

مروری بر بررسی روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته مذاب فلزات

سید حسین الهی^۱، هادی عبدی^۲، حمیدرضا شاهوردی^{۳*}

۱- استادیار گروه مکانیک دانشگاه صنعتی اراک. (پست الکترونیک: h.elahi@arakut.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تربیت مدرس. (پست الکترونیک: gmail.com@v.h.abdi)

۳- دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تربیت مدرس. (پست الکترونیک: shahverdi@modares.ac.ir)

A Review on Investigation of different methods for measuring molten metal viscosity

S. H. Elahi¹, H. Abdi², H. R. Shahverdi^{1*3}

1- Assistance Prof., Dept. of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, E-Mail: h.elahi@arakut.ac.ir

2- MSc student, Dept. of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Tarbiat Modares University, E-Mail: h.abdi.7@gmail.com

3- Associate professor, Dept. of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Tarbiat Modares University, E-Mail: shahverdi@modares.ac.ir

چکیده

در بسیاری از فرایندهای تولیدی که بر پایه ذوب و انجماد می باشد، مانند ریخته گری، اندازه گیری ویسکوزیته و پیش بینی سیالیت مذاب فلزات در دماها و ترکیب های مختلف می تواند باعث بهبود فرآیند تولید و کاهش ضایعات شود. در این مقاله شماری از روشهایی که برای اندازه گیری ویسکوزیته مذاب ها و سیالات مورد استفاده قرار می گیرد، شرح داده شده اند. از این میان می توان به روشهای موئینگی، مخزن نوسانگر، بوته چرخان، صفحه نوسانگر، مخزن با سوراخ تخلیه و ... اشاره نمود. از جمله مدل هایی که برای تخمین ویسکوزیته عناصر و سیستم های چند جزئی و همچنین ارتباط ویسکوزیته با دما، استفاده شده اند عبارتند از مدل آرنیوس، جبرا، آندرید، تئوری حجم آزاد هیلدبراند و ... در نهایت مقایسه ای از روشهای مختلف اندازه گیری ویسکوزیته مذاب ها ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ویسکوزیته، مذاب فلزات، اندازه گیری ویسکوزیته، مدل‌های اندازه گیری ویسکوزیته

Abstract

In many manufacturing process which are based on melting and solidification, like casting, measurement of viscosity and prediction of fluidity of molten metal in variant temperatures and alloy composition could improve quality of process and decreasing losses. In this paper different methods for measurement of viscosity like capillary method, oscillating vessel viscometer, falling body or counterbalanced sphere viscometer, oscillating plate method, rotating cylinder and ... have been investigated. Arrhenius equation, Andrade treatment, Hildebrand's free volume theory, Chhabra model and ... are the models which were used for estimation of viscosity of metals and alloys and their relation with temperature. Finally comparison of different procedure for viscosity measurement of molten metals is presented.

Keyword: Viscosity, molten metal, viscosity measurement, models for viscosity measurement

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

تاثیرگذار است [۷]. اخیراً نیز به دلیل نقش تعیین کننده ویسکوزیته در تولید فومهای فلزی با روش‌های ذوبی، این پارامتر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

اگرچه سیالیت مایعات به کمک روشهای مختلف وسیعاً مورد تحقیق بوده است [۸]، اما این تحقیقات متمرکز بر اندازه‌گیری ویسکوزیته به عنوان عامل مهم فیزیکی تعیین کننده آن نبوده است [۸ و ۹]. چرا که در اغلب موارد اندازه‌گیری اکثر خواص ترموفیزیکی مواد بسیار مشکل و زمان بر می‌باشد لذا ایجاد سیستمی با کاربری آسان، برای اندازه‌گیری این خواص، اهمیت بسیار زیادی دارد؛ چنین سیستم‌هایی برای اندازه‌گیری آنتالپی، چگالی، رسانایی الکتریکی و... برای بسیاری از مواد و آلیاژهای صنعتی ایجاد شده است [۹] که اساس محاسبات انجام شده در آنها تعادل فازها و خواص ترمودینامیکی و مدل‌های ساده فیزیکی مواد می‌باشد. ولی باید توجه داشت که مدل کردن چنین سیستم‌هایی برای ویسکوزیته یک سیال بدلیل وجود حرکت‌های انتقالی و تصادفی مواد، بسیار مشکل است، که این مشکل در ارتباط با مذاب فلزات به دلیل دمای بالای سیال و حرکت‌های سریع اتمی و مشکلاتی از قبیل لزوم حفظ دمای ثابت، انجماد، اکسیداسیون و عدم وجود تلاطم‌های سطحی و داخلی اهمیت بیشتری دارد [۹].

با این وجود تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است که با استفاده از مدل‌های مختلف نظیر آرنیوس، جبرا، آندرید، تئوری حجم آزاد هیلدبراند و... روش‌های عملی زیادی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مایعات در دماهای بالا ایجاد کرده اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های چرخان، موئینگی، سقوط گلوله و... اشاره نمود، لذا با توجه به حساسیت و اهمیت اندازه‌گیری ویسکوزیته به عنوان یکی از مهمترین عوامل تعیین کننده در اکثر فرایندهای حالت مایع، روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته در دماهای بالا در ادامه شرح داده شده است.

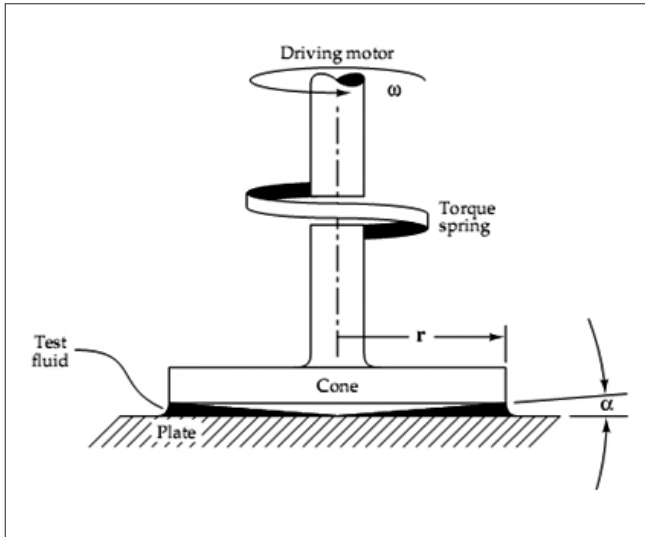
روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته مذاب

در سال‌های اخیر تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مایعات و مواد مذاب ابداع گردیده است، ولی روش‌های مناسب برای فلزات مایع به دلیل مشکلات ذکر شده محدود می‌باشند، لذا تنها چند روش محدود برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مذاب فلزات وجود دارد که این مسأله در مورد آلیاژهای این فلزات حادث است و مقادیر ثبت شده از ویسکوزیته این فلزات نشان دهنده پراکندگی زیاد در این مقادیر است. با این وجود دو روش موئینگی و روش‌های ویسکومتری چرخان مورد توجه بیشتری بوده‌اند. بسیاری از ویسکومترهایی که برای اندازه‌گیری ویسکوزیته

