

Thixoforming of copper alloys

Tiksoforming stopów miedzi



DOI: 10.15199/62.2024.10.18

Viscosity measurements of CuSn12 and CuAl10Fe3Mn2 alloys were carried out to develop rheological models used in programs simulating thixocasting processes. A special research methodology was used, including high-temp. furnaces, which enable melting of the tested alloys. The special rheological models applied in computer packages used to model casting processes was discussed.

Keywords: copper alloys, semi-solid state, thixoforming, rheology, viscosity

Przedstawiono metodę pomiarów lepkości stopów miedzi w stanie ciekłym i stało-ciekłym, stanowisko pomiarowe, wyniki pomiarów lepkości dla stopów miedzi CuSn12 oraz CuAl10Fe3Mn2, modelowanie lepkości na potrzeby procesów formowania tiksotropowego z wykorzystaniem modeli reologicznych stosowanych w pakietach komputerowych do modelowania procesów odlewniczych.

Słowa kluczowe: stopy miedzi, stan stało-ciekły, tiksoforming, reologia, lepkość

Formowanie tiksotropowe to grupa technik kształtowania metali w stanie stało-ciekłym. Stopy metali w tym stanie charakteryzują się spadkiem lepkości w trakcie odkształcenia, co jest wykorzystywane w tych metodach. Pomiar lepkości stopów metali jest zadaniem charakteryzującym się dużą trudnością z uwagi na wysokie temperatury występowania stanu ciekłego. Dlatego też zadanie to wymaga zastosowania specjalnej metodyki badawczej polegającej na wykorzystaniu pieców wysokotemperaturowych, których temperatura robocza umożliwi przetopienie badanych stopów. W artykule przedstawiono wysoce innowacyjną metodykę pomiaru lepkości stopów metali z wykorzystaniem reometru wyposażonego w piec wysokotemperaturowy wraz z wynikami otrzymanymi dla wybranych stopów miedzi.

Procesy formowania tiksotropowego polegają na kształtowaniu stopów metali prowadzonym w stanie stało-ciekłym: stop metalu jest częściowo stopiony i formowany jako mieszanina cząstek stałych zawieszonych w cieczy. Stan stało-ciekły występuje zazwyczaj w temperaturach pomiędzy punktami solidus i likwidus na krzywych równowagi. Stopy metali w tym stanie wykazują właściwości tiksotropowe. Oznacza to, że zachowują się jak ciało stałe w spoczynku oraz jak ciecz podczas odkształcania. Podczas procesu formowa-

nia tiksotropowego stało-ciekła zawieszina jest wtryskiwana do formy pod wysokim ciśnieniem (odlewanie tiksotropowe, *thixocasting*) lub kształtowana w zamkniętych matrycach kuźniczych (kucie tiksotropowe, *thixoforming*). Następnie materiał krzepnie w kształcie zbliżonym do finalnego produktu. Warianty technologiczne procesów formowania tiksotropowego przedstawiono na rys. 1.

Stopy miedzi są potencjalnie możliwe do formowania tiksotropowego, gdyż mają relatywnie niskie temperatury krzepnięcia, wahające się w przedziale 800–1200°C. Są to temperatury, które można kontrolować, bazując na obecnych rozwiązaniach technologicznych. Drugi powód to dostępność materiałów na narzędzia do formowania charakteryzujące się wysoką żywotnością. Podstawowym materiałem mogą być stale, których temperatury topnienia są dużo wyższe i które zachowują relatywnie dobre właściwości wytrzymałościowe w temperaturach występowania fazy stało-ciekłej w stopach miedzi. Obecnie stopy miedzi nie są powszechnie formowane w stanie stało-ciekłym, jak również nie ma zaawansowanych badań, które dotyczyłyby takich procesów, natomiast stopy metali lekkich są poddawane przemysłowemu kształtowaniu w stanie stało-ciekłym. Przeprowadzono także dużo badań doty-



Mgr inż. Arkadiusz MADETKO (ORCID: 0000-0002-9172-2273) w roku 2010 ukończył studia na kierunku finanse i rachunkowość na Wydziale Finansów Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie. Obecnie jest doktorantem w AGH w Krakowie.



Dr hab. inż. Krzysztof SOŁEK (ORCID: 0000-0003-1687-3933) w roku 1999 ukończył studia na Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej AGH w Krakowie. W 2004 r. uzyskał stopień doktora, a w 2019 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. Pracuje na stanowisku adiunkta w macierzystej uczelni. Specjalność – metalurgia i inżynieria materiałowa.

