

Research Paper

Investigating on Viscosity Variation of Molten Zinc via Different Temperatures

*Seyed Hossein Elahi¹, Majid Rajaei²

1- Assistant professor, Material Science and engineering-Advanced material, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

2- Assistant professor, Mechanical Engineering-Applied design, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Citation: Elahi S.H, Rajaei M. Investigating on Viscosity Variation of Molten Zinc via Different Temperatures. Metallurgical Engineering 2018; 21(2): 102-107 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.79120.1168>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.79120.1168>

ABSTRACT

Viscosity measurement could provide valuable information for melting and solidification base processes. In this paper a falling ball viscometer is used for measuring molten zinc viscosity. The molten metals are not transparent, some changes are done in the structure of conventional method for tracing ball movement. To solve this problem and in order to trace the movement of the ball (as a falling object) in the melt, a thin steel rod was connected to the ball. The displacement of the ball could then be evaluated from the rod end, which is outside the melt. Viscosity changes versus temperature is studied and as expected the viscosity of the liquid tends to decrease by increasing the temperature. In the beginning the rate of viscosity reduction was high (0.004 cP/°C) but then with increasing temperature the rate of viscosity reduction was decreased (0.0001 cP/°C). Molten zinc is a shear thinning fluid which means by increasing shear rate and mean speed of falling ball the viscosity of molten zinc would drop.

Keywords: Viscosity, Molten Zinc, High Temperature Viscometer.

■ ■

* *Corresponding Author:*

Seyed Hossein Elahi, PhD

Address: Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Tel: +98 (86) 33400667

E-mail: h.elahi@arakut.ac.ir

اندازه‌گیری تغییرات گرانشی روی مذاب با دما

*سیدحسین الهی^۱، مجید رجائی^۲

۱- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی-گرایش مواد پیشرفته، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

۲- استادیار، مهندسی مکانیک-گرایش طراحی کاربردی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

چکیده

اندازه‌گیری گرانشی مذاب فلزات می‌تواند اطلاعات مفیدی برای فرآیندهای تولیدی که بر پایه ذوب و انجماد باشد فراهم کند. در این مقاله از روش سقوط گلوله برای اندازه‌گیری گرانشی مذاب روی استفاده شده است. از آنجایی که مذاب فلزات کدر هستند برای بررسی روند حرکت ساچمه در مذاب تغییراتی در روش مرسوم اعمال شده است. برای حل این مشکل و بررسی حرکت ساچمه در داخل مذاب مفتول نازک فولادی به ساچمه فرو رونده اتصال داده شد تا سرعت سقوط از انتهای مفتول فولادی که خارج از مذاب قرار می‌گیرد اندازه‌گیری شود. تغییرات گرانشی مذاب روی در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است و همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش دما گرانشی مذاب کاهش یافته است. با افزایش ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گرانشی $0/474 \text{ cp}$ کاهش یافته است. نرخ کاهش گرانشی در ابتدا زیاد ($0/004 \text{ cp/}^\circ\text{C}$) ولی با افزایش بیشتر دما نرخ کاهش گرانشی کاهش ($0/001 \text{ cp/}^\circ\text{C}$) محسوس یافته است. مذاب روی از سیالات ظریف بر است یعنی با افزایش نرخ برش و سرعت متوسط سقوط ساچمه گرانشی کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: گرانشی، روی مذاب، ویسکومتر دمای بالا.

۱. مقدمه

توسعه روش‌های نوین تولید مواد و همچنین گسترش طیف مواد پیشرفته نیاز به شناخت عمیق‌تری از خصوصیات فیزیکی مواد در حالت‌های مختلف از جمله مایع، مایع جامد و جامد دارد. برخلاف خصوصیات حالت جامد و محدوده مایع-جامد، خصوصیات فیزیکی مایعات به‌ویژه مایعات فلزی در دمای بالاتر از دمای ذوب آنها مورد پژوهش کمتری بوده‌اند. دشواری‌های اندازه‌گیری خواص و کمبود روش‌های سنجش و مشاهده هم‌زمان خواص را باید یکی از دلایل این محدودیت‌ها دانست [۱، ۲].

