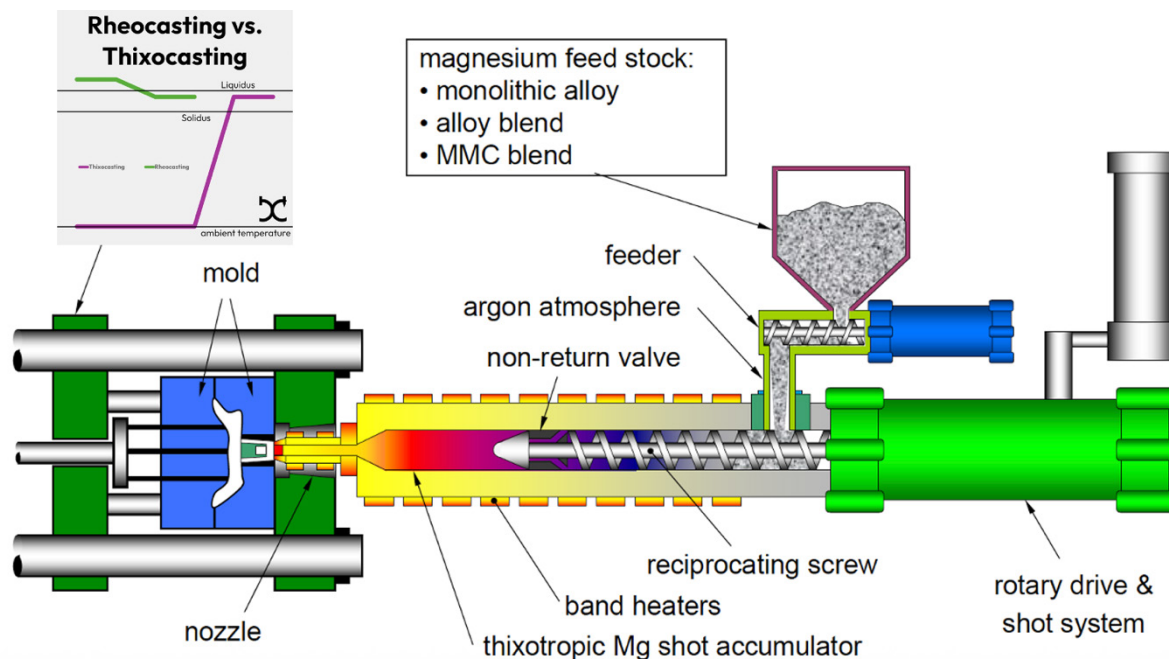
W ujęciu ogólnym, technologia thixomolding, wywodząca się z praktyki wytwarzania wyrobów z mas plastycznych, która na dzień dzisiejszy znalazła zastosowanie jedynie do tworzyw na bazie Mg, polega na dawkowaniu do zbiornika stosownego urządzenia (ślimakowej prasy hydraulicznej) uprzednio przygotowanych kawałków (chips) wybranego monolitycznego stopu magnezu, mieszaniny stopów lub kawałków komponentów kompozytu na bazie magnezu (kawałki magnezu lub stopu magnezu plus wybrana faza ceramiczna) (rys. 20).

Tak przygotowany materiał wsadowy trafia do wstępnego podajnika śrubowego a następnie do głównego podajnika śrubowego, który jest sukcesywnie podgrzewany tym intensywniej, im wsad znajduje się bliżej wejścia do dyszy wtryskowej, prowadzącej do wnęki formy w taki sposób, aby wsad uzyskał stan ciekło-staty, umożliwiając jego wprowadzenie pod ciśnieniem do formy i tym samym ukształtowanie gotowego wyrobu (analogiczne jak w przypadku klasycznego odlewania ciśnieniowego). Całość procesu realizowana jest w ochronie gazów obojętnych, najczęściej argonu i nie wymaga stosowania gazów aktywnych, często szkodliwych, w tym sześćfluorku siarki SF₆.

Obrazowo rzecz ujmując, różnica pomiędzy technologią rheocasting i thixocasting polega na sposobie generowania zmian temperatury procesów (vide rysunek 20 po lewej stronie na górze rysunku). W przypadku technologii rheocasting wsad ze stanu ciekłego jest schładzany do stanu ciekło-statego; w przypadku technologii thixocasting stan wyjściowy wsadu odnosi się do temperatury pokojowej.



Rys. 20. Chińska mapa drogowa, dotycząca redukcji masy w pojazdach (od góry): samochody osobowe silnikowe, samochody osobowe elektryczne, samochody o dużej ładowności, traktory, autobusy [22]



Rys. 21. Schemat procesu thixocasting w przypadku wytwarzania wyrobów z tworzyw na bazie magnezu (dzięki uprzejmości Helmholtz Zentrum Geesthacht Centre for Materials and Coastal Research oraz [24])

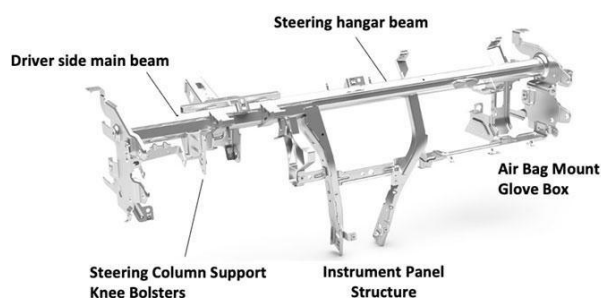
Ostatnie lata przyniosły burzliwy rozwój technologii thixocasting, przejawiający się w konstrukcji nowej generacji gigamaszyn ciśnieniowych, głównie w Chinach. Warto zauważyć, że początki rozwoju technologii thixocasting zawiązane są z firmami Husky (Kanada) oraz JSW (Japonia). Wymienionym firmom nie udało się szerzej tej technologii w jej początkach rozpropagować i wróciła ona do głównego nurtu rozwoju, gdy rząd chiński zaczął wspierać przetwórstwo stopów magnezu. Wtedy jedną z pierwszych firm, która niezwykle intensywnie rozpoczęła działalność w tym właśnie kierunku była firma Yizumi.