* Adres do korespondencji:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +48 504-964-855, e-mail: madetko@agh.edu.pl

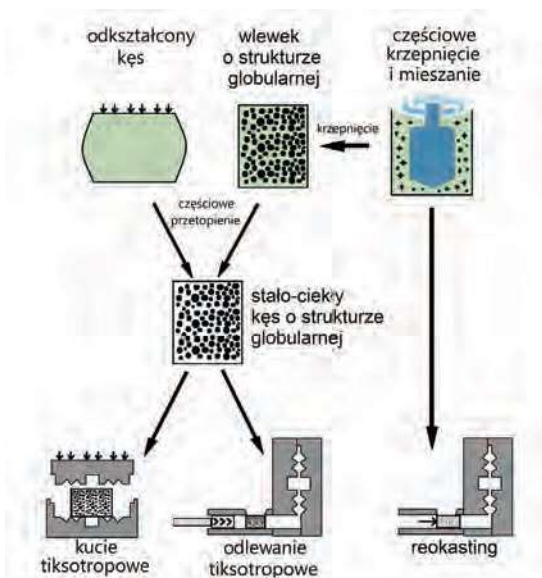


Fig. 1. Technological variants of thixotropic molding processes

Rys. 1. Warianty technologiczne procesów formowania tiksotropowego

czących możliwości takiego formowania stopów metali wysokotopliwych¹⁻¹⁵).

Procesy tiksotringu mają kilka zalet. Przede wszystkim polepszają właściwości mechaniczne materiału. Decyduje o tym drobna i jednolita mikrostruktura. Kolejną zaletą jest zmniejszona porowatość. Tiksoforming minimalizuje porowatość i inne wady często związane z tradycyjnymi metodami odlewania. Kolejną zaletą jest kształtowanie skomplikowanych kształtów w jednej operacji technologicznej, co zmniejsza potrzebę dalszej obróbki skrawaniem. Oznacza to możliwość formowania złożonych geometrii, które byłyby trudne lub niemożliwe przy tradycyjnym kuciu. Oznacza to również oszczędność materiału poprzez minimalizację odpadów. Bardzo ważną zaletą formowania tiksotropowego są dużo mniejsze naciski niż te, które są konieczne w klasycznych procesach kuzniczych.

Głównym celem pracy była analiza lepkości wybranych stopów miedzi i przedstawienie możliwości zastosowania procesów formowania tiksotropowego do kształtowania tych stopów.

Pomiary lepkości zostały przeprowadzone m.in. na potrzeby opracowania modeli reologicznych wykorzystywanych w programach symulujących procesy odlewania. Są to narzędzia numeryczne modelujące przepływ ciekłego lub stało-ciekłego metalu z wykorzystaniem równań Naviera i Stokesa¹⁶). Aby zapewnić poprawne rozwiązanie,

należy w obliczeniach wykorzystać modele konstytutywne opisujące zależność pomiędzy stanem odkształcenia oraz naprężenia. W przypadku cieczy modele te zawierają zależności matematyczne pomiędzy niezmiennikami stanu naprężenia oraz prędkości odkształcenia w postaci $\tau = f(\dot{\gamma})$ zwane modelami reologicznymi. Bardzo często związki w tej postaci są zaimplementowane wprost we wspomnianych programach, zaś użytkownicy uzupełniają jedynie właściwości parametrów tych modeli, zwanych parametrami reologicznymi. Na rys. 2 przedstawiono okno pakietu ProCAST, w którym można wybrać jeden z dostępnych modeli lepkości oraz wpisać wartości parametrów reologicznych.

Na rys. 2 wybrano model Power-Cut-Off umożliwiającą symulacje odlewania tiksotropowego. Model ten charakteryzuje się występowaniem parametru $\dot{\gamma}_0$, który przechowuje wartość granicznej prędkości ścinania, poniżej której nie następuje wzrost lepkości. Ten prosty mechanizm pozwala zasymulować zjawisko spadku lepkości w czasie przepływu cieczy nawet w przypadku spadku wartości prędkości ścinania. Przed uruchomieniem symulacji należy jedynie ustalić najwyższą wartość tej prędkości jaka pojawia się w układzie.

Property	Type	Value	Value Unit	F(T) ...
Viscosity	Power-Cutoff			
Zero Viscosity	F(T)		Pa sec	C
Power	F(T)			C
K Factor	Const.	1.0000e+000	sec	C
Surface Tension	Const.		N/m	C
Permeability	AFS			
AFS Permeability Num.	Const.			C

$$\mu = \mu_0 \cdot (K \cdot \dot{\gamma})^n \text{ if } \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_0$$

$$\mu = \mu_0 \cdot (K \cdot \dot{\gamma}_0)^n \text{ if } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0$$

Fig. 2. Power law cut-off (PLCO) viscosity model and window of Pro-CAST software for declaration of rheological parameters^{17, 18)}

Rys. 2. Potęgowy model lepkości PLCO (power law cut-off) oraz okno programu Pro-CAST do wprowadzenia parametrów modelu^{17, 18)}

Część doświadczalna

Materiały

Stosowano brąz cynowy i brąz aluminiowy zakupione u komercyjnych dostawców. Według uzyskanej informacji ich producentem była firma Jinminghui Metal Materials Ltd. Brąz cynowy zapewnia dobrą odporność na zużycie i odporność na korozję. Dodatek cyny daje także wysoką trwałość i wytrzymałość na zrywanie. Brąz aluminiowy zapewnia wysoką wytrzymałość i twardość, jak również odporność na zużycie i korozję. Skład chemiczny obu stopów, wg informacji otrzymanej od dostawców, był następujący: (i) CuSn12: Cu 85,0–88,5; Sn 11,0–13,0; Al



Dr inż. Robert DĄBROWSKI (ORCID: 0000-0002-4922-7973) w roku 1997 ukończył studia na Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej AGH w Krakowie. W 2002 r. uzyskał stopień doktora na tym samym wydziale. Pracuje na stanowisku adiunkta w macierzystej uczelni. Specjalność – metalurgia i inżynieria materiałowa.