گرانشی از مهم‌ترین مشخصه‌های فیزیکی مایعات است که رفتارهای متنوع رئولوژیکی مایع را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گرانشی به‌عنوان مقاومت مایع در مقابل تنش برشی تعریف شده است و خصوصیت ذاتی یک ماده در بالاتر از دمای ذوب آن و از نظر مفهومی معادل استحکام برشی ماده در حالت جامد است [۲]. سیالیت مذاب پارامتر مهمی است که در پیش‌بینی فرآیندهای وابسته به جریان سیال مانند ریخته‌گری نقش مهمی ایفا می‌کند [۱-۵]. میزان آن به‌طور

1. Fluid Flow

* نویسنده مسئول:

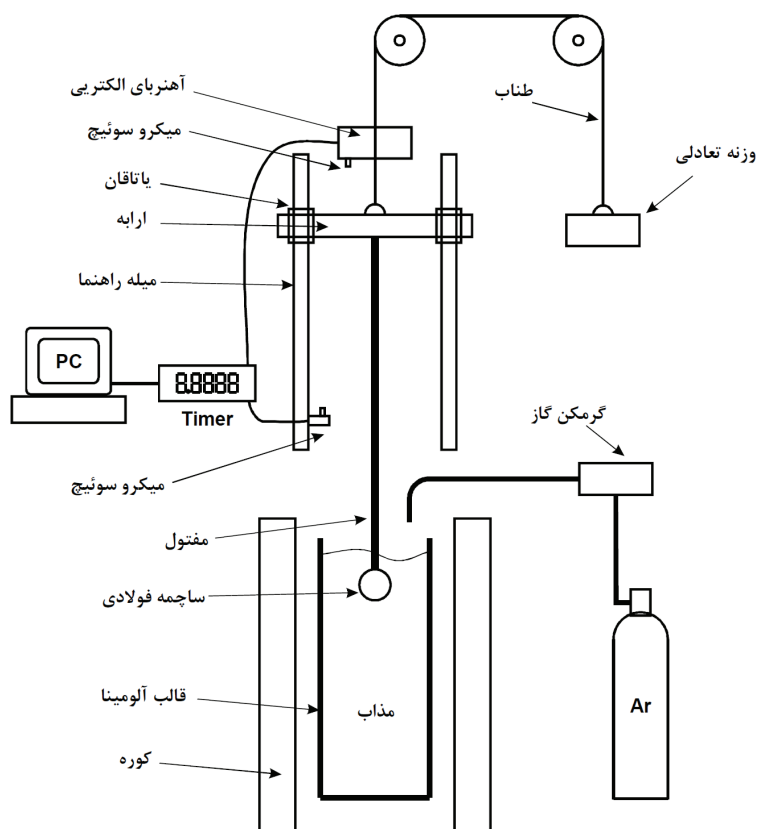
دکتر سید حسین الهی

نشانی: اراک، دانشگاه صنعتی اراک، دانشکده مکانیک.

تلفن: ۳۳۴۰۰۶۶۷ (۸۶) ۹۸+

پست الکترونیکی: h.elahi@arakut.ac.ir

معکوس با گرانشی مذاب در ارتباط است [۵] و چگونگی پر کردن قالب در ریخته‌گری را تعیین می‌کند [۶]. اگرچه این سیالیت به کمک روش‌های مختلف وسیعاً مورد تحقیق بوده است [۱]، اما این تحقیقات متمرکز بر اندازه‌گیری گرانشی به‌عنوان عامل مهم فیزیکی تعیین‌کننده آن نبوده است [۱، ۲]. گرانشی در مسائل هیدرودینامیکی و سرعت واکنش‌ها در مذاب عامل بسیار مهمی است. سرعت خارج شدن حباب‌ها و آخال‌های اکسیدی و همچنین سرعت واکنش‌های سرباره و مذاب در ریخته‌گری توسط این عامل کنترل می‌شود [۷]. همچنین گرانشی بر ضرایب انتقال مانند ضریب نفوذ، انتقال حرارت و کشش سطحی فلزات مذاب تأثیرگذار است [۸]. علاوه بر این در پدیده‌های دیگری نظیر رفتار تغذیه رسانی مذاب در حین انجماد و کیفیت سطحی قطعات ریخته‌گری نیز به نظر می‌رسد بتوان تأثیر گرانشی را بررسی نمود. در عملیات فورج و ریخته‌گری دوفازی مایع-جامد، گرانشی در طراحی قالب بسیار تأثیرگذار است [۹]. اخیراً نیز به دلیل نقش تعیین‌کننده گرانشی در تولید فوم‌های فلزی به روش فوم سازی مذاب این مشخصه مورد توجه بوده است.



