

## STAN OBECNY I PERSPEKTYWY ROZWOJU BADAŃ NAD LEJNOŚCIĄ METALI I STOPÓW

MUTWIL Jerzy, BYDAŁEK Andrzej, NIEDŹWIEDZKI Dariusz  
Instytut Inżynierii Produkcji i Materiałoznawstwa, Politechnika Zielonogórska  
65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50, POLAND

### STRESZCZENIE

W opracowaniu dokonano oceny współczesnych badań nad lejnością metali i stopów. Wykazano brak istotnego postępu w rozwoju najczęściej stosowanych technik pomiarowych. Przedstawiono koncepcje badań, które mogą się przyczynić zarówno do rozwoju teorii procesów odlewniczych, jak również programów symulujących proces tworzenia odlewu we wnęce formy odlewniczej.

### 1. WPROWADZENIE

Badania, których przedmiotem była ogólnie pojęta zdolność ciekłego metalu do wypełniania formy odlewniczej mają już wiekową tradycję, aczkolwiek fundamentalne prace w tym zakresie pojawiły się dopiero w przedziale lat 1930-1970. Pierwotnym zamiarem było tu stworzenie narzędzia bieżącej kontroli cechy metalu, którą przyjęto nazywać lejnością. W tym celu opracowano szereg różnorodnych metod badawczych, określanymi mianem prób lejności. Z całej gamy proponowanych rozwiązań szerokie zastosowanie zyskały jedynie tzw. próby spiralne i zaproponowana w latach pięćdziesiątych w Massachusetts Institute of Technology próba zasysania [1]. W miarę rozwoju prac nasilała się tendencja do wykorzystywania prób lejności również w badaniach podstawowych, których celem było określenie związków zachodzących pomiędzy właściwościami metalu i formy oraz parametrami jej zalewania, a przebiegiem procesu przepływu metalu w kanale formy odlewniczej. Wyniki tak prowadzonych badań ukształtowały też praktycznie współczesną wiedzę na temat przepływu metalu w kanale formy, w tym również i krystalizacji metali i stopów w jego okresie. Problem sposobu krzepnięcia płynącej strugi i związanego z nim mechanizmu zatrzymywania przepływu były przedmiotem licznych publikacji [2, 3]. Lektura tych prac wyraźnie wykazuje na brak skrytykowanych poglądów. Znając złożoność procesu krzepnięcia zgodzić się również należy z opinią, że nawet ustalony poprawnie w konkretnym eksperymencie mechanizm krzepnięcia strugi, może się okazać niepoprawny dla innych warunków przepływu. Pozostając przy problematyce krzepnięcia strugi podkreślić również należy brak doniesień literaturowych na temat wpływu warunków przepływu na przesunięcia zakresu temperatur krzepnięcia stopu. Podobna sytuacja dotyczy wartości temperatury, w której przepływ ostatecznie ustaje. Większość autorów, niezależnie od rodzaju stopu, opowiada się tu za

szość autorów, niezależnie od rodzaju stopu, opowiada się tu za temperaturą likwidus i to najczęściej równowagową [3, 4].

Odrębnym nurtem badań były próby opracowania metod obliczania układów wlewowych, uwzględniających czynnik lejności metalu. Pomimo prowadzenia ogromnej ilości prac w tym kierunku we wszystkich liczących się w świecie ośrodkach badawczych, nie udało się znaleźć do tej pory skutecznego rozwiązania. Jedną z przyczyn jest tu niewątpliwie wyjątkowa złożoność problemu, analiza jednak dotychczasowych prób rozwiązania zagadnienia wykazuje szereg podstawowych błędów, które popełniano i popełnia się nadal. Już przed trzydziestu laty A. Bydałek w pracach krajowych [5] i zagranicznych [6] podważył poprawność powszechnie stosowanych prób lejności, zauważając, że stosowane w nich warunki przepływu znacznie odbiegają od panujących we wnękach rzeczywistych form odlewniczych. Tym samym stwierdził, że nie można poszukiwać bezpośrednich, ilościowych zależności pomiędzy zachowaniem się tego samego metalu w kanale testowym próby lejności i wnęce konkretnej formy odlewniczej. Zaproponował też modyfikację klasycznej próby zasysania, która, zachowując zalety pierwowzoru, pozwalała realizować przepływ w rzeczywistych materiałach formierskich z prędkościami odpowiadającymi panującym we wnękach form rzeczywistych. Pomimo oczywistości zastrzeżeń sformułowanych przez A. Bydałkę ugruntowane wcześniej techniki pomiarowe są nadal powszechnie stosowane współcześnie. Przegląd doniesień literatury światowej z ostatniego dziesięciolecia wskazuje na dominację klasycznej wersji próby zasysania w badaniach laboratoryjnych. Znamiennym jest również i to, że publikowane prace w swym zakresie szczegółowym są często powtórzeniami badań już znacznie wcześniej dobrze udokumentowanych w opisach literaturowych. Zauważalny jest również brak istotnego postępu w metodach rejestracji przebiegu procesów towarzyszących wypełnianiu metalem form odlewniczych, pomimo rewolucyjnych zmian w technice pomiarowej, jakie dokonały się w ostatnim dziesięcioleciu dzięki rozwojowi technologii mikroprocesorowych.