0–0,01; Fe 0–0,2; Mn 0–0,2; Ni 0–2,0; P 0–0,6, Pb 0–0,7; Si 0–0,01; Zn 0–0,5.

Metodyka

W pracy do pomiarów lepkości wykorzystano metodę koncentrycznych cylindrów. Układ pomiarowy składał się z wewnętrznego cylindra, zwanego wrzecionem, i zewnętrznego cylindra, zwanego tygłem. Koncentryczne cylindry oznaczają, że oba elementy w kształcie cylindra mają tę samą oś symetrii (oś obrotu) po zamontowaniu w pozycji roboczej. Układy koncentrycznych cylindrów zostały opisane w normach^{19, 20)} (po raz pierwszy w 1976 r. w normie²¹⁾. Zasadniczo rozróżnia się układy z małą i dużą szczeliną pomiarową. Z uwagi na możliwą niestabilność przepływu, w tym przepływ turbulentny, preferuje się układy z małą szczeliną. Pomiar lepkości z wykorzystaniem koncentrycznych cylindrów może być prowadzony dwiema różnymi metodami. Pierwsza z nich to metoda Searle'a, w której wrzeciono jest wprawiane w ruch obrotowy jako „rotor”, a tygiel jest nieruchomy. Druga z nich to metoda Couette'a, w której tygiel jest wprawiany w ruch obrotowy, zaś wrzeciono nieruchome²²⁾.

W metodzie Searle'a parametry przepływu są definiowane jako funkcja promieni cylindrów. Związek między naprężeniem ścinającym a zmierzonym momentem obrotowym M jest opisany równaniem (1):

$$\tau_i = \frac{M}{2\pi \cdot L \cdot R_i^2} \quad (1)$$

w którym M oznacza moment obrotowy na powierzchni wewnętrznego cylindra, L długość wewnętrznego cylindra (20 mm), a R_i wartość promienia wewnętrznego cylindra (10 mm).

Zależność między wielkością zadaną, jaką jest prędkość ścinania, a sygnałem sterującym w postaci prędkości obrotowej n jest opisana równaniami (2) i (3):

$$\dot{\gamma}_i = \frac{2 \cdot R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \omega \quad (2)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (3)$$

w których R_e oznacza wartość promienia zewnętrznego cylindra (13 mm), a ω prędkość kątową, rad/s.

Lepkość jest określana z równania Newtona (4):

$$\eta = \frac{\tau(R_i)}{\dot{\gamma}(R_i)} = \frac{(R_e^2 - R_i^2)}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot R_e^2 \cdot R_i^2} \cdot \frac{M}{\omega} \quad (4)$$

Równania (1)–(4) to uproszczone zależności między lepkością a mierzonym parametrem, czyli momentem obrotowym M . Uproszczenie wynika z nie w pełni równomiernego rozkładu wektorów prędkości i naprężeń ścinających wewnątrz próbek.

Aparatura

Pomiary lepkości wykonano za pomocą reometru firmy Anton Paar wyposażonego w piec wysokotemperaturowy firmy Carbolite TF1 16/60/180 (rys. 3). W trakcie pomiarów było możliwe zastosowanie atmosfery ochronnej ograniczającej proces utleniania badanych stopów metali. Programowanie przebiegu pomiarów, analizę i prezentację wyników wykonywano, używając oprogramowania RHEOPLUS. Zdjęcie reometru wykorzystanego do pomiarów przedstawiono na rys. 3.

Na rys. 4 przedstawiono okno programu RHEOPLUS służące do zdefiniowania wartości parametrów układu pomiarowego. W szczególności chodzi tutaj o parametry zależności pomiędzy wielkościami mierzonymi oraz wielkościami opisującymi reologię badanych stopów. Parametrami mierzonymi w przeprowadzonych testach materiałowych były prędkość obrotowa ω oraz moment obrotowy wrzeciona M . Reologię opisuje zależność napręż-