Firma Haitian wprowadziła już na rynek maszynę o sile zwierania 3600 ton, wykorzystywaną głównie do masowej produkcji felg i poprzecznych belek samochodowych (CCBs – cross car beams) o masie 6,1 kg i długości 1,4 m (rys. 21). Branża poczyniła znaczne postępy w doskonaleniu technologii dzięki maszynie o sile zwierania 3000 ton z podwójnym wtryskiem (Haitian) oraz modelom 3600 T (Haitian) i 4000 T (Bole).

W ciągu ostatnich dwóch lat nastąpił gwałtowny rozwój większych maszyn: 4000 T (TPI – kraj) oraz 3600 T (Haitian) z możliwością przekształcenia istniejących maszyn ciśnieniowych na maszyny do tiksomoldingu.

Obecnie tytuł największej działającej maszyny Thixomolding należy do maszyny o sile zwierania 4000 ton, której masa wtrysku wynosi 17 kg (MTX 4000 firmy Bole) (rys. 22). Największa na świecie maszyna o sile zwierania 7000 ton i masie wtrysku do 25 kg będzie gotowa do połowy bieżącego roku (Haitian Metal), a maszyna 6000 T z masą wtrysku 30 kg (Bole) i 5000 T (Yizumi) są planowane do zainstalowania pod koniec 2025.

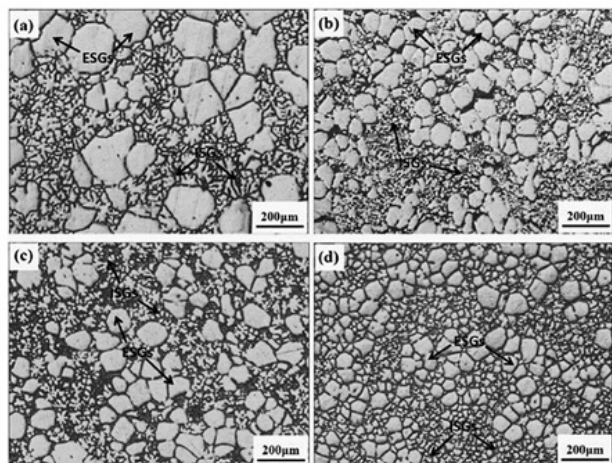
Jak już uprzednio wspomniano, typowa struktura odlewów SSM – na przykładzie stopów magnezu – charakteryzuje się globularyzacją głównego składnika strukturalnego – roztworu stałego Mg (rys. 23). Ten rodzaj struktury gwarantuje podwyższony poziom właściwości wytrzymałościowych, nawet wyższy od wytrzymałości odlewów prasowanych w stanie ciekłym, technologia wykonywania których uchodziła za technologię odlewniczą, gwarantującą najwyższy osiągalny poziom właściwości.



Rys. 22. Tiksotropowy odlew poprzecznej belki samochodowej (CCB) (a) i gotowa część zamontowana w samochodzie [25, 26]



Rys. 23. Maszyna BOLE MTX4000D o sile zwierania 4 000 ton do technologii thixomoulding stopów magnezu oraz odlewy magnezowe wykonane na maszynie o sile zwierania 1600 ton. Maksymalna masa odlewów Mg wynosi 17 kg



Rys. 24. Mikrostruktura odlewu ze stopu MgRe-3Zn1Y1,4% wag., wytworzonego technologią new rheocasting RSC (rheo-squeeze casting – RSC) w zależności od przyłożonego ciśnienia prasowania: odlew grawitacyjny (a), zakrzepły pod ciśnieniem 50 MPa (b), 100 MPa (c) oraz 200 MPa (d) [27]

Możliwości dodatkowego umocnienia stopów magnezu kryją się w zastosowaniu zbrojenia osnowy magnezowej fazą ceramiczną, np. SiC (tab. 3) [27].

Odlewy ze stopów magnezu w przemyśle obronnym

Odlewnictwo metali od tysięcy lat aż po dzień dzisiejszy służy ludzkości w zapewnieniu jej bezpieczeństwa (rys. 25).

Według informacji, pozyskanej ze źródeł rządowych w Polsce, która ma największą w Unii Europejskiej fa-

brykę dronów, otwiera się perspektywa powstania dolin dronowych, opartych na wspólnych polsko-ukraińskich technologiach, uwzględniających fakt, że Ukraina w zeszłym roku wyprodukowała 4,5 mln dronów, w tym autonomicznych aparatów latających o wysokich, do tej pory niespotykanych parametrach użytkowych [30].

Przykładowa materiałowa mapa konstrukcji tradycyjnego drona obejmuje ramę i obudowę, gdzie stosowane są stopy aluminium do przeróbki plastycznej w gatunku 6061 i 7075, elementy nośne, w tym ramiona do mocowania śmigieł (Ti6Al4V, włókna węglowe), łożyska i wały silnikowe (stal nierdzewna w gatunku 440C), części układu elektrycznego (czysta miedź i stopy Cu), śruby i elementy montażowe (stal nierdzewna, anodowane aluminium). Zastosowanie lekkich materiałów do wytwarzania części metodami ciekło-fazowymi, odkrywa ogromną szansę dla odlewnictwa stopów aluminium i magnezu, zwłaszcza technologii odlewania pod ciśnieniem, w tym metod SSM, gdzie oprócz typowych stopów odlewniczych, również stopy do przeróbki plastycznej mogą znaleźć zastosowanie, szczególnie w postaci technologii podwójnego zastosowania (dual use technology). To może być istotne wyzwanie dla krajowych odlewni w pomyślnej realizacji konwersji konstrukcji, materiałów i technologii dla części odlewanych w wymagającym przemyśle obronnym.

Z powodzeniem podejmowane są pierwsze próby zastosowania stopów magnezu na ramy i inne części dronów [31].

Wydział Odlewnictwa AGH we współpracy z Wydziałem Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Akademickim

Tabela 2

Właściwości wytrzymałościowe odlewów magnezowych grupy AZ (wytrzymałości na rozciąganie, granica plastyczności i wydłużenie), wyznaczone na próbkach wycinanych z odlewów ciśnieniowych (HPDC), metodami SSM (thixomolding, new rheocasting i jego odmianami (TBR, RDC, FCS, LAO), w tym po odlewaniu grawitacyjnym, w stanie lonym oraz po obróbce cieplnej (T4) [27]

Table 1. Mechanical properties of AZ series alloys prepared by different rheoforming processes in comparison with those produced by conventional HPDC, squeezing casting and thixomolding processes.