شکل ۱. نمای شماتیک از تجهیزات دستگاه

برای انجام آزمایش‌ها، از روی خالص تجاری با خلوص ۹۹/۵ درصد وزنی استفاده شد. با اندازه‌گیری سرعت متوسط سقوط ساچمه و استفاده از رابطه قانون استوکس (رابطه ۱) گرانشی مذاب اندازه‌گیری می‌شود.

رابطه ۱.

$$\mu_s = \frac{d^2(\delta - \rho)g}{18\nu}$$

در این رابطه μ_s گرانشی مذاب، d قطر ساچمه، δ چگالی ساچمه، ρ چگالی مذاب، g شتاب گرانش زمین و سرعت متوسط سقوط ساچمه است. به دلیل شفاف نبودن مذاب فلزات و نمک‌ها و ... حرکت ساچمه در داخل مذاب قابل مشاهده نیست، در نتیجه بررسی سرعت سقوط ساچمه در مایع ممکن نیست. برای این منظور، مفتول نازک فولادی به ساچمه فرو رونده اتصال داده شده است تا سرعت سقوط از انتهای مفتول فولادی که خارج از مذاب قرار می‌گیرد اندازه‌گیری شود. برای اینکه بتوان سرعت سقوط گلوله را از انتهای مفتول بررسی کرد، تجهیزاتی به انتهای مفتول اضافه شد. شکل ۱ نمای شماتیک دستگاه ویسکومتر را نشان می‌دهد.

به انتهای میله آرابه فرود با محدودیت حرکتی اضافه شد تا حرکت ساچمه را در محور عمودی محدود کند. برای نگه‌داشتن

گرانشی مذاب فلزات در بسیاری از مقالات ارائه شده است ولی در سال ۱۹۵۰ و ۱۹۹۳ این داده‌ها به صورت کلی جمع‌آوری شده [۱۱، ۱۲]. به‌طور کلی روش‌های اندازه‌گیری گرانشی به‌ویژه به صورت هم‌زمان دارای دشواری‌های تکنیکی فراوانی است.

در زمینه گرانشی مذاب فلزات بررسی‌هایی صورت گرفته است ولی گرانشی برخی فلزات کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند که روی به علت خورنده بودن مذابش یکی از این فلزات است. گرانشی روی در حالت مذاب را بررسی و مشاهده گردیده که گرانشی مذاب روی نسبتاً کم بوده و با افزایش دما کاهش می‌یابد [۱۱]. این تحقیق به منظور بررسی سیستماتیک تأثیر افزایش دما بر گرانشی مذاب انجام شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

دمای بالای مذاب فلز روی و واکنش زیاد با ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری، بررسی گرانشی مذاب روی با محدودیت‌های زیادی همراه است. از روش سقوط ساچمه در مذاب و قانون استوکس برای بررسی و اندازه‌گیری گرانشی مذاب استفاده شده است [۱۶-۱۸]. سادگی تجهیزات، هزینه کم، دقت بالا، خطای پایین و سادگی کالیبراسیون از مزایای این روش اندازه‌گیری گرانشی است.

طی مسافت ۱۹ سانتی‌متر در ۵ سانتیمتری انتهای ظرف متوقف می‌شد. این فاصله از ته ظرف برای کاهش اثر انتهایی ظرف^۳ بر گرانروی می‌باشد.

در این پژوهش تأثیر دما بر گرانروی مذاب روی در گستره دمایی ۴۳۵ تا ۷۳۵ درجه سانتی‌گراد در محیط گاز آرگون بررسی شده است. از گاز آرگون برای جلوگیری از اکسید شدن مذاب استفاده می‌شود. در این آزمایش بعد از ذوب شدن روی، ابتدا گرانروی در دمای ۴۳۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و سپس دمای کوره ۲۰ درجه افزایش یافت و گرانروی دوباره اندازه‌گیری شد این رویه با بازه دمایی ۲۰ درجه‌ای تا دمای ۷۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. از آنجایی که تغییرات چگالی در محاسبات گرانروی تأثیرگذار است، چگالی مذاب روی با استفاده از داده‌های موجود در مراجع استخراج شد [۲۰]. برای بررسی نیوتونی بودن یا نبودن مذاب روی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گرانروی مذاب با نرخ برش‌های متفاوت اندازه‌گیری شد.

به علت پایین بودن دمای گاز خروجی کپسول گاز آرگون، از یک دمنده مجهز به گرمکن استفاده شده است. این گرمکن قادر به گرم کردن دمای گاز تا دمای مورد نیاز (حداکثر ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) بود.