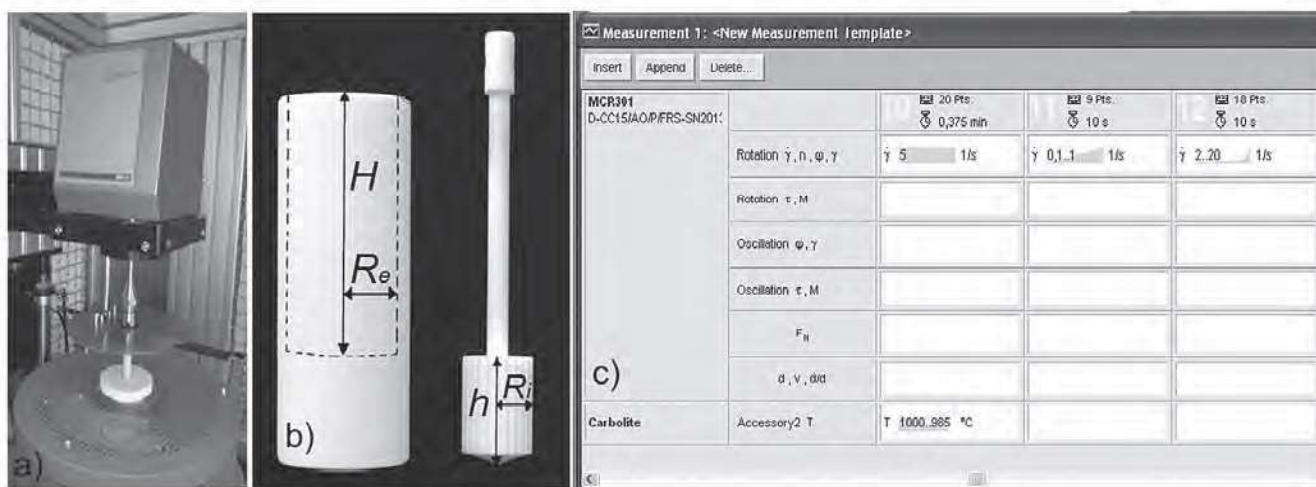


Fig. 3. High-temperature rheometer designed by Anton Paar company for measuring the viscosity of metals; a) measurement head (DSR 502), b) measuring tools: crucible and rotating rod with dimensions ($H = 50$, $R_e = 26$, $h = 20$, $R_i = 20$ mm), c) window of RHEOPLUS software for programming measurements

Rys. 3. Reometr wysokotemperaturowy do pomiaru lepkości metali firmy Anton Paar; a) głowica pomiarowa (DSR 502), b) narzędzia pomiarowe: tygiel i wrzeciono wraz z wymiarami ($H = 50$, $R_e = 26$, $h = 20$, $R_i = 20$ mm), c) okno programu RHEOPLUS służące do programowania pomiarów

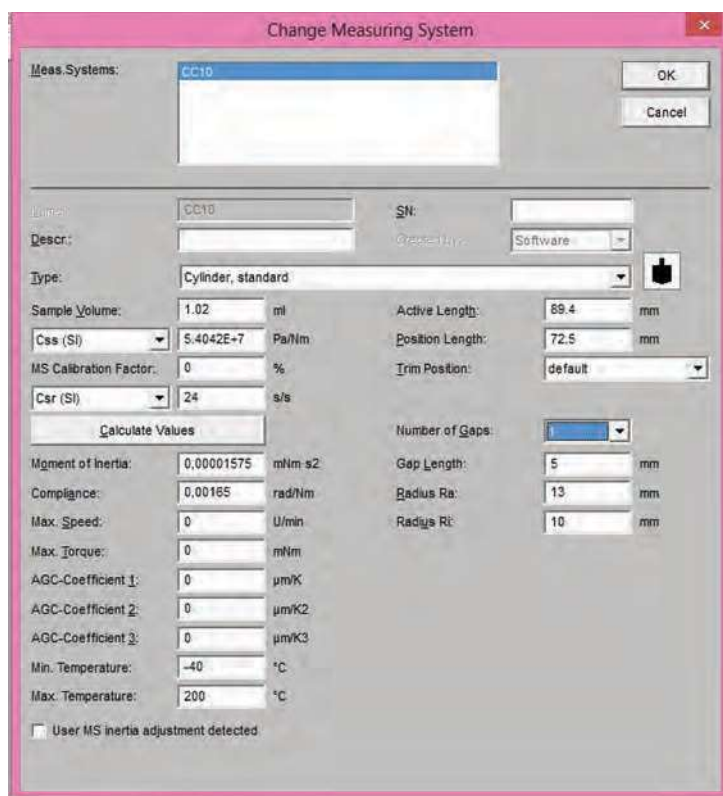


Fig. 4. RHEOPLUS software window allowing to set parameters values of used measuring systems

Rys. 4. Okno programu RHEOPLUS służące do zdefiniowania wartości parametrów wykorzystywanych układów pomiarowych

nia stycznego τ od prędkości ścinania $\dot{\gamma}$. Testy reologiczne wymagały ustawienia w programie RHEOPLUS wartości parametrów równań (1) i (2), które opisują zależność rejestrowanego momentu obrotowego oraz naprężenia stycznego i zależność prędkości obrotowej oraz prędkości ścinania.