Alloy	Process	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Reference
AZ91D	HPDC	146	212	3.3	[174]
AZ91D	HPDC	144	200	2.5	[125]
AZ91D	Thixomolding	–	240	4.5	[162]
AZ91D	New-rheocasting (NRC)	–	230	5.5	[176]
AZ91D	TBR Rheo-diecasting	138	225	4.5	[126]
AZ91D	RCP Rheo-HPDC	157	255	2.3	[175]
AZ91D	Rheo-diecasting (RDC)	145	248	7.4	[133]
AZ91D	Rheo-diecasting (RDC)+T4	91	230	11.2	[158]
AZ91D	Rheo-diecasting (RDC)+T5	133	236	6.5	[158]
AZ91D	Rheo-diecasting (RDC)+T6	134	255	6.7	[159]
AZ91D	Rheo-diecasting (RDC)+Tx	132	249	9.1	[159]
AZ91D	FCS Rheo-HPDC	169	265	7.1	[61]
AZ91D	FCS Rheo-HPDC+T4	110	270	11.3	[61]
AZ91D	FCS Rheo-HPDC+T6	171	282	5.8	[61]
AZ91D	Rheomoulding	169	271	7.3	[141]
AZ91	Squeeze casting	104	183	4.5	[178]
AZ91	LAO-rheocasting	–	225	5.4	[128]
AZ91	New-rheocasting (NRC)	125	210	4.0	[79]
AZ91	New-rheocasting (NRC)+T4	120	240	10	[79]
AZ71	New-rheocasting (NRC)	98	185	4.7	[178]
AZ71	New-rheocasting (NRC)+T4	88	262	11.2	[178]
AZ81	Rheo-diecasting (RDC)	143	236	9.2	[13]
AZ61	Rheo-diecasting (RDC)	126	253	12.3	[13]
AZ31	Rheo-rolling	–	232	6	[150]
AZ91-2Ca	Rheo-squeeze casting (RSC)	–	178	3.3	[73]
AZ91-2Ca	Rheo-squeeze casting (RSC)+T4	–	200	5.3	[73]
AZ91-2.45n	Semisolid gravity casting	–	217	8.11	[182]

Centrum Materiałów i Nanotechnologii, odlewnią NeoCast Technologie Metali Lekkich, w porozumieniu z firmami Frech Polska i IDRA Srl. z Włoch oraz Thompson Aluminum Casting Company z USA, jeszcze w styczniu 2024 zgłosił na konkurs do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju propozycję badawczą pod tytułem „Zastosowanie konwersji materiałowo-technologicznej do opracowania innowacyjnych technologii z udziałem fazy ciekłej do wytwarzania części maszyn i urządzeń służących ochronie indywidualnej (MagMilPol)” w grupie

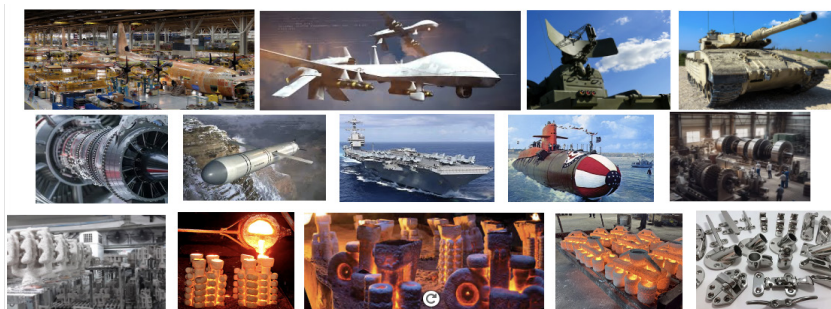
projektów PERUN-1 z zakresu obronności i bezpieczeństwa państwa (DOB). Projekt zakłada opracowanie i optymalizację technologii wytwarzania ultralekkich stopów magnezu do produkcji komponentów do przenośnych dronów wielozadaniowych, elementów broni palnej i/lub obudowy przenośnej radiostacji. Priorytetowe korzyści obejmują redukcję masy, doskonałą zdolność do tłumienia drgań oraz wysoką skuteczność ekranowania elektromagnetycznego, co przyczyni się do zwiększenia ochrony indywidualnej żołnierzy i poprawy ich mobilności na polu walki. Cele projektu mają być osiągnięte poprzez efektywne wykorzystanie istniejących technologii wytwarzania do nowego tworzywa, mało rozpoznanego na rynku krajowym. Wprowadzenie innowacyjnych procesów, zwłaszcza związanych z fazą ciekłą, pozwoli na znaczący wzrost poziomu technologicznego w dziedzinie obronności. Projektowane technologie, w tym technologie związane z odlewaniem pod ciśnieniem i SSM, są kierowane do krajowych prywatnych przedsiębiorców oraz państwowych spółek związanych z militarnym sektorem bezpieczeństwa, dostarczających niezbędny sprzęt dla polskiego przemysłu zbrojeniowego. W aspekcie merytoryczno-organizacyjnym i logistycznym, projekt przewidywał utworzenie w Polsce Centrum Magnezu, jako nieformalnego związku organizacji akademickich, naukowych, badawczych, stowarzyszeniowych i producenckich, działających w zakresie teorii i praktyki wyrobów magnezowych oraz organizacji ich wdrożeń w przemyśle, zwłaszcza obronnym. Jednym z przejawów aktywności aplikacyjnej grupy przyszłych wykonawców projektu był ich udział w dniach 3–6 września 2024 r. w Międzynarodowym Salonie Przemysłu Obronnego (MSPO) w Kielcach (rys. 26).