مدل سازی ریاضی و کنترل عملیات پردازش فلز مذاب نیاز به آگاهی از خواص ترموفیزیکی فلزات در دمای ذوب آنها دارد. فرآیندهای انتقال جرم، اندازه حرکت و انرژی در مذاب در صورتی به خوبی قابل درک هستند که پارامترهای ترموفیزیکی آن به دقت اندازه‌گیری شوند. توسعه روش‌های نوین تولید مواد و همچنین گسترش طیف مواد پیشرفته نیاز به شناخت عمیق تری از این خواص در حالت‌های مختلف از جمله مایع، مایع-جامد و جامد دارد. برخلاف خصوصیات حالت جامد و محدود مایع-جامد، خصوصیات فیزیکی مایعات به ویژه مایعات فلزی در دمای بالاتر از دمای ذوب آنها مورد پژوهش کمتری بوده اند. دشواری‌های اندازه‌گیری خواص و کمبود روش‌های سنجش و مشاهده همزمان خواص را باید یکی از دلایل این محدودیتها دانست [۱،۲] این در حالی است که دماهای ذوب بالا، واکنش پذیری شیمیایی بالا و گستره عددی پایین این خواص، نیاز به طرح تکنیک‌هایی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته فلزات و آلیاژهای مذاب را ایجاد کرده است [۲].

ویسکوزیته مایع یکی از مهمترین مشخصه‌های فیزیکی و ذاتی مایعات و مواد مختلف در دماهای بالاتر از دمای ذوب آنها می‌باشد که رفتارهای متنوع رئولوژیکی مایع را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ویسکوزیته به عنوان مقاومت مایع در مقابل تنش برشی تعریف شده است که تنش‌های موضعی یک سیال متحرک را به میزان کرنش وارد بر آن ربط می‌دهد و از نظر مفهومی معادل استحکام برشی ماده در حالت جامد است [۳] ویسکوزیته سیال با تغییر دما، فشار، ترکیب و شرایط فیزیکی و محیطی سیال تغییر می‌کند. سیالیت مذاب پارامتر تعیین کننده‌ای است که در پیش بینی فرایندهای وابسته به جریان سیال، مانند ریخته‌گری نقش مهمی ایفا می‌کند [۱-۴] و میزان آن بطور معکوس با ویسکوزیته مذاب در ارتباط است [۴، ۳]؛ هم چنین چگونگی و امکان سیال برای پرکردن قالب در ریخته‌گری را تعیین می‌کند.

ویسکوزیته در مسائل هیدرودینامیکی و سینتیکی واکنش‌ها در مذاب پارامتر بسیار مهمی است. سرعت خارج شدن حباب‌ها و آخال‌های اکسیدی و همچنین سرعت واکنش‌های سرباره و مذاب در ریخته‌گری توسط این پارامتر کنترل می‌شود [۵]. همچنین ویسکوزیته بر ضرایب انتقال مانند ضریب نفوذ، انتقال حرارت و کشش سطحی فلزات مذاب تاثیرگذار می‌باشد [۶]. علاوه بر این در پدیده‌های دیگری نظیر رفتار تغذیه رسانی مذاب در حین انجماد و کیفیت سطحی قطعات ریخته‌گری نیز به نظر می‌رسد بتوان تاثیر ویسکوزیته را بررسی نمود. در عملیات فورج و ریخته‌گری در حالت دوفازی مایع-جامد، ویسکوزیته در طراحی قالب بسیار



شکل ۲: شماتیک ویسکومتر صفحه و مخروط

معمولاً به این ویسکومترها کوره و یا حمام اضافه می‌شود تا علاوه بر ایجاد دمای بالا و یکنواخت بتوان تاثیر تغییرات دما را نیز بر روی ویسکوزیته بررسی نمود.

نوع دیگری از ویسکومترهای چرخان، ویسکومترهای صفحه و مخروط می‌باشند. در این ویسکومترها از یک سطح مخروطی شکل ۴ و یک صفحه تخت استفاده می‌شود و مایع بین دو سطح قرار می‌گیرد، که هر دو سطح قابلیت چرخش دارند (شکل ۲). مزیت بزرگ این روش در مقایسه با روش سیلندر چرخان در این است که حجم مایع مورد استفاده بسیار کمتر می‌باشد [۶]. ویسکوزیته مایع در این روش از رابطه زیر بدست می‌آید [۸].

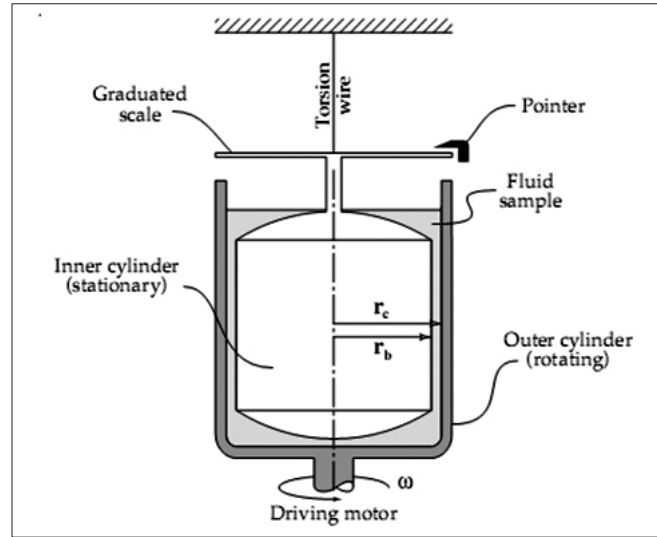
رابطه ۲

$$\eta = \frac{3M\alpha \cos^2 \alpha (1 - \alpha^2/2)}{2\pi\omega r^3} = \frac{kM}{\omega}$$

از این ویسکومتر برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مایعات مختلف، مانند خون، در دماهای معمولی و متوسط (۵-۱۰۰ درجه سانتیگراد) استفاده‌های زیادی شده است. از مزایای این ویسکومتر بررسی تغییرات تنش برشی سیال نسبت به پارامترهای مختلف مثل زمان، دما و سرعت چرخش سیلندر می‌باشد [۱۰-۱۵]. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مایعات در دما و فشار بالا [۱۶ و ۱۷] و همچنین نمک، سرباره و مذاب فلزات [۱۸-۲۱] از این ویسکومتر استفاده شده است.