Pojedyncza procedura pomiarowa lepkości metali składała się z kilku etapów zobrazowanych na rys. 5. Reometr wysokotemperaturowy do prawidłowej pracy wymagał stałego zasilania powietrzem, o odpowiednim ciśnieniu, doprowadzonym do głowicy pomiarowej oraz układu pneumatycznego (ok. 6 bar). Do wytworzenia ciśnienia służył kompresor, który powinien być uruchomiony przed rozpoczęciem pracy urządzenia. Po skontrolowaniu ciśnienia w układzie pneumatycznym uruchomiono sterowniki reometru oraz pieca, które były osobnymi modułami urządzenia. Integralną częścią reometru był również komputer z zainstalowaną aplikacją sterującą RHEOPLUS. Po jej uruchomieniu ustawiono właściwe parametry pomiaru. W panelu kontrolnym wskazywano w pierwszej kolejności właściwy system pomiarowy oraz, ze względów bezpieczeństwa, maksymalny moment obrotowy (ograniczony programowo do 150 mNm). Po wciśnięciu w panelu kontrolnym przycisku „Initialize” ustawiono

wartość temperatury pieca zbliżoną do warunków panujących w otoczeniu. Przed dalszą konfiguracją procedury pomiarowej w aplikacji sterującej RHEOPLUS zakładano narzędzia pomiarowe. Zarówno tygiel, jak i wrzeciono były umieszczone na rurkach alundowych. Aby uniknąć błędów pomiaru, skontrolowano dokręcenie śrub mocujących te rurki. Poprzez użycie przycisku „Reset normal force” w aplikacji zerowano siłę normalną działającą na zamocowane wrzeciono. W dalszym etapie wprowadzono wrzeciono do pieca pod reometrem za pomocą siłownika pneumatycznego. Podczas nagrzewania pieca powinno ono być uniesione nad badaną próbką i w tym celu ustawiono przed rozpoczęciem procedury wartość „Lift position” na poziomie 80 mm. Aby zapewnić poprawne ustawienie wrzeciona w tyglu, ustawiono pozycję „Zero gap”, czyli wysokość wrzeciona zapewniającą jego kontakt z dnem tygla. W tym celu przed umieszczeniem w nim próbki w panelu kontrolnym wcisniono przycisk „Set zero gap”, co powodowało automatyczne wyznaczenie tej wysokości. Po jej wyznaczeniu, wciśnięcie przycisku „Lift position” powodowało podniesienie wrzeciona na wcześniej ustawioną wysokość, np. 80 mm. Następnie umieszczano badaną próbkę w tyglu. W celu dodatkowej ochrony przed utlenieniem badanych stopów można w komorze pieca umieszczać grafitowe pierścienie. Po zakończeniu wcześniej opisanej procedury przygotowawczej uruchamiano piec w celu roztopienia próbki. Podstawową ochroną przed utlenieniem próbki była atmosfera ochronna składająca się z technicznego argonu, który był podawany z butli gazowej. Głowica pomiarowa reometru jest czuła na wysokie temperatury i była chroniona przed przegrzaniem poprzez chłodzenie wodne za pomocą specjalnej chłodnicy oraz strumienia powietrza podawanego pod ciśnieniem z kompresora. Po nagraniu próbki do ustawionej temperatury zanurzano wrzeciono w próbce oraz uruchamiano pomiar lepkości. Podczas całego procesu nagrzewania próbki i pomiaru

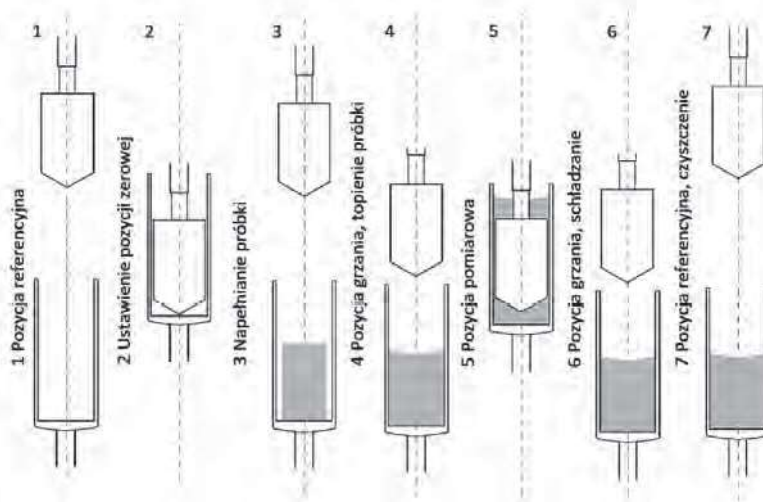


Fig. 5. Basic stages of the metal viscosity measurement procedure

Rys. 5. Kolejne etapy procedury pomiarowej lepkości metali

Wyniki badań i ich omówienie

Na rys. 6 przedstawiono zmiany temperatury badanych próbek w trakcie ich nagrzewania w celu roztopienia oraz w trakcie pomiaru. Próbkę nagrzewano z dwoma różnymi prędkościami. Do temp. 500°C szybciej, z prędkością równą 15°C/min, a następnie wolniej z prędkością 5°C/min. W trakcie obniżania temperatury próbek były zaprogramowane przystanki, podczas których zachodziło albo ujednorodnianie temperatury, albo pomiary lepkości.