W części wystawienniczej zaprezentowano szereg odlewów ze stopów magnezu, w tym wykonane w firmie NeoCast: element robota humanoidalnego Surena4 (stop AZ91, masa 0.5 kg, wymiary: 50x15x10 cm) (rys. 27a), felgi do pojazdów typu go-kart (masa 0.5 kg, wymiary: 30x10x10 cm) (rys. 27b), wirnik silnika do śmigłowca (stop RZ5, masa 3 kg, wymiary: 30x30x5 cm) (rys. 27c) oraz odlew obudowy silnika lotniczego

Tabela 3

Właściwości mechaniczne kompozytu MgZn6/20% obj. SiC (cząsteczki SiC o średnicy 3,3 μm) na przykładzie modułu Younga, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i plastyczności w porównaniu z monolitycznym stopem Mg6ZnZr. Badane materiały poddano obróbce cieplnej [28]

Materiał	Stan stopu/osnowy	Właściwości mechaniczne			
		E, GPa	R _{0,2} , MPa	R _m , MPa	A, %
Stop Mg-5,5%Zn-0,5%Zr	T5	45	305	365	11
Kompozyt Mg-6%Zn/SiC	F	62	260	306	1,3
Kompozyt Mg-6%Zn/SiC	T4	73	284	396	3,4
Kompozyt Mg-6%Zn/SiC	T6	73	383	427	1,2



Rys. 25. Kolaż zdjęć, ilustrujący zastosowanie odlewów w przemyśle obronnym na lądzie, na morzu i w powietrzu [29]

(stop AZ91, masa 3 kg, wymiary: 40x40x16 cm) (rys. 27d). Firma Thompson Aluminium Casting Co. zaprezentowała unikatowy magnezowy odlew wirnika śmigłowca, chociaż jej możliwości wytwórcze jako jednego z głównych dostawców wyrobów ze stopów magnezu dla potrzeb wojsk lotniczych układu NATO i armii USA są znacznie większe (rys. 28).

Rozwój wysokotemperaturowej inżynierii ciekłego metalu

Na Wydziale Odlewnictwa AGH działa Laboratorium Inżynierii Ciekłego Metalu (LMELab – Liquid Metal Engineering Laboratory), powstałe wskutek utworzenia konsorcjum naukowo-badawczego przez AGH, Wydział Odlewnictwa, z Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN im. Aleksandra Krupkowskiego (IMIM PAN). W centrum zainteresowań naukowych LMELab są wysokotemperaturowe badania oddziaływania wzajemnego w układzie ciekły (ciekło-stały) metal (stop)/ciało stałe. Badania pozwalają nie tylko na śledzenie kinetyki procesu zwilżania, ale także na identyfikację faz i wydzielenia na granicy rozdziału materiałów. Dane, uzyskiwane na unikatowym, mobilnym stanowisku badawczym są wprost niezbędne do modelowania, symulacji i opracowania nowych materiałów o zadanym poziomie właściwości, doborze stopów i materiałów pomocniczych do technolo-

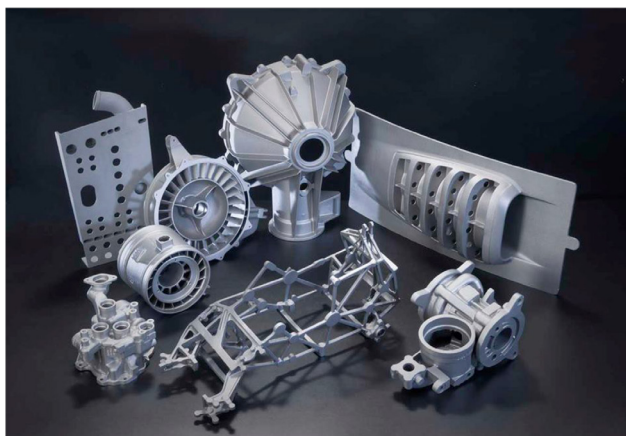
Rys. 26. Przedstawiciele Międzynarodowego Konsorcjum Naukowo-Przemysłowego w trakcie trwania Międzynarodowego Salonu Przemysłu Obronnego w Kielcach, 2–4.09.2025. Od lewej dr Karol Janus (WO AGH), Paweł Dartak (właściciel NeoCast), Iwona Gruza (NeoCast), prof. Jerzy J. Sobczak (WO AGH) i Robert M. Purget (TAC)

gii wytwarzania odlewów, optymalizacji procesu czy precyzowania wytycznych materiałowo-konstrukcyjno-technologicznych we wszelkich procesach łączenia (spawanie, lutowanie, technologie przyrostowe, zwłaszcza laser spark synthesis), w tym syntezy materiałów monolitycznych i funkcjonalnych gradientnie (w tym metalowych i ceramicznych materiałów kompozytowych).

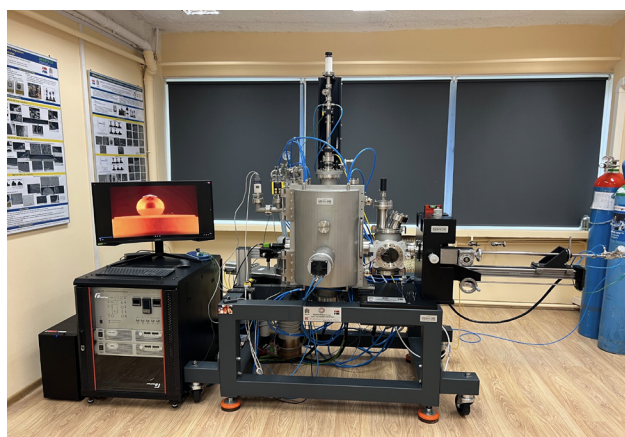
Autorskie urządzenie SMART (Special Device for Measurements in Advanced Research at High Temperature), nagrodzone Złotym Medalem MTP ITM Industry Europe 2021, Modernlog w kategorii „Nauka dla Gospodarki”, składa się z następujących elementów: wysokotemperaturowej komory badawczej, zespołu kapilarnego dozowania ciekłego metalu (mechanizm kroplówki), komory załadunkowej (do 6 próbek), manipulatora komory załadunkowej (5-cio osiowego), analizatora gazów



Rys. 27. Odlewy ze stopów magnezu przeznaczone dla przemysłu obronnego, wykonane w firmie NeoCast Technologie Metali Lekkich



Rys. 28. Odlewy z nowoczesnych stopów magnezu, przeznaczone dla przemysłu obronnego Stanów Zjednoczonych oraz krajów paktu NATO (dzięki uprzejmości Thompson Aluminum Casting Co.)