۲- ویسکومتر سقوط گلوله^۵

یکی از رایجترین روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته، روش



شکل ۱: تصویر ساده ای از یک ویسکومتر با سیلندر چرخان

مایعات در دمای بالا استفاده می‌شوند برای ایجاد الگوی حرارتی یکنواخت دارای حمام دمای ثابت می‌باشند تا اینکه بتوان رفتار ویسکوزیته مایعات را در دماهای مختلف اندازه‌گیری نمود.

۱- ویسکومترهای چرخان^۲

ویسکومترهای چرخشی برای اندازه‌گیری خواص برشی مواد مذاب، بویژه ویسکوزیته برشی آنها، استفاده می‌شود. در این ویسکومترها مایع مورد آزمایش در فاصله موجود در بین دو سطح که یکی از آنها ساکن و دیگری متحرک می‌باشد، قرار می‌گیرد (ASTM D2983). شکل ۱ شماتیکی از یک دستگاه ویسکومتر با سیلندر چرخان را نشان می‌دهد [۶].

در این ویسکومترها که به ویسکومتر کووت^۲ نیز معروف هستند، گشتاور لازم برای مقابله با تنش برشی سیال در بین دو سطح، اندازه‌گیری می‌شود، ویسکوزیته مایع در این روش برای سیال‌های نیوتنی از رابطه زیر بدست می‌آید [۶ و ۸]:

رابطه ۱

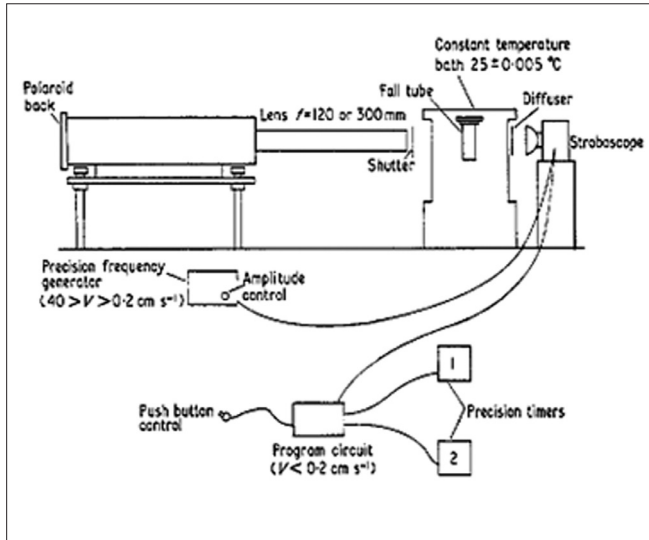
$$\eta = \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \frac{M}{4\pi d\omega} = \frac{kM}{\omega}$$

که در این رابطه M گشتاور اعمال شده به سیلندر داخلی، ω سرعت زاویه ای سیلندر، r_۱ و r_۰ به ترتیب شعاع سیلندر داخلی و خارجی و d ارتفاع سیلندر می‌باشد.

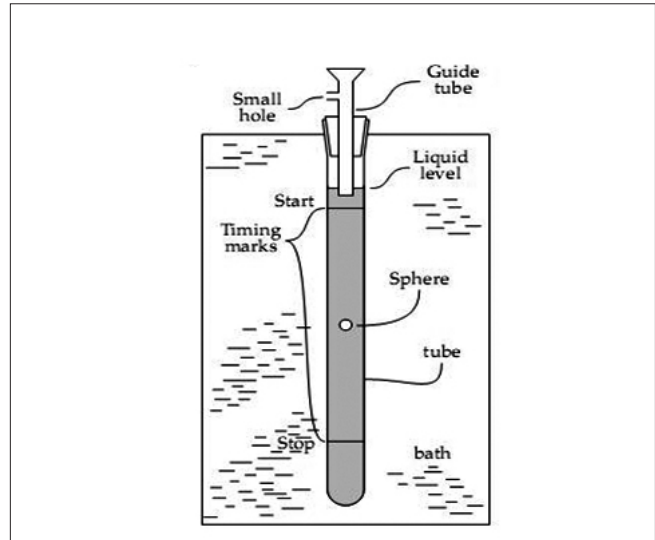
اندازه‌گیری ویسکوزیته به دو روش انجام می‌گیرد، در روش اول اعمال گشتاور ثابت به سطح چرخان و اندازه‌گیری تغییرات سرعت چرخش آن و در روش دوم اعمال سرعت ثابت به سطح چرخان و اندازه‌گیری تغییرات گشتاور ایجاد شده در آن می‌باشد [۶ و ۹].

2- Rotational Viscometer
3- Couette Viscometer

4- Conical Surface
5- Falling sphere viscometer



شکل ۴: تصویر شماتیک دستگاه سقوط گلوله



شکل ۳: نمایی از یک ویسکومتر سقوط گلوله

هارا از کره Pt-20%Rh برای تعیین ویسکوزیته یک سیستم اکسیدی در هوا استفاده کرد ولی در مورد مذابها با ویسکوزیته پایین (عدد رینولدز $Re < 0.1$) قانون استوکس پایدار نمانده و باید معادله اصلاح یافته، مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

به علت کدر بودن مذاب فلزات و هم چنین دمای بالا امکان استفاده از سنسورهای مرسوم، مانند سنسورهای نوری و مغناطیسی، برای بررسی حرکت ساچمه در مذاب میسر نمی باشد. ویسکوزیته آلیت مذاب در فشار بالا و دمای بالا و با استفاده از رادیوگرافی اشعه ایکس اندازه گیری شده است [۲۴]. استفاده از اشعه ایکس برای کنترل حرکت گلوله در مذاب باعث می شود که این روش هزینه بر و پیچیده گردد و محدودیت هایی را از جهت خطرات پرتوگیری ایجاد کند. الهی و همکاران [۲۵] برای حل این مشکل و بررسی حرکت ساچمه در داخل مذاب مفتول نازک فولادی به ساچمه فرو رونده اتصال دادند تا سرعت سقوط از انتهای مفتول فولادی که خارج از مذاب قرار می گیرد اندازه گیری شود. مهمترین قسمت در این دستگاه که آن را متمایز می کند، افزودن وزنه تعادلی با جرم مشخص توسط قرقره به ساچمه فرو رونده می باشد. به علت کم بودن نیروی بازدارنده ۱۰ و ویسکوزیته مذاب فلزات نسبت به سایر نیروهای موجود، وزنه تعادلی اضافه شده است تا لختی سیستم بالا رود و سرعت سقوط ساچمه کاهش یابد. از طرف دیگر این وزنه با خنثی کردن نیروهای دیگر مانند نیروی وزن، تاثیر نیروی بازدارنده بر سرعت و زمان سقوط ساچمه را افزایش می دهد به گونه ای که تغییرات حتی اندک ویسکوزیته تاثیر بیشتری از خود نشان می دهد، در نتیجه ویسکوزیته با دقت بالاتری اندازه گیری می شود.