۳. نتایج و بحث

شکل ۲ نتیجه حاصل از بررسی گرانروی مذاب روی در محیط گاز آرگون را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است با افزایش دما گرانروی کاهش یافته است.

با توجه به اینکه گرانروی مواد با افزایش دما کاهش می‌یابد پیش‌بینی می‌شد که با افزایش دما گرانروی روی در محیط کاهش یابد. با افزایش دما تا ۵۱۵ درجه سانتی‌گراد گرانروی با سرعت بالاتری کاهش می‌یابد و از این دما به بعد سرعت کاهش گرانروی کم می‌شود به گونه‌ای که در دماهای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نرخ کاهش گرانروی شدیداً افت می‌کند و از ۰/۰۰۴ CP/°C به ۰/۰۰۱ CP/°C می‌رسد. در شکل ۲ این نتایج با تحقیقات انجام شده مقایسه شده است. شکل ۳ تغییرات گرانروی با نرخ برش‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است با افزایش نرخ برش و سرعت متوسط سقوط ساچمه گرانروی کاهش یافته است که نشان می‌دهد مذاب روی سیال غیر نیوتونی و از نوع ظریف بر^۴ می‌باشد. این رفتار در مورد مذاب سایر فلزات نیز مشاهده شده است [۲۱-۲۳].

۴. نتیجه‌گیری

۱- نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که ویسکومتر ساخته شده قابلیت اندازه‌گیری گرانروی مذاب

ارابه در ارتفاع مورد نظر از یک آهن‌ربای الکتریکی استفاده شده است. با قطع جریان، ارابه رها شده و ساچمه در داخل مذاب و در مسیر عمودی فرو می‌رود. زمان سقوط توسط یک زمان‌سنج با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. زمان سقوط توسط دو میکروسوئیچ که یکی در لحظه رهاسازی باز می‌شود و دیگری در لحظه برخورد بسته می‌شود کنترل می‌شود.

یکی از ویژگی‌های مهم دستگاه‌های ویسکومتر و رئومتر بررسی تغییرات گرانروی با تغییرات نرخ برش^۵ می‌باشد، در سیالات غیر نیوتونی با تغییر نرخ برش گرانروی آن‌ها به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. به منظور تغییر نرخ برش، به وسیله قرقره وزنه تعادلی به مجموعه فرو رونده (ساچمه، مفتول، ارابه و بلبرینگ‌ها) در مذاب اضافه شد تا با تغییر در مقدار جرم وزنه تعادلی بتوان سرعت حرکت مجموعه فرو رونده را کنترل کرد. هرچه قدر که جرم وزنه تعادلی به مجموعه فرو رونده نزدیک‌تر باشد سرعت متوسط سقوط گلوله کمتر خواهد شد و نرخ برش کاهش می‌یابد و بالعکس هرچه قدر جرم وزنه تعادلی از جرم مجموعه فرو رونده کمتر باشد متوسط سرعت سقوط گلوله و در نتیجه نرخ برش افزایش می‌یابد. با استفاده از رابطه زیر می‌توان گرانروی مذاب را با توجه به زمان سقوط محاسبه کرد. این رابطه از تلفیق رابطه استوکس و قوانین اول تا سوم نیوتون به دست آمده است [۱۹]:

رابطه ۲.

$$\mu = K \frac{t^2 \left((M_1 - M_2 - 4/3 \pi r^3 \rho_{liq}) g - F_f \right) - (M_1 + M_2)}{12\pi \tau r}$$