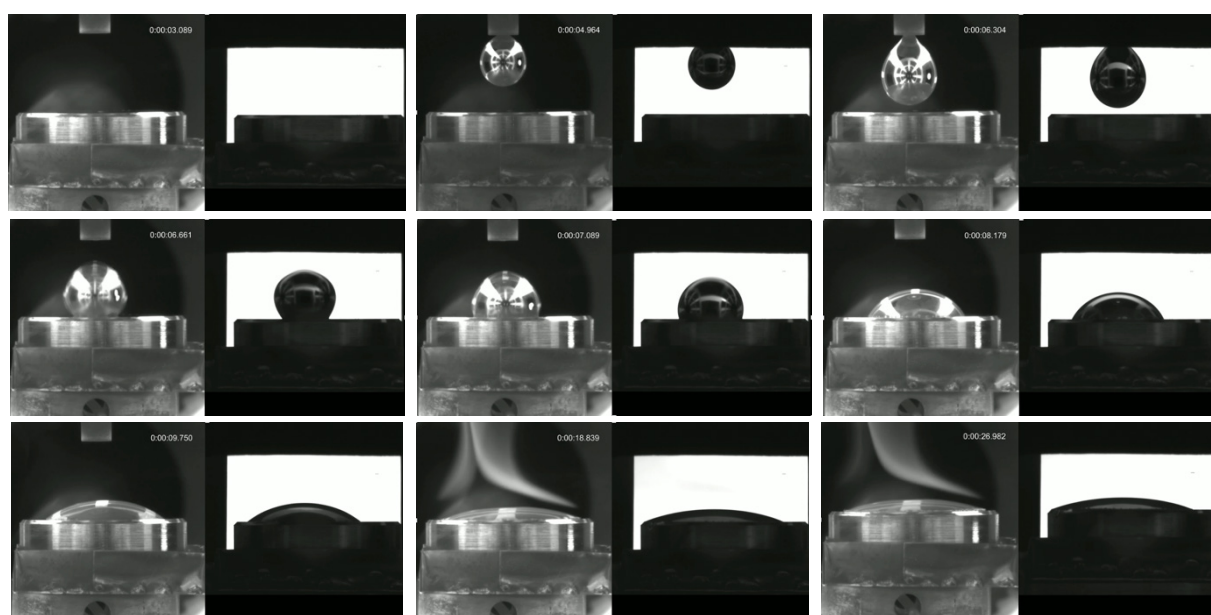


Rys. 29. Widok ogólny mobilnego kompleksu badawczego SMART w Laboratorium Inżynierii Ciekłego Metalu LMELab Wydziału Odlewnictwa AGH (Katedra Tworzyw Formierskich, Technologii Formy i Odlewnictwa Metali Nieżelaznych). Wersja z 2024 roku

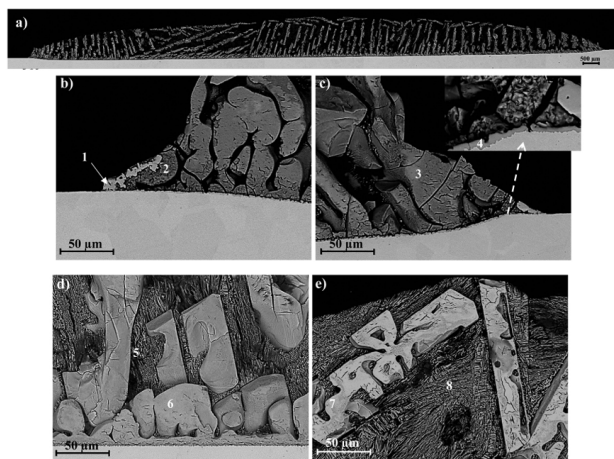
reszkowych, kamer pomiarowych (w tym termowizyjnej), ruchomej platformy, systemu sterowania i rejestracji elektronicznej (rys. 29). Mobilne stanowisko do wysokotemperaturowych badań właściwości ciekłych metali, stopów, szkieł, żużli i innych substancji w szerokim zakresie temperatury topienia służy do wyznaczania ich charakterystyk oraz oddziaływania ciekłej materii z podłożami stałymi. Stanowisko umożliwia prowadzenie badań w zakresie od temperatury pokojowej do 2100°C. Urządzenie wykonane zostało w technice wysokiej próżni i umożliwia pracę w zakresie od ciśnienia atmosferycznego do 10^{-7} mbar oraz w atmosferze gazów neutralnych (ochronnych) lub aktywnych. Po uzyskaniu w komorze wysokiej próżni na poziomie 10^{-6} mbar możliwe jest uruchomienie procesu grzania podłoża i kroplówki do wymaganej temperatury eksperymentu. Zachowanie i oddziaływanie stopionego materiału

z podłożem obserwowane jest za pomocą szybkich kamer usytuowanych w dwóch prostokątnych względem siebie kierunkach. Aparatura wyposażona jest w analizator gazów reszkowych, umożliwiającego identyfikację gazów wydzielających się w trakcie procesu grzania i oddziaływania wzajemnego w układzie ciecz/ciało stałe w wysokiej temperaturze. Istnieje możliwość rozdzielenia obszaru grzania kroplówki z obszarem grzania podłoża wraz z możliwością szybkiego wprowadzenia podłoża do obszaru badanego z obszaru o temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej. Umożliwia to ułożenie kropli ciekłego metalu na zimne podłoże, pozwalając tym samym na badanie procesów zbliżonych do warunków rzeczywistych, występujących w trakcie procesu odlewania.