سقوط گلوله می باشد، این روش ساده و ارزان می باشد [۲۲]. در این روش مایع مورد آزمایش در داخل یک بوته قرار داده می شود و سپس گلوله ای از جنس تیتانیم به داخل آن انداخته می شود [۲۳]، زمان سقوط گلوله در داخل مایع، بین دو نقطه مشخص شده، اندازه گیری می شود و با استفاده از قانون استوکس^۶ ویسکوزیته مایع اندازه گیری می شود. در بعضی از این روشها از عکس برداری اشعه X برای اندازه گیری دقیق سرعت سقوط استفاده می شود؛ این روش برای اندازه گیری ویسکوزیته تحت فشارهای بالا نیز استفاده می شود، شکل ۳ شمای ساده ای از یک ویسکومتر سقوط گلوله را نشان می دهد [۲۴ و ۲۵].

ویسکوزیته مایع با استفاده از قانون استوکس به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho_k - \rho_{liq})}{9s} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه g ثابت شتاب گرانشی، r شعاع کره، ρ_k و ρ_{liq} به ترتیب دانسیته کره و مایع و s، سرعت نزول یا صعود کره است. در این روش و قطر توپ مورد استفاده باید کمتر از $\frac{1}{10}$ قطر بوته باشد [۲۴ و ۲۵].

از این ویسکومتر می توان برای اندازه گیری ویسکوزیته بسیاری از سیالات با خواص مختلف (نیوتونی و غیر نیوتونی) و در گستره وسیعی از ویسکوزیته استفاده نمود [۲۶-۲۲]. این روش توسط اندل^۷ برای سرباره ها و شیشه ها، با استفاده از اندازه گیری طول زمان عبور دادن گلوله از مذاب، تحت نیروی استفاده شده است [۸]. شکل ۴ شماتیکی از دستگاه سقوط گلوله به همراه حمام دمای ثابت و ملحقات ثبت زمان را نشان می دهد.

8- Hara
9- Reynolds number
10- Drag force

6- Stokes Law
7- Anddel

حالت تعادل در داخل لوله موئین، با استفاده از قانون پوازویل ۱۲ بدست می‌آید.

$$\eta = \frac{\pi^4 \rho g h t}{8\nu(l + nr)} - \frac{m\nu}{8\pi(l + nr)t}$$

رابطه ۴

در این رابطه l و r به ترتیب طول لوله و شعاع موئین، h ارتفاع مؤثر حجم مایع، ρ دانسیته مایع، V حجم تخلیه شده مایع در زمان t و n ثابت‌هایی هستند که بطور عملی تعیین می‌گردند [۳۶]. تا کنون انواع مختلفی از این ویسکومتر با دقت بالاتر، تجهیزات اندازه‌گیری متفاوت و توانایی‌های مختلف، مانند حمام کنترل دما و اندازه‌گیری ویسکوزیته مستقل از جریان، ساخته شده است [۳۷-۴۱].

علاوه بر نیوتنی بودن سیال، سیلان صفحه‌ای و آرام سیال (با عدد رینولدز کم) از شرایط این روش اندازه‌گیری می‌باشد، برای دستیابی به این شرایط از یک تیوپ مناسب و بلند (در حالت کلی $r < 0.15-0.2$ mm و $l < 70-80$ mm) استفاده می‌شود. که این امر نیازمند به کوره‌ای با طول نسبتاً بلند و گرمادهی یکنواخت می‌باشد. شکل ۶ شماتیکی از ویسکومتر موئینی در غیاب حمام دمای ثابت را نشان می‌دهد.

بررسی مسائل هیدرودینامیکی [۴۲]، خواص رئولوژی دوغاب‌ها [۴۳]، اندازه‌گیری ویسکوزیته مایعات غیر نیوتونی [۴۴] و تخمین وزن مولکولی پلیمرها [۴۵] از نمونه کابردهای این ویسکومتر می‌باشد. ویسکوزیته خون نیز با این روش اندازه‌گیری شده است [۴۶].

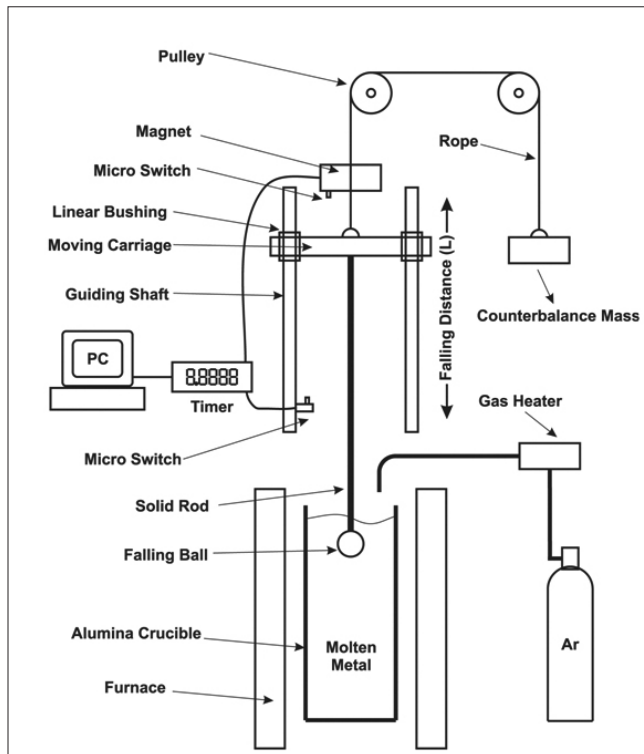
برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مذاب فلزات از این روش استفاده شده است. انسداد لوله موئین توسط حبابها یا ناخالصی‌های اکسیدی، بویژه در آلیاژهای آلومینیوم، یک مشکل متداول در این روش می‌باشد. همچنین به خاطر محدودیت تجهیزات در اغلب موارد اندازه‌گیری ویسکوزیته تا دمای 1200°C محدود می‌شود. ویسکوزیته فلزاتی نظیر، بیسموت با این روش با موفقیت اندازه‌گیری شده است [۸، ۹ و ۲۳].

۴- ویسکومتر با مخزن نوسانگر^{۱۳}:

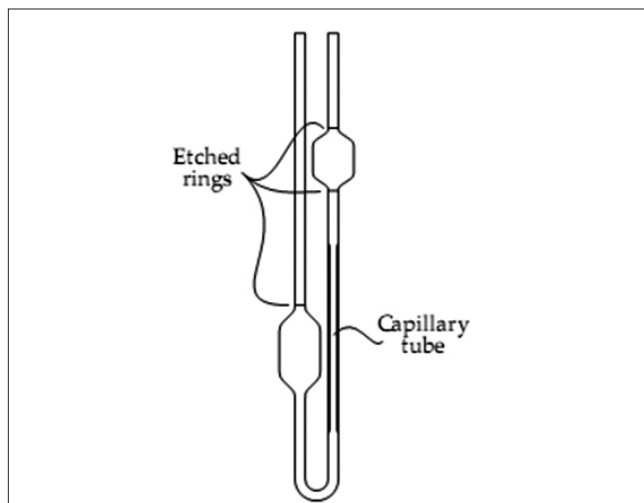
این روش رایج‌ترین روش برای اندازه‌گیری ویسکوزیته می‌باشد، در این روش مایع در یک مخزن که عموماً به شکل استوانه است قرار داده می‌شود و سپس مخزن حول محور عمودی خود به حرکت درمی‌آید، این حرکت به علت جذب انرژی و انتشار آن درون مایع، میرا می‌شود [۴۷-۴۹].