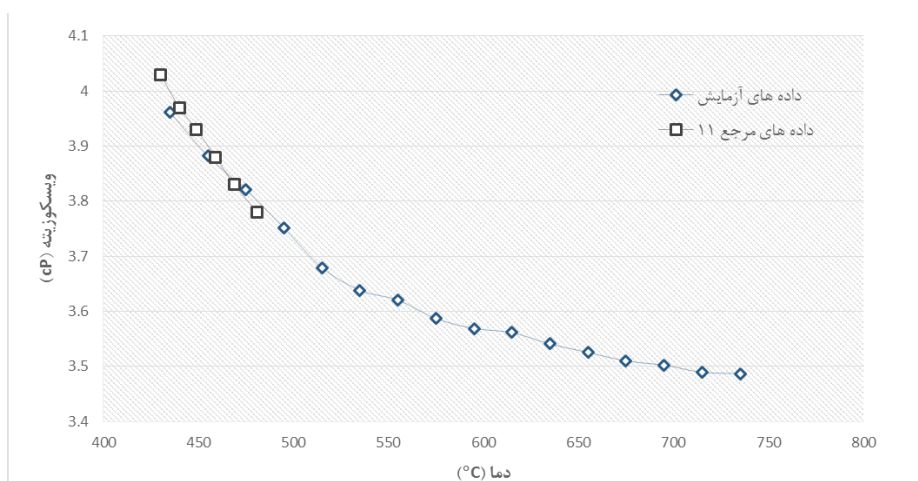
در این رابطه M_1 جرم ارابه و ساچمه، M_2 جرم وزنه تعادلی، t زمان سقوط، r شعاع ساچمه، g شتاب زمین، ρ_{liq} چگالی مذاب، L طول مسیری که ساچمه طی می‌کند است. K ضریب اصلاح است که با استفاده از مواد با گرانروی مشخص به دست می‌آید، و با استفاده از داده‌های گرانروی مذاب مورد نظر از سایر منابع ضریب K مقایسه و اصلاح می‌شود؛ این ضریب در محاسبات ۱/۰۳۵ در نظر گرفته شد. F_f نیروی اصطکاک است که از طریق سقوط آزاد ساچمه در هوا و قرار دادن μ برابر صفر و استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید. نیروی اصطکاک ۰/۰۸۶ نیوتن به دست آمد.

هر چه مسافت طی شده (L) توسط ساچمه بیشتر باشد، دقت اندازه‌گیری گرانروی در این روش بیشتر می‌شود. برای این منظور بوتله‌ای از جنس آلومینا با قطر داخلی ۵۰ و طول ۲۵۰ میلی‌متر (حداکثر ارتفاع کوره) انتخاب و ساخته شد تا علاوه بر ایجاد مسافت زیاد و طولانی برای سقوط ساچمه، حجم مذاب موردنیاز جهت انجام تست نیز به حداقل برسد. برای حذف اثرات سطح مذاب و اکسیداسیون سطحی، گلوله از یک سانتیمتر پایین‌تر از سطح مذاب رها می‌شد و بعد از

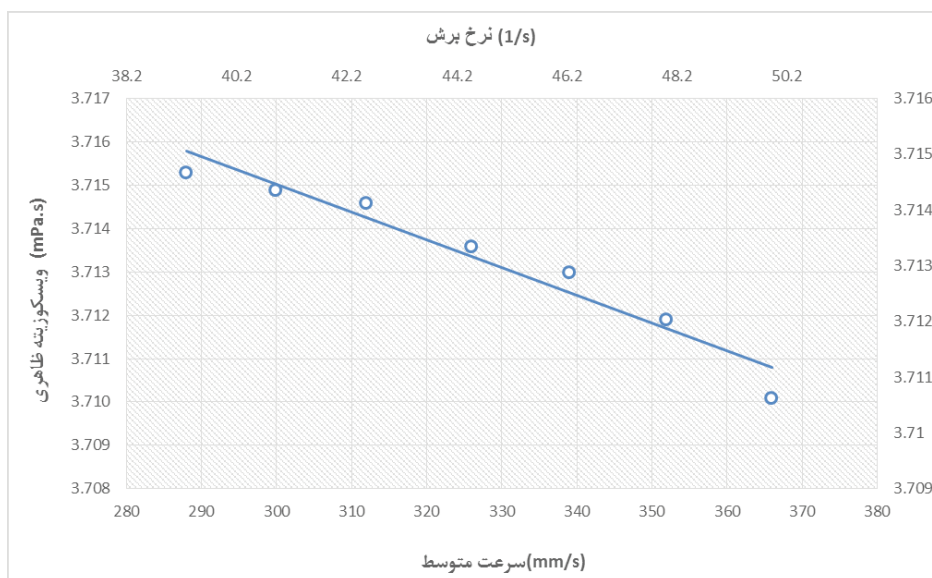
3. End Effect

4. Shear Thinning

2. Shear Rate



شکل ۲. تغییرات گرانشی روی مذاب با دما در محیط گاز خنثی



شکل ۳. تغییرات گرانشی روی مذاب در نرخ برش‌های متفاوت (در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)

References

- [1] Brooks RF, Dinsdale AT, Quedstedt PN. The measurement of viscosity of alloys—a review of methods, data and models. *Meas-Sci Technol.* 2005; 16:354–362.
- [2] Dinsdale AT, Quedstedt PN. The Viscosity of Aluminum and its Alloys – A review of Data and Models. *J Mater Sci.* 2004; 39(24): 7221-7228.
- [3] Banhart J. *Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal foams.* *Prog Mater Sci.* 2001; 46: 559–632.
- [4] Babcsan N, Banhart J, Leitmeier D. *Metal Foams—Manufacturing and Physics of Foaming.* 2005. Available from: https://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2012/2/tartalom/2005/jan/03_Babcsan.pdf
- [5] White Fm. *Fluid Mechanics.* Butterworth: Heinemann; 1992.
- [6] Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering Tribology.* Butterworth: Heinemann; 2001.