W badaniach dokonuje się obserwacji i pomiarów w czasie rzeczywistym w atmosferze gazów lub w wy-

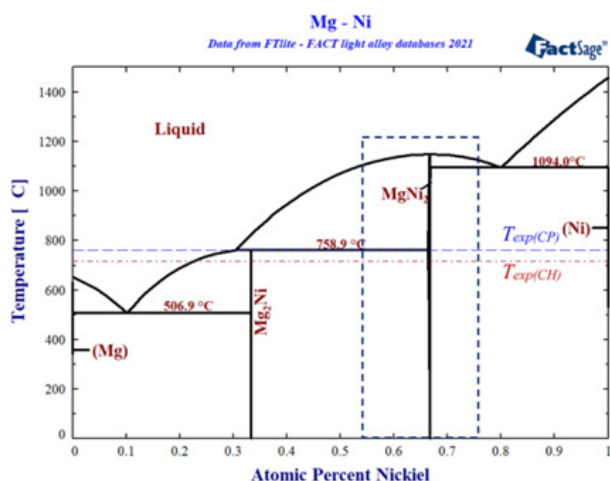


Rys. 30. Kinetyka zwilżalności w układzie ciekły magnez/nikiel (poszczególne kadry z zapisu przebiegu procesu oddziaływania wzajemnego w temperaturze 760°C w czasie 30 s) (na podstawie [32]). Białe smugi na kroplę, szczególnie widoczne na kadrach (h) i (i) to pary magnezu



Rys. 31. Obrazy SEM przekroju poprzecznego pary Mg/Ni uzyskane metodą kropli leżącej z użyciem procedury CP (760°C; 30 s), wykonane detektorem BSE przy różnych powiększeniach: (a) widok ogólny (100x); (b, c) lewa i prawa krawędź; (d) granica rozdziłu (interface) w centralnej części kropli; (e) górna powierzchnia kropli; (b)–(e) powiększenie (1000x); (c) wstawiony obraz przedstawia powiększony fragment narożnika (c) pod powiększeniem 5000x

sokiej próżni, docelowo w temperaturze do 2100°C. Możliwa jest wizualizacja zjawisk interakcji w układach ciec/ciałostate/półstate, rejestracja zjawisk w układach niereaktywnych i reaktywnych za pomocą wysokorozdzielczych kamer monochromatycznych oraz kamery termowizyjnej. Układ eksperymentalny (urządzenie i metoda badawcza) objęty jest europejską ochroną patentową. Mobilność aparatury umożliwia podjęcie badań in situ np. z zastosowaniem synchrotronu. Możliwości badawcze stanowiska SMART obejmują metodę kropli leżącej, wiszącej, toczącej się (dzięki zastosowaniu przechylnego stołu pomiarowego), metodę dużej kropli, łączenia wymienionych metod (do czterech w jednym cyklu pomiarowym), prowadzenie pomiarów izotermicznych i nieizotermicznych, oczyszczanie kapilarne. Może zostać zastosowana procedura odsysania, przenoszenia, przechylania kro-

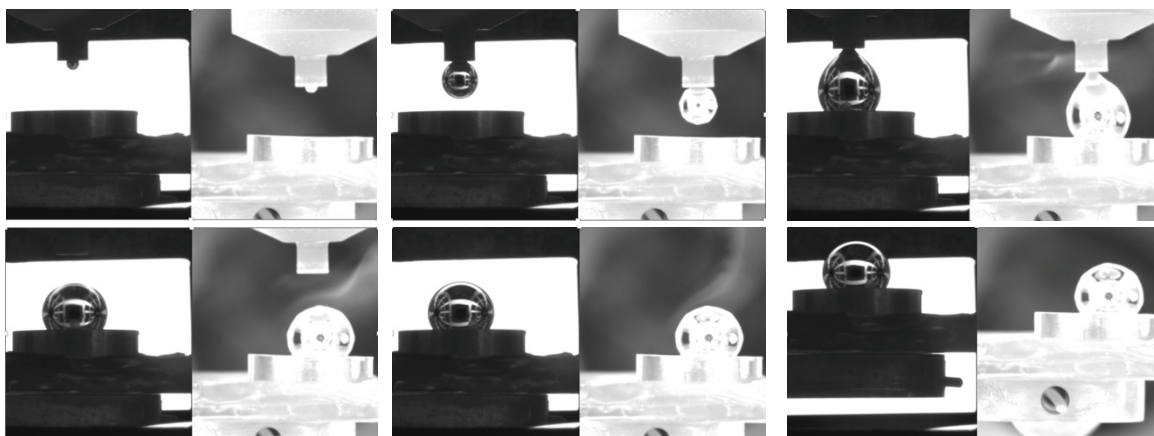


Rys. 32. Wykres równowagi fazowej układu Mg-Ni [33]

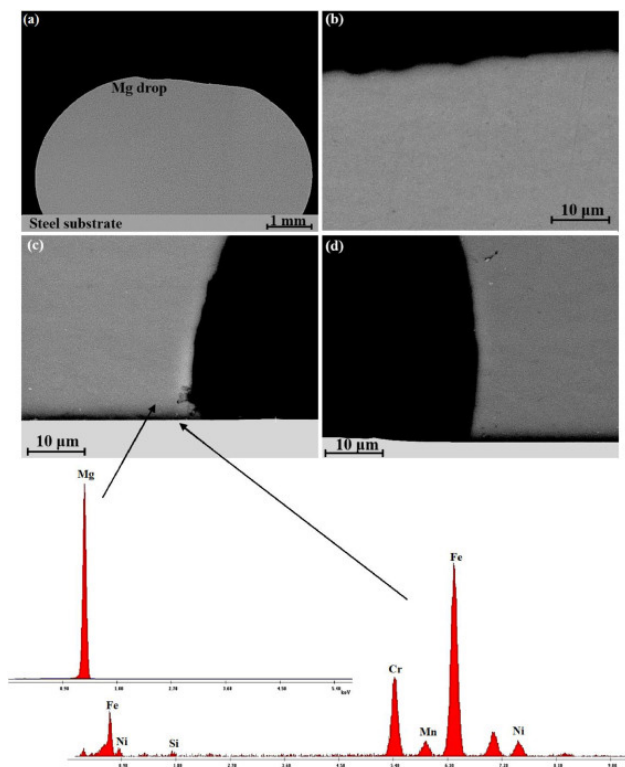
pli, synteza stopu in situ w trakcie badań i realizacja cykli grzania, wyznaczenie wysokotemperaturowych charakterystyk procesu oddziaływania wzajemnego: pomiary kąta Younga w funkcji czasu, napięcia powierzchniowego, gęstości, lepkości, pracy adhezji, badanie procesów topnienia, krystalizacji, zwilżania, rozpuszczalności (rozpuszczania się) i infiltracji, analiza gazów resztkowych.