Abstrahując od poczynionych powyżej uwag, wątpliwości autorów tego opracowania wzbudza również sama definicja lejności, w której określa się ją jako cechę metalu, aczkolwiek za jej miarę przyjęto uznawać długość zalania kanału formy testowej, która to wielkość jest od geometrii kanału i właściwości materiału formy silnie uzależniona. Przyjęcie długości zalania za jej miarę, aczkolwiek wygodne, powinno też budzić wątpliwości formalne. Analizując bowiem naturę samej próby zauważamy, że z fizycznego punktu widzenia eksperyment polega praktycznie na przetwarzaniu energii mechanicznej strugi (energia potencjalna i kinetyczna na wlocie do kanału) na pracę przeniesienia jej w inne miejsce układu metal-forma (praca przeciwko siłom tarcia na przebytej drodze i grawitacyjnym w przypadku kanałów nie poziomych). Spostrzeżenie to pozwala na sprecyzowanie zarówno samej definicji lejności jak i jej miary [7].

## **2. PERSPEKTYWY ROZWOJU BADAŃ**

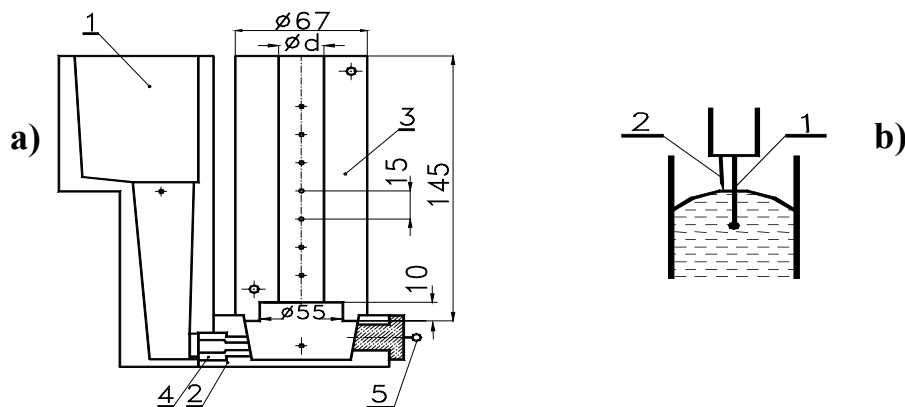
W Politechnice Zielonogórskiej od lat prowadzone są prace nad stworzeniem metodyki badań lejności, zapewniającej prowadzenie eksperymentów w jednoznacznych warunkach i odpowiadających panującym w rzeczywistych formach odlewniczych. Opracowano między innymi próbę polegającą na pogrążaniu ze stałą prędkością odpowiedniej formy testowej w

tygłu z badanym metalem [7]. Próba ta odznacza się znaczną powtarzalnością i jednoznacznością warunków prowadzenia eksperymentu. Opracowano również sposób i urządzenia pozwalające rejestrować nie tylko przemieszczenia metalu w nieprzeźroczystym kanale formy testowej, lecz również temperaturę jego czoła [8, 9]. Do celów rejestracji wykorzystano techniki mikroprocesorowe, co pozwoliło na wielokanałową analizę sygnałów szybkozmiennych. Tym samym możliwa była rejestracja temperatury w dodatkowych punktach układu metal-forma. Takie rozwiązanie pozwoliło prowadzić jednoznaczne eksperymenty również w formach zalewanych grawitacyjnie (możliwość oceny wartości początkowych temperatury i prędkości metalu na wlocie do kanału). Aczkolwiek prowadzenie badań z wykorzystaniem form testowych, zalewanych grawitacyjnie stwarza trudności związane z powtarzalnością warunków eksperymentu, to jednak takie eksperymenty są pełniejsze. Pozwalają bowiem w rozważaniach uwzględnić również wpływ procesów zachodzących w układzie wlewowym na przebieg przepływu w kanale testowym. Inną zaletą jest możliwość ostatecznej odpowiedzi na temat źródła ustania przepływu (układ wlewowy / kanał testowy).