Na rys. 7 przedstawiono zależności naprężenia stycznego oraz momentu obrotowego wrzeciona w funkcji prędkości ścinania dla stopów (a) CuSn12 oraz (b) CuAl10Fe3Mn2. Moment obrotowy był pierwotną wielkością mierzoną przez reometr (rys. 3). Na jego podstawie program obliczał wartość naprężenia stycznego za pomocą zależności (1). Analiza wykresów pokazuje, że wraz ze wzrostem temperatury obserwowano spadek wartości zarówno momentu, jak i naprężenia stycznego. Z kolei niewielki, lecz widoczny spadek wartości naprężenia stycznego wraz ze wzrostem prędkości ścinania pozwala przypuszczać, że w stopach mogło zachodzić zjawisko tiksotropii, co powodowało dodatkowy spadek oporów płynięcia.

Na rys. 8 przedstawiono punktami, przeliczone za pomocą reometru na podstawie zarejestrowanych momentów (4), wartości lepkości oraz krzywe wyznaczone z modelu

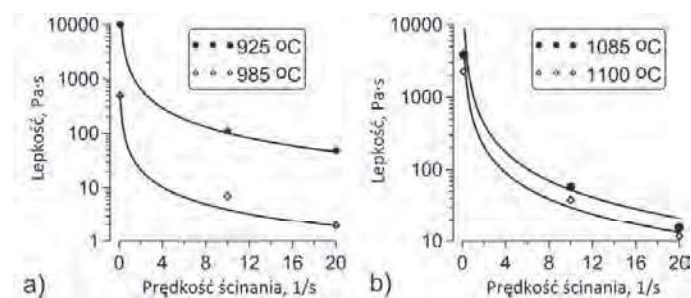


Fig. 8. Viscosity curves determined using PLCO model together with measurement points for a) CuSn12, and b) CuAl10Fe3Mn2 alloys

Rys. 8. Wykresy lepkości wyznaczone na podstawie modelu PLCO wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi dla stopów a) CuSn12, b) CuAl10Fe3Mn2

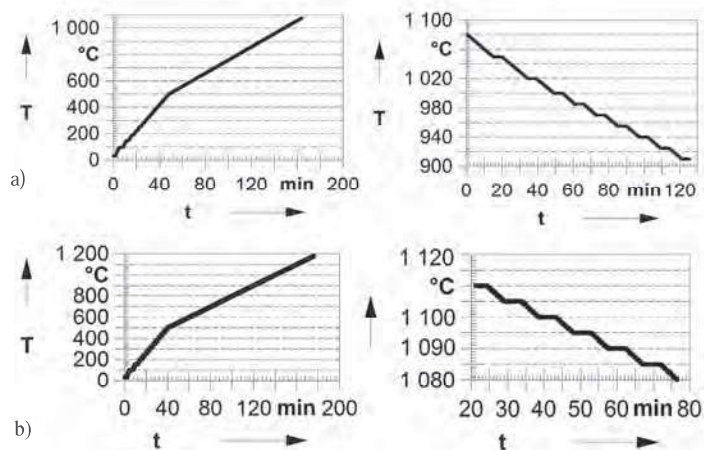


Fig. 6. Changes of temperature during measurement procedure of viscosity for a) CuSn12, and b) CuAl10Fe3Mn2 alloys

Rys. 6. Zmiany temperatury próbek w trakcie procedury pomiarowej lepkości dla stopu a) CuSn12, b) CuAl10Fe3Mn2

lepkości kontrolowano działanie systemów chłodzących oraz atmosferę ochronną.

Narzędzia pomiarowe w postaci wrzecion oraz tygli wykonano z alundu (Al_2O_3). Nagrzewano je z odpowiednio małymi prędkościami, aby zmniejszyć naprężenia cieplne powodowane przemianą fazową. Zbyt duże naprężenia mogą powodować pęknięcie narzędzi. W wyrobach korundowych może występować faza $\gamma-Al_2O_3$. Alund, którym jest głównie $\alpha-Al_2O_3$, może zawierać różne fazy tlenku glinu, w tym $\gamma-Al_2O_3$. Gęstość fazy $\gamma-Al_2O_3$ wynosi ok. 3,2 g/cm³. Jest to mniejsza gęstość w porównaniu z fazą $\alpha-Al_2O_3$ (alundu), której gęstość wynosi ok. 3,98 g/cm³. Mniejsza gęstość $\gamma-Al_2O_3$ wynika z jej bardziej porowatej i mniej zorganizowanej struktury krystalicznej. W temperaturach, w których występuje 100% $\gamma-Al_2O_3$ (800–950°C) wielkość kryształitów jest niewielka (5–10 nm) i zwiększa się w zakresie temperatur, w których zachodzi przemiana fazowa (950–1050°C), osiągając ok. 60 nm dla kolejnych temperatur (1050–1200°C), w których cały $\gamma-Al_2O_3$ przekształca się w $\alpha-Al_2O_3$ ²³). Zmniejszenie prędkości nagrzewania pozwala również na bardziej równomierny rozkład temperatur oraz precyzyjną ich kontrolę.