این ویسکومتر توانایی اندازه‌گیری ویسکوزیته سیالات نیوتونی و غیر نیوتونی را دارد [۵۰ و ۵۱]. از این روش ویسکومترهای

12- Poiseuille's Law
13- Oscillating Vessel Viscometer



شکل ۵: نمای شماتیکی ویسکومتر سقوط گلوله اصلاح شده [۳۵]

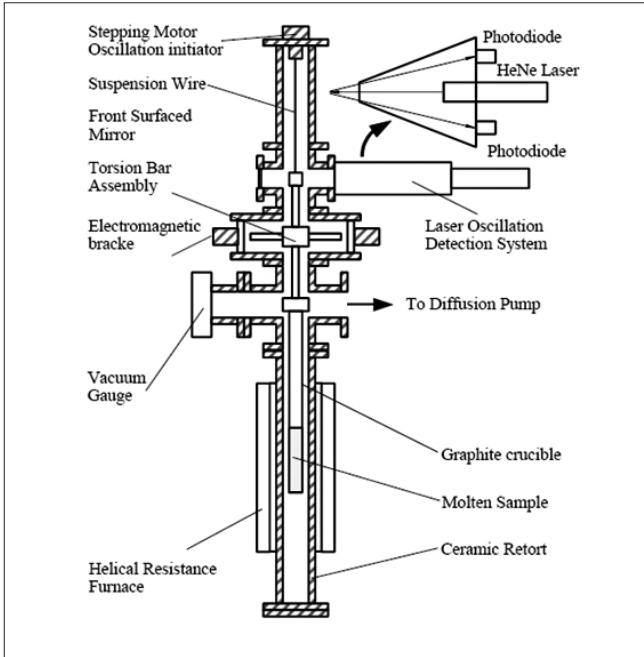


شکل ۶: شماتیکی از ویسکومتر موئینی

۳- ویسکومتر موئینی^{۱۱}

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته برشی مواد مذاب بطور عمده از ویسکومتر موئینی استفاده می‌شود، ویسکوزیته سیال بر اساس اندازه‌گیری حجم سیالی که از درون یک لوله موئین بصورت آرام و تعادلی می‌گذرد، اندازه‌گیری می‌شود (ASTM D445, ASTM D2161). در ویسکومترهای موئینی، ویسکوزیته حرکتی سیال با استفاده از مدت زمان لازم برای سیلان این حجم از مایع از درون لوله موئین بدست می‌آید [۸ و ۳۶]. ویسکوزیته مایع برای سیال در

11- Capillary Viscometer



شکل ۷: شماتیکی از یک ویسکومتر با مخزن نوسانگر

$$\rho\eta = \frac{R_m^2}{\pi f A^2} \left(\frac{f_a E_a}{f E} - 1 \right)^2 = k\theta_0 \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه ρ دانسیته مایع، E, E_a به ترتیب دامنه‌های نوسانات در هوا و مایع، f, f_a به ترتیب فرکانس نوسانات در هوا و در مایع و A ، مساحت صفحه، R_m مولفه اصلی مقاومت مکانیکی است [۹].

- فرضیاتی که در این روش در نظر گرفته شده است عبارتند از:
- مایع از نوع نیوتنی است.
 - جریان توربولنت ظاهر نمی‌گردد.
 - هیچ لغزشی بین صفحه و مایع وجود ندارد.
 - صفحه نوسانگر باید کاملاً صاف و مسطح بوده و اندازه آن بیشتر از یک طول موج باشد.
 - اندازه مخزن به اندازه کافی بزرگ بوده و تأثیر امواج منعکس شده از دیوارها و تأثیر قسمت‌های انتهایی صفحه روی افت دامنه قابل صرف نظر کردن باشد.

از این روش بیشتر برای اندازه گیری ویسکوزیته گازها استفاده می‌شود زیرا شرایط فوق برای گازها بیشتر از مایعات صادق است [۶۵-۶۷]

گرچه روش لرزاندن یک صفحه نوسانگر نازک با سطح بزرگ در داخل مایع می‌تواند در تئوری یک روش ساده برای اندازه گیری فلزات مایع با ویسکوزیته پایین باشد ولی در عمل این روش برای اندازه‌گیری ویسکوزیته فلزات مایع مورد استفاده قرار نمی‌گیرد [۹].

متنوعی ساخته شده است [۵۲ و ۵۳] و بیشترین کاربرد را در اندازه گیری ویسکوزیته فلزات، به ویژه آلیاژهای پایه آهن و آلومینیم، و نمک مذاب دارد [۵۴-۶۱].

یکی از مزیت‌های این روش، اندازه گیری راحت تغییرات دامنه و پیروی زمانی حرکت نوسانی مخزن می‌باشد؛ بدلیل کم بودن حجم مایع، دستیابی به الگوی حرارتی پایدار و یکنواخت راحت می‌باشد. شکل ۷ شماتیکی از روش مخزن نوسانگر را نمایش می‌دهد، نمونه در داخل محفظه ای معلق و نوسانگر قرار داده می‌شود و بوسیله کوره، حرارت داده می‌شود [۴۷ و ۴۸].

در مورد سیلندر استوانه‌ای شکل حاوی مایع با طول نامحدود، معادله حرکت سیلندر میرا شده عبارتست از:

$$I_0 \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + L \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + f\theta = 0 \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه I_0 ممان اینرسی فنجان خالی و آویزان، t زمان، f نیروی ثابت سیم چرخان، q زاویه جابجایی هر جزء کوچک از مایع از حالت تعادل است، L تابعی از دانسیته و ویسکوزیته مایع است. در این روش، خطای محاسبه از رابطه ریاضی حذف شده است. در بعضی از این ویسکومترها خطای محاسبه کمتر از ۰/۰۱ است. از مشکلات عمده این روش ارتباط دادن مقادیر اندازه‌گیری شده به ویسکوزیته از طریق معادله دیفرانسیل حرکت سیستم نوسانگراست [۴۸]. با این وجود، در این روش به خاطر حذف عامل اصلاح کننده، خطاهایی نظیر تعیین پارامتر سفتی، مستهلک شدن اینرسی و ممان اینرسی سیستم نوسانگر را نمی‌توان اصلاح کرد؛ این پارامترها می‌توانند در اندازه‌گیری ویسکوزیته خطا ایجاد نمایند. مدل کاملتر از ویسکومترهای فنجان (مخزن) نوسانگر توسط کستین ۱۴ و نویل ۱۵ و بک ویت ۱۶ و نویل ارائه گردید [۴۷]. البته توسط گرانر ۱۷ و نیر کارهای آماری برای کاهش خطا و افزایش اطمینان داده‌های حاصل از این روش صورت گرفته است [۵۴]. به صورت موردی نیز آنالیز خطا برای ویسکوزیته نمک مذاب انجام شده است [۵۶].