Typowe przykłady kinetyki oddziaływania wzajemnego ciekłego magnezu z podłożami stałymi przedstawiono na kolejnych rysunkach.

W przypadku oczyszczania kapilarnego ciekłego metalu (zastosowanie tzw. procedury CP – capillarity purification), beztlenna kropla Mg wykazuje wystąpienie zjawiska zwilżania na podłożu Ni w czasie poniżej sekundy, po którym następuje szybkie rozprzestrzenianie się i dobre zwilżanie na podłożu niklowym (rys. 30) [31]. Analiza SEM/EDS przekroju poprzecznego pary Mg/Ni pozwala na stwierdzenie, że szybkie rozprzestrzenianie się ciekłego Mg po podłożu Ni jest związane z reaktywnym zwilżaniem, w którym dominującą rolę odgrywa mechanizm rozpuszczania. Powoduje to znaczące zmiany strukturalne po zestaleniu początkowo czystego Mg, który już podczas testu zwilżalności

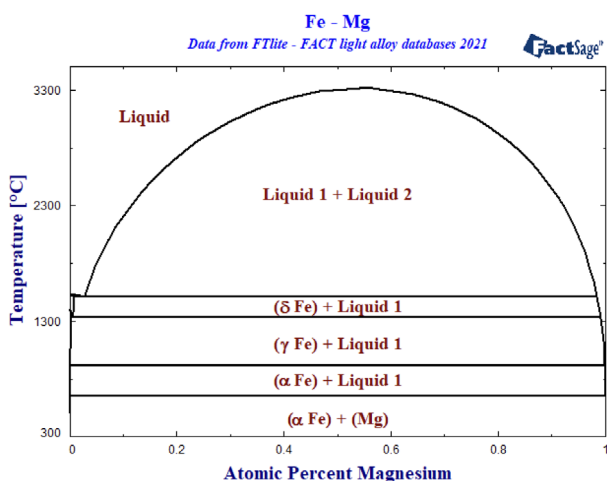


Rys. 33. Kinetyka zwilżalności w układzie ciekły magnez/stal AISI 316L (poszczególne kadry z zapisu przebiegu procesu oddziaływania wzajemnego w temperaturze 720°C w czasie 40 s). Zastosowano metodę kropli leżącej wraz z procedurą oczyszczania kapilarnego CP (na podstawie [34])



Rys. 34. Obrazy SEM/BSE przekroju pary Mg/AlSi 316L po teście zwilżalności w temperaturze 720°C w przepływającej mieszance Ar + 5 % mas. H₂: (a) widok ogólny (powiększenie 50x); (b) górna część powierzchni kropli, (c, d) odpowiednio prawa i lewa krawędź kropli; (b-d) powiększenie 5000x; (e) widma EDS analizy punktowej zaznaczonej w (c)

tworzy złożoną strukturę zestaloną złożoną z bogatych w nikiel kryształów fazy $MgNi_2$, otoczonej niewielką ilością eutektyki $Mg_2Ni + Mg$ i reaktywnie utworzonej międzyfazowej warstwy $MgNi_2$. (rys. 31). Mamy więc tutaj do czynienia z reaktywnym zwilżaniem niklu przez ciekły magnez, co jest możliwe dzięki dwóm zachodzącym mechanizmom: rozpuszczaniu Ni w ciekłym Mg i tworzeniu nowych produktów reakcji i pojawieniu się nowych powierzchni rozdziłu, jednak dominuje zwilżanie wskutek procesu rozpuszczania.



Rys. 35. Wykres równowagi fazowej układu Fe-Mg [33]

Otrzymane wyniki pozostają w pełnej zgodności z wykresem równowagi fazowej układu Mg-Ni (rys. 32) według zasady bez reaktywności nie ma zwilżalności, a szerzej: w wysokotemperaturowych układach ciekło-fazowych brak reaktywności pomiędzy kontaktującymi się materiałami — widoczny na wykresach równowagi fazowej — oznacza brak zwilżalności, a tym samym brak istotnego oddziaływania między składnikami układu. Przedstawione wyniki badań dobitnie pokazują, że czysty Ni i stopy bogate w Ni nie nadają się jako materiały do bezpośredniego długotrwałego kontaktu z ciekłym magnezem, w tym jako łyżki, tygle, kokile i na inne oprzyrządowanie metalurgiczne lub części aparatury i urządzeń stosowanych do wysokotemperaturowych badań ciekłego Mg i jego stopów. Wszelako z drugiej strony, dobre zwilżanie i rozpuszczanie się ciekłego Mg na podłożu niklowym sugeruje, że Ni jest dobrym kandydatem do zastosowania jako pokrycie technologiczne w łączeniu Mg z różnymi materiałami niezwilżalnymi, a także w syntezie odlewanych kompozytów magnezowych, materiałach wielowarstwowych i innych układach heterogenicznych z udziałem magnezu.

W przypadku pary Mg/stal AISI 316L^{1/} zjawisko zwilżalności i jakiegokolwiek trwałego wiązanie z podłożem nie występują (rys. 33).

Stwierdzone zjawiska braku oddziaływania w układzie można przypisać niereaktywnemu charakterowi układu Mg-Fe ze względu na znikomą rozpuszczalność żelaza w ciekłym Mg i brak tworzenia jakichkolwiek produktów reakcji międzyfazowej (rys. 33 i 34). Podobne do omawianych, unikalne wyniki badań, dotyczące wysokotemperaturowych właściwości magnezu w kontakcie ze stalą AISI 316L uzyskano także w przypadku podłoży z molibdenu i tantalu [34]. Mają zarówno znaczenie naukowe, jak i praktyczne, albowiem jednoznacznie sugerują perspektywiczne możliwości zastosowania tych materiałów na niezwilżalne oprzyrządowanie odlewnicze (łyżki, tygle, kokile) w przypadku pracy z ciekłym magnezem i jego stopami. Oprócz tego pomiary dostarczyły wiarygodne dane o właściwościach materiałowych, które mogą być wykorzystane przez sztuczną inteligencję do opracowania nowych stopów na bazie Mg i procesów z udziałem magnezu.