Podstawową jednak zaletą opracowanej metodyki badawczej jest, wymieniona już wcześniej, możliwość jednoczesnej rejestracji przemieszczeń i temperatury czoła strugi. Stwarza to warunki do precyzyjnego określania temperatury leju zerowej oraz zakresu temperatur krzepnięcia w warunkach przepływu. Pozwala również ocenić różnice w przepływie metalu w stanie przegrzanym i podlegającego procesowi krzepnięcia. Opisany wcześniej stan badań nad zjawiskami związanymi z procesem wypełniania metalem form odlewniczych pozwala autorom założyć, że w pierwszej kolejności powinno się prowadzić prace dotyczące wpływu podstawowych cech fizycznych metalu i formy na przebieg procesu (kanał przepływowy o niezmiennym przekroju). W dalszej dopiero kolejności badania powinny zostać rozszerzone o czynnik geometrii kanału przepływowego. Rozwój programów komputerowych symulujących proces tworzenia odlewu w formach odlewniczych stawia nowe zadania w zakresie badań nad ich wypełnianiem. Nie jest bowiem tajemnicą, że w zakresie symulacji okresu zalewania oprogramowanie najczęściej zawodzi. Jedną z przyczyn jest tu trudność formalna, wynikająca ze złożoności zjawisk jakie należy modelować matematycznie, z drugiej strony podkreślany jest jednak fakt braku wiarygodnych wartości współczynników określających cechy termofizyczne metalu i formy w okresie przepływu. Wartości te muszą pochodzić z odpowiednio wykonanych eksperymentów. Opracowane przez autorów rozwiązania w sposób pośredni bądź bezpośredni dostarczają większości niezbędnych informacji. Sposób ich wykorzystania zależy od postawionego celu. Jednym z najbardziej podstawowych jest znajomość zakresu temperatur krzepnięcia stopu w okresie przepływu, niezbędna w obliczeniach symulacyjnych do ustalenia w oparciu o obliczone pole temperatur metalu granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej. W najbardziej zaawansowanych zastosowaniach można zakładać wykorzystanie zarejestrowanych pomiarów, gdzie dodatkowo mierzono temperaturę w wybranych stałych punktach układu metal-forma, do wyznaczenia metodą zadania odwrotnego wybranych współczynników występujących w równaniu energii (jedno z równań różniczkowych modelu). Wartości wybranych współczynników można też określać w sposób analityczny. W pracy [10] przedstawiono na przykład metodę określania newtonowskiego współczynnika przejmowania ciepła w określonym obszarze kanału przepływowego w oparciu o zarejestrowane pole temperatur w jego ścianie i temperaturę czoła strugi oraz na jego wlocie.

Stosowane przez autorów rozwiązania aparaturowe przedstawione były szczegółowo w licznych publikacjach [7, 8, 9]. Rysunek 1b ilustruje jedynie schematycznie ideę jednocze-