۵- روش صفحه نوسانگر^{۱۸}

این روش بطور شماتیک در شکل ۸ نشان داده شد است. در این روش از ارتعاش صفحه مسطح در مایع تحت نیروی رانشی ثابت استفاده می‌شود. دامنه حرکت این صفحه بستگی به ویسکوزیته مایع دارد، دامنه نوسان‌های صفحه در هوا و در مایع اندازه گیری می‌شود و از رابطه زیر ویسکوزیته محاسبه می‌شود [۶۲-۶۴].

14- Kestin
15- Newell
16- Beckwith
17- Gruner
18-Oscillating plate method

داخل مذاب و اندازه گیری فرکانس امواج عبوری از مذاب و با توجه به این پدیده که یکی از عوامل بسیار مهم در میرایی امواج صوتی در داخل سیالات ویسکوزیته آن سیال است، ویسکوزیته سیال اندازه گیری می‌گردد [۷۱]. یک نمونه از اندازه‌گیری ویسکوزیته آلومینیوم مذاب و بعضی از آلیاژهای آن وجود دارد که با استفاده از این روش انجام شده است و نتایج آن نیز از طریق تئوری حفره^{۲۲} تفسیر شده است [۹].

۸- ویسکومترهای صنعتی

چندین ویسکومتر ساده برای تعیین ویسکوزیته سرباره‌ها و کنترل کیفیت آنها ساخته شده است، اما این ویسکومترها برای فلزات مایع مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. به عنوان مثال می‌توان ویسکومترهای هرته^{۲۳} را نام برد، که ویسکوزیته را از طریق طول شکل نوار سرباره تشکیل شده تعیین می‌کند و یا ویسکومتر غوطه‌وری کرابیل^{۲۴} [۷۲].

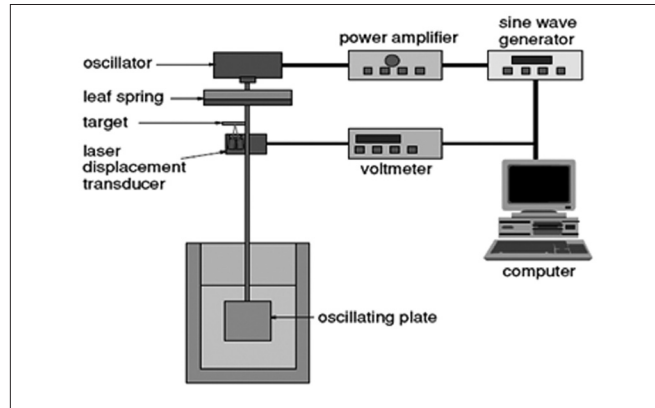
در سالهای اخیر، روش سطح شیبدار به طور جامع بررسی شده است. در این روش سرباره مذاب بر روی سطح شیبدار از جنس فولاد با مقطع V شکل ریخته می‌شود. طول نوار سرباره ایجاد شده با ویسکوزیته سرباره ارتباط دارد. میلز^{۲۵} اظهار می‌دارد که اندازه‌گیری ویسکوزیته سرباره‌ها در محدوده ۰/۱-۱ pa.s با دقت $\pm 1\%$ امکان‌پذیر خواهد بود.

یکی دیگر از روشهای صنعتی و قدیمی اندازه‌گیری ویسکوزیته مذابها استفاده از قالبهای حلزونی شکل است که طول فلز منجمد شده در قالب حلزونی معیاری از ویسکوزیته مذاب می‌باشد [۷۲ و ۷۳].

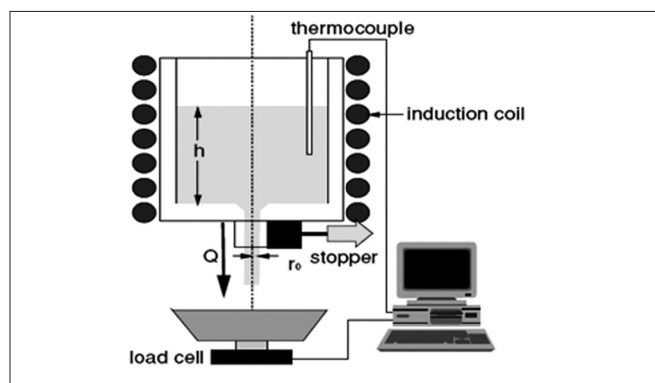
۹- ویسکومتر حباب‌های گاز^{۲۶}

این روش تکنیک جدیدی برای تعیین ویسکوزیته فلز مایع است که برپایه اندازه‌گیری سرعت و زمان صعود کردن حبابهای گاز در مذاب می‌باشد. در این روش حبابهای گاز در عمق معینی ایجاد می‌گردد و زمان خروج حباب از لوله با اندازه‌گیری افت فشار در لوله بدست می‌آید. با اندازه‌گیری تغییرات فشار در لوله می‌توان دانسیته و کشش سطحی سیال را اندازه‌گیری نمود [۲۳ و ۲۴]. فردریک^{۲۷} از این روش برای اندازه‌گیری فلزهای Pb, Cu, Sn استفاده کرده است. بعدها از این روش برای اندازه‌گیری ویسکوزیته، دانسیته و کشش سطحی آلیاژهای Al-Cu با ترکیبها

22- Hole theory
23- Herty
24- Krabiell immersion viscometer
25- Mills
26- gas bubble viscometer
27- Friedrich



شکل ۸: تصویر شماتیک از یک ویسکومتر با صفحه نوسانگر



شکل ۹: تصویر شماتیکی از یک ویسکومتر با مخزن سوراخ‌دار

۶- روش مخزن سوراخ‌دار^{۱۹}

از این روش در اندازه‌گیری‌های مقایسه‌ای روغن‌ها و دیگر سیالات در صنایع مختلف استفاده می‌شود. مدت زمانی که حجم خاصی از نمونه از طریق سوراخ کوچک در ته مخزن (فنجان) خارج می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود و با مقایسه با جداول مربوطه ویسکوزیته حاصل می‌شود [۶۸].