فلزات در دمای بالا و با دقت مناسب را دارد به گونه‌ای که می‌توان تغییرات گرانشی که البته نسبتاً جزئی است را به راحتی با این روش اندازه‌گیری کرد.

۲- از قابلیت‌های این روش ارتقاء یافته بررسی تغییرات گرانشی در نرخ برش‌های متفاوت است که رئومترها باقیمت بسیار بالا، این توانایی را دارند و حداکثر دمای کاری آن‌ها در حدود دمای ذوب پلیمرها است.

۳- همان‌طور که انتظار می‌رفت گرانشی مذاب فلز روی با افزایش دما کاهش یافت.

۴- نرخ کاهش گرانشی در ابتدا زیاد و در ادامه کاهش یافت به گونه‌ای که در دمای بیشتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییرات گرانشی بسیار جزئی بود.

۵- مذاب روی یک سیال غیر نیوتونی است و با افزایش نرخ برش گرانشی آن کاهش می‌یابد.

- [7] Iida T, Guthrie RIL. The Physical Properties of Liquid Metals. Oxford:Clarendon Press; 1988.
- [8] Bakhtiyarov SI, Overfelt RA. Measurement of Liquid Metal Viscosity by Rotational Technique. Acta Mater. 1999; 47(17): 4311-1319.
- [9] Han SH, Kang CG, Sung JH. Investigation of viscosity properties for rheology forming of AM50A magnesium alloy. J Mater Process Tech. 2007;187-188: 335-338.
- [10] Roach SJ, Henein HA. A New Method to Dynamically Measure the Surface Tension, Viscosity, and Density of Melts. Metall and Materi Trans B. 2005; 36 (5): 667-676.
- [11] Hopkins MR, Toye TC. The Determination of the Viscosity of Molten Metals. Proc. Phys. Soc. B. 1950; 63(10): 773-780.
- [12] Chhabra RP, Tripathi A. A correlation for the viscosity of liquid metals High Temp. High Press. 1993; 25: 713-718.
- [13] Song ZL, Ma LQ, Wu ZJ, He DP. Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process. J Mater Sci. 2000; 35: 15-20.
- [14] Yang CC, Nakae H. The effects of viscosity and cooling conditions on the foamability of aluminum alloy. J Mater Process Tech. 2003;141: 202-206.
- [15] Miyoshi T, Itoh M, Akiyama S, Kitahara A. ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications. Adv Eng Mater. 2000; 2(4): 179-183.
- [16] Sutterby JL. Falling sphere viscometer. J Phys E: Sci Instrum. 1973; 6: 1001.
- [17] Morgan PG. Notes on the falling sphere viscometer. Chem Eng Sci. 1961; 15: 144-148.
- [18] Funakoshi KI, Suzuki A, Terasaki H. In situ viscosity measurements of albite melt under high pressure. J Phys-Condens Mat. 2002; 14(44): 11343.
- [19] Elahi SH, Adelnia H, Shahverdi HR. A simple accurate method for measuring viscosity of liquid metals at high temperatures. J Rheol. 2012; 56: 941.
- [20] Assael MJ, Armyra IJ, Brillo J, Stankus SV, Wu J, Wakeham WA. Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Cadmium, Cobalt, Gallium, Indium, Mercury, Silicon, Thallium, and Zinc. J Phys Chem Ref Data. 2012; 41, 3:033101.
- [21] Malika MM, Jeyakumara M, Hamed MS, Walker BM, Shankara S. Rotational rheometry of liquid metal systems: Measurement geometry selection and flow curve analysis. J Non-Newtonian Fluid Mech. 2010; 165: 733-742.
- [22] Varsani V, Fan Z. Non-Newtonian Behaviour of Liquid Metals. TMS Orlando. 2007; 67-76.
- [23] Desgranges C, Delhommelle J. Viscosity of liquid iron under high pressure and high temperature: equilibrium and nonequilibrium molecular dynamics simulation studies. Phys. Rev. B. 2007; 76: 172102.