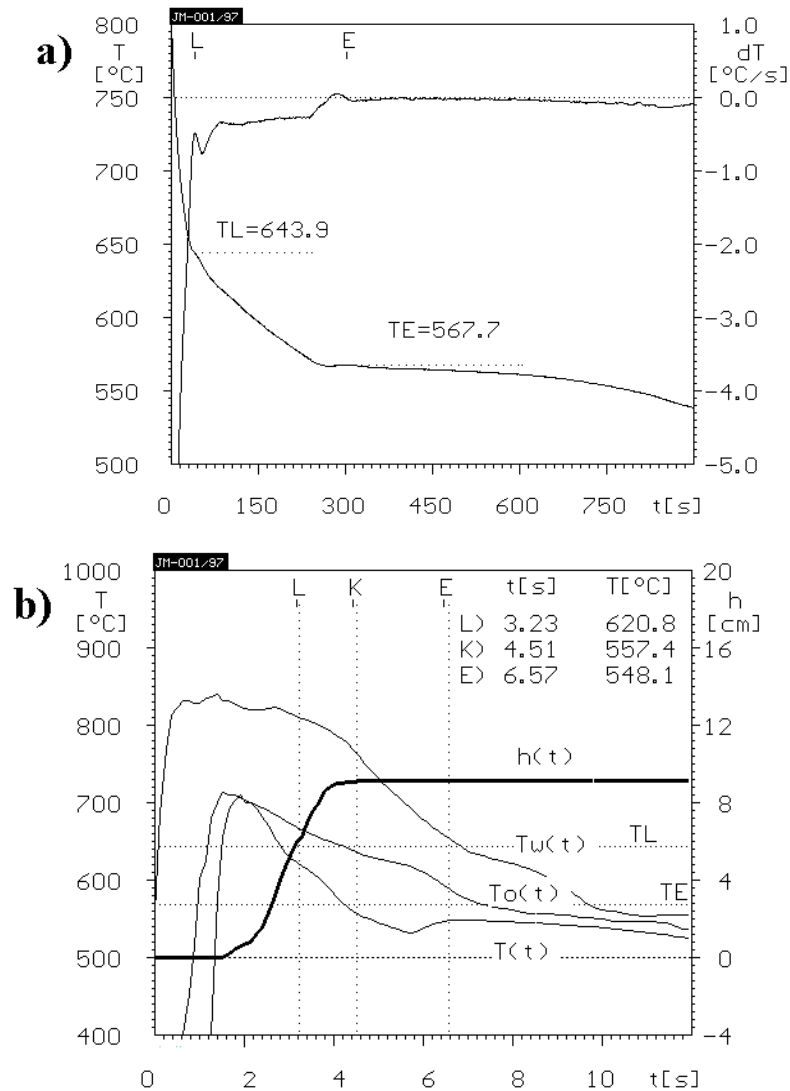
snego pomiaru przemieszczeń czoła strugi i jego temperatury, polegającą na rejestracji przemieszczeń elektrody kontaktowej naśladującej ruch czoła metalu, z którą sztywno połączony jest termoelement mierzący temperaturę w wybranym jego obszarze (nastawialna odległość pomiędzy ostrzem elektrody, a końcówką termoelementu). Rysunek 1a stanowi natomiast ilustrację jednej z wykorzystywanych w pomiarach form testowych.



Rys. 1. **Widok połówki metalowej formy testowej (a):** 1 - segment układu wlewowego, 2 - segment wnęki wstępnej, 3 - segment kanału przepływowego, 4 - wymienny wlew, 5 - czop zamykający; **Schemat idei pomiarowej (b):** 1- termoelement, 2- elektroda kontaktowa

Fig. 1. **View of the half of metal test mould (a):** 1- segment of gating system, 2- segment of entrance mould cavity, 3- segment of flow channel, 4- replaceable ingate, 5- closing pin; **Scheme of measuring idea (b):** 1- thermocouple, 2- contact electrode

Przedstawiona na rysunku kokila segmentowa posiada za zbiornikiem wlewowym oraz w segmencie wnęki wstępnej przelotowe otwory, przez które można wprowadzać termoelementy płaszczowe  $\Phi 1$  mm typu K, rejestrujące zmiany temperatury w układzie wlewowym. Podobne otwory widoczne są wzdłuż kanału przepływowego. Każdy z tych otworów stowarzyszony jest z dwoma innymi, nieprzelotowymi, niewidocznymi na rysunku, które na danej wysokości kanału rejestrować mogą temperaturę w odległości odpowiednio 1 i 2 mm od jego ścianki. Otwory te obsadzone są termoelementami w pomiarach, w których analizuje się również procesy cieplne w ściance formy w okresie przepływu. Poniżej przedstawiono przykład pomiaru, w którym rejestrowano krzywą przepływu wraz z temperaturą czoła strugi oraz temperatury za zbiornikiem wlewowym i wnęce wstępnej. Pomiar dotyczy przepływu siluminu AK20 w kanale przepływowym  $\Phi 14$  mm. Forma podgrzana była do temperatury  $150^{\circ}\text{C}$ , a przekrój wlewu doprowadzającego wynosił  $25\text{mm}^2$ . Na wykresie (rys. 2b) poza zarejestrowanymi sygnałami zaznaczono poziomymi, przerywanymi liniami równowagowe wartości temperatur likwidus i eutektycznej, odczytane z wykresu ATD badanego stopu (rys. 2a). Analiza krzywych przebiegu temperatury za zbiornikiem wlewowym  $T_w(t)$ , we wnęce wstępnej  $T_o(t)$  oraz w czole strugi  $T(t)$  pozwala ocenić zarówno spadek temperatury w układzie wlewowym, jak i postęp procesu krzepnięcia w wybranych trzech obszarach metalu. Już na pierwszy rzut oka widoczne są różnice wartości temperatur likwidus i eutektycznej w każdym z tych obszarów. Wspólną cechą jest tu natomiast to, że wszystkie one są obniżone w stosunku do wartości równowagowych. W obszarze rysunku zaznaczono symbolami literowymi i wydrukowano wartości charakterystyczne, odczytane z krzywej zmian temperatury czoła strugi (literą K oznaczono moment zatrzymania przepływu).