Metodologia badań na opisanym kompleksie SMART to znakomite narzędzie do opracowania bądź optymalizacji procesów, m.in. doboru:

- pokrycia na robocze powierzchnie form do odlewania pod ciśnieniem, nowych tworzyw na odlewy, materiału form i rdzeni, szczególnie w przypadku nowych procesów z udziałem ciśnienia zewnętrznego, takich jak rheocasting, thixocasting i thixomoulding,
- materiału preform, wkładek, lokalnych struktur w przypadku materiałów heterogenicznych (kompozytowych i funkcjonalnie gradialnych).

Podsumowanie i wnioski końcowe

1. Wytwarzanie wyrobów w stanie ciekło-statym (SSM), będący procesem z pogranicza odlewnictwa

i przeróbki plastycznej staje się coraz powszechniejszym sposobem otrzymywania precyzyjnych – near net shape – bezporowatych wyrobów o wysokich parametrach użytkowych. Technologia SSM jest energooszczędna, proekologiczna i racjonalna ekonomicznie.

2. SSM pozwalają na zastosowaniem stopów do przeróbki plastycznej oraz kompozytów odlewanych w wytwarzaniu wysokojakościowych odlewów, głównie na bazie aluminium i magnezu.
3. Burzliwy rozwój filozofii megaodlewnia (gigacasting, hypercasting) pod ciśnieniem stopów aluminium i magnezu stał się faktem, również w odniesieniu do wariantu thixomolding w przypadku odlewów magnezowych.
4. Współczesne metody wysokotemperaturowej inżynierii ciekłego metalu pozwalają na dalsze doskonalenie technologii SSM i megaodlewnia w kierunku dualnych sposobów wytwarzania (dual use methods) wyrobów monolitycznych i heterogenicznych (o wysokim kompleksie charakterystyk użytkowych, w tym także wyrobów kompozytowych i struktur funkcjonalnie gradialnych – functional graded structures).

Literatura

17. B. Liu, J. Yang, X. Zhang et al.: Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review/Journal of Magnesium and Alloys 11 (2023), pp. 5–47
18. Mordor Intelligence Research & Advisory. (2024, June). Automotive Parts Magnesium Die Casting Market Size & Share Analysis – Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030). Mordor Intelligence. Retrieved June 26, 2025, from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-parts-magnesium-die-casting-market>
19. <https://www.ceaf.eu>
20. https://www.intlmag.org/page/basics_about_mg_ima
21. Jianyue Zhang, Jiashi Miao, Nagasivamuni Balasubramani, Dae Hyun Cho, Thomas Avey, Chia-Yu Chang, 22. Alan A. Luo: Magnesium research and applications: Past, present and future, Journal of Magnesium and Alloys 11 (2023), pp. 3867–3895
23. Energy-saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0, Reseach in China
24. <https://straitsresearch.com/report/magnesium-alloys-market>
25. <https://casting-campus.com/the-difference-between-thixocasting-and-rheocasting/>
26. <https://aec.org/page/cross-car-beam>
27. <https://www.kirchhoff-automotive.com/products/cars/cross-car-beam>
28. Chang, Z., Su, N., Wu, Y., Lan, Q., Peng, L., & Ding, W. (2020). Semisolid rheoforming of magnesium alloys: A review. Materials & Designs, 195 108990. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108990>
29. Martin A., LLorca J. Mechanical behavior and failure mechanisms of a binary Mg – 6%Zn alloy reinforced with SiC particulates (1995), Mater. Sci. Eng., A201, pp. 77–87
30. https://www.google.com/search?sca_esv=2c636b0d29aca8be&sxsrf=ADLYWIJNOIMRKLToUdEHpyrbn-1zvi7aADw:1731500091110&q=process+investment+castings+for+defence+industry&uds=ADvngMjcH-0KdF7qGWtwTBrP0nt7dwYJ7P-tUL5lrstfaFJZlkhnTBCyB3PAmDS5N2oFbu1A0OvcVLQTJMuCySAkSYGi-GCQLvYQfbwvu3Wg5Nwvznpg8I9yVBHLPbuu-Ker2ptBeb5ZHHbkvh_5K4EbbDJor3nXBptaEvgfbrT_z-dy4HMXVjtdDqbXhrhdriNztLSNJlpD6&udm=2&sa=X&ved=2ahUKEwjawO--pNmJAXU_SvEDHeJ0O-W8QxKsJegQICxAB&ictx=0&biw=1716&bih=524&dpr=1#vhid=buwYDcP3hgwyGM&vssid=mosaic
31. Samodzielność nie znaczy samotność. Rozmowa Polityki z Radostawem Sikorskim (2025), Polityka nr 16 (3511), s. 24–27
32. <https://polish.magnesiumcast.com/supplier-460561-magnesium-alloy-drone-frame>
33. Terlicka S., Sobczak N., Maj Ł., Dartak P., Sobczak J.J. Wettability, reactivity, and interface structure in Mg/Ni system, Journal of Magnesium and Alloys., 2024, 12, 2, pp. 659–672
34. FactSage version 8.2 with FTLite database. Available online: [https:// www.crct.polymtl.ca/fact](https://www.crct.polymtl.ca/fact) (accessed on 01 June 2023)
35. Terlicka S., Sobczak N., Janus K., Sobczak J.J. Wetting behavior of Mo, Ta, and stainless steel substrates in contact with molten Mg., Journal of Magnesium and Alloys., 2025, 13, 3, 2025, pp. 1149–1159

Artykuł powstał na bazie prezentacji, wygłoszonej przez Jerzego J. Sobczaka w trakcie XVII Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Innowacje w Odlewnictwie Ciśnieniowym” 19 maja 2025 roku w Gdańsku [3].

Podziękowania

Autorzy wyrażają wdzięczność prof. Natalii Sobczak i dr Sylwii Terlickiej z Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN im. A. Krupkowskiego w Krakowie za ożywioną i inspirującą analizę uzyskanych wyników w zakresie wysokotemperaturowego oddziaływania wzajemnego w układach ciekły magnez/ciało stałe. Autorzy dziękują przedstawicielom firmy NeoCast Technologie Metali Lekkich oraz firmie Thompson Aluminum Casting Co.) za udostępnienie fotografii i danych, dotyczących produkowanych przez nich odlewów ze stopów magnezu.

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 w latach 2022–2025.