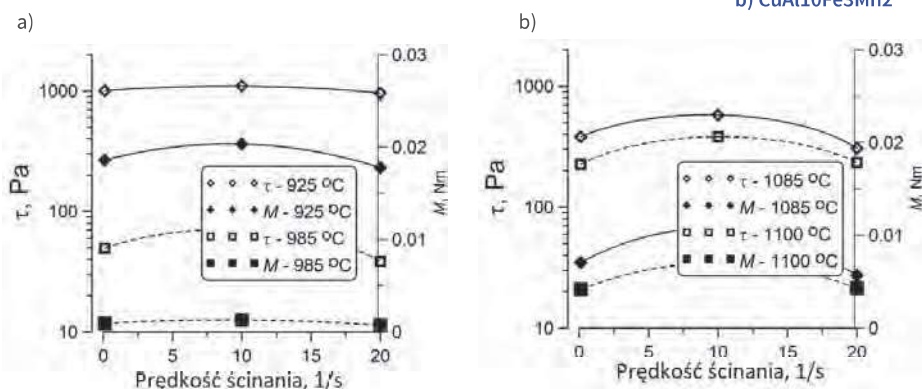


Fig. 7. Graphs of shear stress and spindle torque as function of shear rate for a) CuSn12, and b) CuAl10Fe3Mn2 alloys

Rys. 7. Wykresy naprężenia stycznego oraz momentu obrotowego wrzeciona w funkcji prędkości ścinania dla stopów a) CuSn12, b) CuAl10Fe3Mn2

lepkości przedstawionego na rys. 2. Znaczne zmiany wartości lepkości w funkcji temperatury wynikały z przyrostu ułamka fazy stałej związanego z procesem krzepnięcia. Pomiary lepkości były możliwe poniżej wartości 0,5 ułamka fazy stałej. Uogólniając, z uwagi na postęp procesu krzepnięcia, lepkość mierzono dla stopu CuSn12 powyżej 920°C, a dla stopu CuAl10Fe3Mn2 powyżej 1060°C. Ponadto zaobserwowano dla obu stopów zjawisko rozrzedzenia ścinaniem. Zjawisko to polega na spadku lepkości wraz ze wzrostem prędkości ścinania.

Table. Values of PLCO rheological model parameters (Fig. 2) for CuSn12 and CuAl10Fe3Mn2 alloys

Tabela. Wartości parametrów modelu reologicznego PLCO (rys. 2) dla stopu CuSn12 i CuAl10Fe3Mn2

Stop	Temperatura, °C	m_p , Pa·s	K , s	n
CuSn12	925	16	0,02	-1,15
	985	5	0,12	-1,05
CuAl10Fe3Mn2	1085	11	0,03	-1,30
	1100	10	0,04	-1,20

kości odkształcenia postaciowego $\dot{\gamma}$. Zjawisko to wynika ze zmiany stopnia koagulacji cząstek fazy stałej w związku ze zmianą prędkości odkształcenia postaciowego.

Model przedstawiony na rys. 2 jest oparty na funkcji potęgowej i nazywany w literaturze modelem PLCO (power law cut-off)²⁾. Porównanie wartości zmierzonych oraz wyznaczonych za pomocą modelu PLCO wskazuje na jego dużą dokładność. W tabeli zamieszczono wartości parametrów tego modelu w funkcji temperatury zarówno dla stopu CuSn12, jak i dla stopu CuAl10Fe3Mn2.

Podsumowanie

Przeprowadzono identyfikację właściwości reologicznych wybranych stopów miedzi w stanie stało-ciekłym pod kątem projektowania potencjalnych procesów kształtowania tiksotropowego. W pierwszej kolejności dokonano wyboru stopów pod kątem stabilności stanu stało-ciekłego spośród dostępnych brązów. Stopy, które w miarę dobrze spełniają wymagania procesów formowania tiksotropowego to brązy CuSn12 i CuAl10Fe3Mn2.

Przeprowadzono adaptację reometru wysokotemperaturowego do pomiaru lepkości stopów miedzi w stanie stało-ciekłym. Reometr ten pierwotnie został zaprojektowany do pomiaru lepkości ciekłych żużli i metali. Adaptacja polegała na zaprojektowaniu odpowiednich narzędzi oraz procedur pomiarowych.

Kolejnym etapem prac był pomiar lepkości wytypowanych stopów w funkcji temperatury oraz prędkości ścinania. Pomiary te pozwoliły zakwalifikować stopy jako cieczy nienewtonowskie, w których występuje zjawisko rozrzedzenia ścinaniem. Prace doświadczalne pozwoliły określić wrażliwość lepkości na temperaturę oraz prędkość ścinania. Z uwagi na przemianę fazową, w jakiej znajdują się stopy, w związku z postępującą krystalizacją zauważono dużo większy wpływ zmian temperatury na lepkość niż w przypadku zmian prędkości ścinania.