روچ^{۲۰} معادلاتی برای تطبیق این روش برای اندازه‌گیری فلزات مایع و بدست آوردن مقادیر ویسکوزیته، کشش سطحی و دانسیته مذابها ارائه نمود. این دستگاه بطور شماتیک در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده ویسکوزیته برای آلومینیوم در این روش کمتر از مقادیر بیان شده در سایر روش‌ها می‌باشد [۶۹ و ۷۰].

۷- میرایی امواج صوتی^{۲۱}

ویسکوزیته مایع می‌تواند از طریق اندازه‌گیری میرایی امواج صوتی اندازه‌گیری شود. در این روش با ارسال امواج صوتی به

19- Draining vessel method
20- Roach
21- Damping of an acoustic wave

و دماهای مختلف استفاده شد.

برای تعیین دقیق لحظه جدا شدن حباب از لوله موئین از یک سیستم پردازشگر تصویری استفاده می‌شود. ولی شکل حبابهای گاز، پارامتر مهمی برای پیش بینی فرآیندهای انتقالی فصل مشترکی بین حباب و فلز مایع است، شکل حبابهای گاز تابعی از خواص ترموفیزیکی گاز و مایع می‌باشد [۷۲]

مدلهایی برای ویسکوزیته فلزات

در این بخش برخی از مدلهایی که برای توصیف ویسکوزیته عناصر و سیستم‌های چند جزئی استفاده می‌شوند بررسی می‌شود. این لیست جامع نیست و در آن مدل‌های مولکولی یا روابط بین ضرایب نفوذ مایع و ویسکوزیته، نظیر معادله استوکس-انشتن گنجانده نشده است

۱- معادله آندرید^{۲۸} برای ویسکوزیته در نقطه ذوب

این مدل بر این فرضیه استوار است که با توجه به اینکه گرمای ویژه فلز، در حالت مذاب و جامد در نزدیکی دمای ذوب یکسان می‌باشد، فرکانس ارتعاشات در مایع (U_L) و در جامد (U_S) در نزدیکی دمای ذوب مساوی هستند.

$$\eta(T_m) = C_A \times (T_m \times A)^{1/2} / V^{2/3} \quad \text{رابطه ۷}$$

آندرید نشان داد که C_A در مورد فلزات خالص تقریباً ثابت است و مقدار تقریبی آن $(1.65 \times 10^{-7} \text{ Jk}^{-1} \text{ Mol}^{-1/3})^{1/2}$ است. در این رابطه A ، وزن اتمی و V حجم مولی در دمای T_M است.

۲- وابستگی ویسکوزیته عناصر به دما

معادلات زیادی وجود دارند که برای بیان ویسکوزیته مایعات خالص، بصورت تابعی از دما نوشته شده اند. همه این معادلات شامل دو یا سه پارامتر قابل تعدیل و تنظیم می‌باشند. چیرا^{۲۹} به بررسی سه مدل رایج معادلات آرنوس، آندرید و هیلدبراند^{۳۰} پرداخت و آنها را با اطلاعات تجربی مقایسه نمود [۸ و ۱].

۳- معادله آرنوس^{۳۱}

معادله آرنوس یکی از پرکاربردترین معادلاتی است که به کرات برای ارائه اطلاعات در مورد ویسکوزیته استفاده شده است.

$$\eta = A \exp(E/RT) \quad \text{رابطه ۸}$$

که در این رابطه T ، دما بر حسب درجه کلون، A ضریب نمایی ویسکوزیته، R ، ثابت جهانی گاز و E انرژی فعالسازی برای جریان

ویسکوز است [۱].

چیرا و همکاران مقادیر E و A را برای فلزات مختلف از طریق اطلاعات آزمایشگاهی استخراج نمودند.

ع- شیوه آندرید^{۳۲}

آندرید اظهار داشت که ویسکوزیته با از دست دادن نظم جهت دار مولکولی کاهش می‌یابد. ولی این بحث وجود دارد که آیا این استدلال قابل قبول است یا نه. آندرید معادله ای به شکل زیر ارائه نمود:

$$\eta(T) = (C_1/V^{1/3}) \exp(C_2/VT) \quad \text{رابطه ۹}$$

که در اینجا C_1 ، C_2 مقادیر ثابت هستند، V حجم مخصوص می‌باشد. این معادله مشابه معادله آرنوس است. هیرای^{۳۳} به اصلاح معادله آندرید بر پایه ویژگی فرکانس ارتعاش پرداخت و رابطه زیر را ارائه داد [۱]:

$$\eta(T_m) = 1.7 \times 10^{-7} \rho^{2/3} T_m^{1/2} M^{-1/6} (\text{Pa.S}) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که ρ دانسیته و m وزن اتمی است.

۵- تئوری حجم آزاد هیلدبراند^{۳۴}

اساس این مدل این است که ویسکوزیته جریان سیال توسط اندازه حجم آزاد موجود تعیین و کنترل می‌شود [۱ و ۸].

$$1/\eta = \Phi = B[(V - V_0)/V_0] \quad \text{رابطه ۱۱}$$

V ، حجم اتمی، V_0 حجم حقیقی سیال زمانی که ساکن می‌شود و B ثابت ویژه است. V_0 ، B_0 هر دو ثابت‌های مستقل از دما هستند.

۶- مدل چیرا^{۳۵}

مهورتا^{۳۶} به ایجاد مدلی بر پایه ویسکوزیته مایعات آلی بر اساس اصلاح معادلات والتر^{۳۷} پرداخت.

$$\log(\eta + 0.8) = 10^{b_1} T^{b_2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

بین b_1 ، b_2 همبستگی قوی برای مایعات آلی سبک و متوسط دیده می‌شود چیرا و تریپاتی این مدل را به فلزات مایع نیز بسط دادند و معادله زیر را بدست آوردند [۸]

$$\log(\eta + 1) = 10^{b_1} T^{b_2} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

۷- مدل مولین - هوگاس^{۳۸}:

این مدل برای سیستم‌های چند جزئی ارائه شده است:

32- Andrade treatment

33- Hirai

34- Hildebrand's free volume theory

35- Chhabra model

36- Mehrota

37- Walter

38- Moelwyn - Hughes Model

28- Andrade equation

29- Chhabra

30- Hildebrand

31- Arrhenus equation

viscometer and its characteristics», ISIJ international ISSN 0915-1559.

21-J.E. Hatch, «Aluminum: properties and physical metallurgy», Aluminum Association, American Society for Metals.

22-Y.I. Cho, J.P. Hartnett, «The Falling Ball Viscometer-A New Instrument for Viscoelastic Fluids», Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 6, 335-342, 1979.

23-S.J. Roach, H. Henein. «A New Method to Dynamically Measure the Surface Tension, Viscosity, and Density of Melts», International Journal of thermophysics, Vol. 3, No.4, 2000.