Rys. 2. Wykres ATD - **(a)** oraz ilustracja przepływu siluminu AK20 w kanale  $\Phi 14$ mm formy metalowej -**(b)**:  $h(t)$ - krzywa przepływu,  $T_w(t)$ ,  $T_o(t)$ ,  $T(t)$ : krzywe zmian temperatury: za zbiornikiem wlewowym, we wnęce wstępnej, w czole strugi.

Fig. 2. ATD graphs - **(a)** and illustration of the flow of the AK20 alloy in the metal channel  $\Phi 14$ mm - **(b)**:  $h(t)$ - flow curve,  $T_w(t)$ ,  $T_o(t)$ ,  $T(t)$ : curves of temperature changes: below of the pouring cup, in the entrance cavity, in the leading tip of the stream

Zamieszczona ilustracja pokazała, że stop stracił ostatecznie zdolność do przepływu w temperaturze leżącej wewnątrz nierównowagowego zakresu temperatur krzepnięcia, aczkolwiek pierwsze objawy hamowania pojawiły się po przekroczeniu nierównowagowej temperatury likwidus. Na wykresie  $T(t)$  widoczne jest wyraźne przechłodzenie czoła strugi w okresie przemiany eutektycznej. Przebieg zmian temperatury w zbiorniku wlewowym i wnęce wstępnej pokazuje, jak problematycznym jest przyjmowanie temperatury zalewania (temperatura metalu w tyglu) za punkt odniesienia w badaniach ilościowych relacji z długością zalania kanału testowego grawitacyjnych prób lejućności. Lepszym odnośnikiem powinna tu być średnia temperatura metalu we wnęce wstępnej w okresie przepływu, bądź wręcz wydatek cieplny

obliczany dla okresu przepływu, jako iloczyn wydatku masowego, ciepła właściwego metalu i jego temperatury we wnęce wstępnej.

### 3. PODSUMOWANIE

Badania nad lejnością metali i stopów powinny przybrać charakter badań nad ich przepływem w prostych kanałach form odlewniczych, zalewanych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Prowadzenie badań według tradycyjnych schematów będzie bowiem przynosiło efekty podobne do dotychczasowych. Przyszłość projektowania procesów odlewniczych będzie się ściśle wiązała z wykorzystaniem oprogramowania symulującego proces tworzenia odlewu we wnęce formy. Oprogramowanie tego typu będzie zawsze wymagało wprowadzania rzetelnych wartości parametrów termofizycznych metalu i formy, również tych charakterystycznych dla okresu przepływu. Wartości te uzyskiwać będzie można jedynie na podstawie odpowiednio wykonanych eksperymentów, których propozycję przedstawiono w tym opracowaniu.

### LITERATURA

- [1] Ragone D. V., Adams C. M., Trans AFS, 1956, v. 64, s. 653-657
- [2] Kumanin I. B., Lit. Proizw., 1980, nr 2, s. 3-10
- [3] Flemings M. C., British Foundryman, v. 6, 1964, s. 312-324
- [4] Engler S., Lee Z. H., Giess. Forsch., 1978, v.30., nr 3, s.107- 115
- [5] Bydałek A., ZN Politechniki Wrocławskiej, Mechanika 123, z. XVII, Wrocław 1965
- [6] Bydałek A., Giess. Forsch., 1969, v. 12, nr 2, s. 81-89
- [7] Mutwil J., Monografia 63 WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra 1992
- [8] Mutwil, J.: Patent Rzeczpospolitej Polskiej- Nr. 153074, 1991
- [ 9] Mutwil J.: Archiwum TMiA, vol. 16, nr. 1, KBM.PAN o. Poznań1996, s. 43-50.
- [ 10] Mutwil J.: Archiwum TMiA, vol. 17, nr. 1, KBM.PAN o. Poznań1997, s. 109-118.

### STATE OF ART. AND PERSPECTIVES OF FURTHER INVESTIGATIONS OF THE FLUIDITY OF METALS AND ALLOYS

#### Abstract

A review of the state of art. of investigations on the fluidity of metals and alloys has been presented. Non significant development in the field of the measurement techniques has been revealed. An investigations conception, which allow to develop the theory of the foundry processes, as well as the simulation programmes of cast formation in the foundry mould has been presented .