W związku z potencjalnym wykorzystaniem w numerycznych symulacjach kształtowania otrzymanej w badaniach laboratoryjnych charakterystyki materiałowej, opracowano modele reologiczne badanych stopów. Dzięki pracom modelowym powstały modele lepkości zależne od temperatury oraz prędkości ścinania (rys. 2, tabela 1). Dodatkowo modele

te zawierają parametr określany jako krytyczna wartość prędkości ścinania $\dot{\gamma}_0$. Parametr ten umożliwia, w uproszczony sposób, symulować zjawisko tiksotropii.

Pobocznym wynikiem badań było oszacowanie zakresu temperatur odlewania tiksotropowego stopów CuSn12 i CuAl10Fe3Mn2. Procesy odlewania tiksotropowego prowadzone są za pomocą zmodyfikowanych wysokociśnieniowych maszyn odlewniczych. Z uwagi na dużo mniejsze naciski tłoków w maszynach wysokociśnieniowych w porównaniu z prasami kuźniczymi, procesy formowania należy prowadzić w wyższych temperaturach, w których występują mniejsze wartości lepkości. W przypadku badanego stopu CuSn12 taki zakres temperatur występuje w zakresie 930–980°C, zaś w przypadku stopu CuAl10Fe3Mn2 w zakresie 1080–1090°C.

W przyszłości planowane jest poszerzenie charakterystyki stopów o właściwości tiksotropowe. Czas jest kolejną zmienną mogącą mieć istotny wpływ na lepkość badanych w pracy stopów.

Badania wykonano w ramach subwencji AGH w Krakowie 16.16.110.663.

Otrzymano: 18-09-2024

Zrecenzowano: 25-09-2024

Zaakceptowano: 03-10-2024

Opublikowano: 21-10-2024

LITERATURA

- [1] C.J. Quak, *Rheology of partially solidified aluminium alloys and composites*, Eburon P&L, 1996.
- [2] P.A. Joly, R. Mehrabian, *J. Mater. Sci.* 1976, **11**, 1393.
- [3] D.B. Spencer, R. Mehrabian, M.C. Flemings, *Met. Trans.* 1972, **3**, 1925.
- [4] H.V. Atkinson, *Sol. St. Phen.* 2013, **192–193**, 16.
- [5] M. Modigell, A. Pola, M. Tocci, *Metals* 2018, **8**, 4.
- [6] A. Pola, R. Roberti i in., *Sol. St. Phen.* 2008, **141–143**, 301.
- [7] M. Modigell, L. Pape, K. Vasilic, *Sol. St. Phen.* 2008, **141–143**, 331.
- [8] A. Moll, M. Modigell, *J. Mater. Form.* 2010, **3**, 779.
- [9] M. Modigell, A. Pola, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2010, **20**, 1696.
- [10] K. Sołek, M. Korolczuk-Hejnak, M. Karbowiczek, *Archiv. Metall. Mater.* 2011, **56**, nr 3, 593.
- [11] K. Sołek, M. Korolczuk-Hejnak, W. Ślęzak, M. Karbowiczek, *AIP Conf. Proceed.* 2011, **1353**, nr 1, 1033.
- [12] K. Sołek, M. Korolczuk-Hejnak, W. Ślęzak, *Archiv. Metall. Mater.* 2012, **57**, nr 1, 333.
- [13] K. Sołek, *Archiv. Metall. Mater.* 2017, **62**, nr 1, 195.
- [14] K. Sołek, Ł. Rogal, P. Kapranos, *J. Mater. Eng. Perform.* 2017, **26**, nr 1, 115.
- [15] K. Sołek, P. Kapranos, *Archiv. Metall. Mater.* 2016, **61**, nr 4, 1901.
- [16] K.J. Bathe, *Finite element procedure*, Prentice Hall, Upper Saddle River 1996.
- [17] I. Orgeas, J.P. Gabathuler, T.H. Imwinkelried, Ch. Paradies, M. Rappaz, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2003, **11**, nr 4, 553.
- [18] <https://www.esi-group.com/products/procast>, dostęp 4.09.2024 r.
- [19] ISO 3219:1993, *Plastics (polymers/resins in the liquid state or as emulsions or dispersions). Determination of viscosity using a rotational viscometer with a defined shear rate (definition of the concentric cylinder and cone-and plate measuring geometries with a narrow shear gap)*.
- [20] DIN 53019:2008, *Viscometry. Viscosities and flow curves using rotational viscometers*.
- [21] DIN 53018:1976, *Dynamic viscosity of Newtonian fluids using rotational viscometers*.
- [22] G.T. Mezger, *The rheology handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*, Vincentz Network, Hannover 2006.
- [23] S. Cava, S.M. Tebcherani, I.A. Souza, S.A. Pianaro, C.A. Paskocimas, E. Longo, J.A. Varela, *Mater. Chem. Phys.* 2007, **103**, 394.