24-J.L. Sutterby, "Falling sphere viscometer", Process fundamentals Research Laboratory, the Dow Chemical Company, Midland, Michigan 48640, USA, 1973.

25-P.G. Morgan, "Notes on the falling sphere viscometer", Chemical Engineering Science, Vol. 15, 144- 148, 1961.

26-D.Kanchanalakshana, A.J. Ghajar, «An Improved Falling Sphere Viscometer for Intermediate Concentration of Viscoelastic Fluids», INT. OCM. Heat Mass Transfer, Vol. 13, 219-233, 1986.

27-N.A. Park, T. F. Irvine Jr., «The Falling Needle Viscometer: A New Technique for Viscosity Measurements, Warme Stoffuber-trag., Vol. 18, 201-206, 1984.

28-US Patent 5,203,203

29-US Patent 3,772,910

30-T.A. Butcher, T. F. Irvine Jr., «Use of the falling ball viscometer to obtain flow curves for inelastic, non-newtonian fluids», Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 36, 51-70, 1990.

31-Y.I. Cho, J.P. Hartnett, W.Y. Lee, «Non-Newtonian viscosity measurements in the intermediate shear rate range with the falling-ball viscometer», Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol.15, Issue 1, 61-74, 1984.

32-S. Shin, D.Y. Keum, «Viscosity measurement of non-Newtonian fluid foods with a mass-detecting capillary viscometer», Journal of Food Engineering, Vol. 58, 5-10, 2003.

33-S. Hara, K. Inoue, Tanaka, «Viscosity of molten slags containing iron oxide Molten Slags, Fluxes and Salts», '97 Conference (Sydney, Australia, 5-8 Jan. 1997) (Warrendale, PA: Iron and Steel Society) p 515 (ISBN 1-886362-14-9).

34-K. Funakoshi, A. Suzuki, H. Terasaki. «In situ viscosity measurements of albite melt under high pressure», Institute of Physics Publishing Journal of Physics: Condensed Matter. 2002.

35-S. H. Elahi, H. Adelnia, H.R. Shaverdi, «A simple accurate method for measuring viscosity of liquid metals at high temperatures», Journal of Rheology, Vol. 56, Issue 4, 941-954, 2012.

36-G. Barr, «Capillary Tube Viscometers Part II», Journal of Scientific Instruments, Vol. 1, Number 4, 1924.

37-US Patent 3,699,804

38-US Patent 4,685,328

39-US Patent 4,578,990

40-US Patent 4,793,174

41-G. D. Galvin, J. F. Hutton, B. Jones, «Development of a high-pressure, high-shear-rate capillary viscometer», Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 8, Issues 1-2, 11-28, 1981.

42-N. Ishii, A. Wakana, M. Kinoshita, «A Contribution to Viscometry; Hydrodynamical Study on Capillary Viscometry», 5th World Petroleum Congress, May 30 - June 5, 1959, New York, USA.

43-T. R. Cumby, «A Capillary Viscometer for the Study of the Rheological Properties of Slurries», J. agric. Engng Res. Vol. 25, 221-230, 1980.

44-A. W. Sisko, «Capillary Viscometer for Non-Newtonian Liquids», Journal of Colloid Science, Vol. 15, 89-96, 1960.

45-M. Shvestka, «Methods of Investigation Automatic Capillary Viscometer», Polymer Science U.S.S.R., Vol. 16, Issue 1, 264-268, 1974.

46-US Patent 6,322,524

47-J.C. Nieuwoudt, J.V. Sengers, J. Kestin, «On the theory of oscillating-cup viscometers», Physica A: Statistical and Theoretical Physics, Vol. 149, Issues 1-2, 107-122, 1988.

48-H. Yang, «Melting Behavior, Electrical Receptivity, Viscosity of FeSi Alloys at High Pressures: Implications for Outer Core Dynamics», Faculty of Graduate Studies, The University of Western Ontario London, Ontario August, 1999.

ویسکوزیته سیستم‌های دوتایی طبق معادله زیر ارائه می‌شود.

$$\eta = (x_A \eta_A + x_B \eta_B)(1 - 2x_A x_B \Omega / RT) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در این رابطه η_B, η_A ویسکوزیته عناصر و x_B, x_A کسرهای مولی و B و A و Ω پارامتر بر هم کنش منظم حلال می‌باشد. معادله (۹-۲) به پیش بینی انحراف منفی ویسکوزیته سیستم‌هایی می‌پردازد که دارای گرمای اختلاط (ΔH_{max} در مایع) مثبت هستند. به نظر می‌رسد این مدل در بسیاری از سیستم‌های فلزی موفق بوده است ولی نمی‌تواند ترکیبات یوتکتیک با ویسکوزیته کم را پیش بینی کند [۸ و ۹].

منابع و مراجع:

1- A. T. Dinsdale, P.N. Quested, "The Viscosity of Aluminum And its Alloys – A review of Data and Models", NPL Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, UK TW11 0LW

2- J. Banhart, "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal foams", Progress in Materials Science, Vol. 46, 559-632, 2001.

3-F. M. White, "Fluid Mechanics", Butterworth Heinemann , 1992

4- N. Babcsan, J. Banhart, D. Leitmeier, "Metal Foams–Manufacturing and Physics of Foaming", 2005

5-T. Iida, R. I. L. Guthrie , "The Physical Properties of Liquid Metals" Clarendon Press, Oxford, 1988.

6-S.I. Bakhtiyarov, R.A. Overfelt, "Measurement of Liquid Metal Viscosity By Rotational Technique", Elsevier Science Ltd., 1999.

7-S.H. Han, C.G. Kang, J.H. Sung, "Investigation of viscosity properties for rheology forming of AM50A magnesium alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol.187-188, 335-338, 2007.

8-A.W. Batchelor, G.W. Stachowiak, "Engineering Tribology", Butterworth Heinemann, 2001

9-M.R. Hopkins, T.C. Toye, "The Determination of the Viscosity of Molten Metals", The British Iron and Steel Research Association, Swansea, 1950

10-J. F. HILLS, «A rotational viscometer employing a reference liquid», Journal Of Scientific Instruments, Vol. 35, 415, 1958.

11-R.N. Weltmann, P.W. Kuhns, «Effect of Shear Temperature on Viscosity in a Rotational Viscometer Measurement», Journal of Colloid Science, Vol. 7, Issue 3, 218-226, 1952.

12-G.W. Lower, W.C. Walker, A.C. Zettlemoyer, «The Rheology of Printing Inks. II. Temperature Control Studies in the Rotational Viscometer», Journal of Colloid Science, Vol. 8, Issue 1, 116-129, 1953.

13-G.F. Eveson, E.W. Hall, «A continuous-flow rotational viscometer for use with downward-settling suspensions», Journal of Scientific Instruments, Vol. 33, Issue 3, 110-112, 1956.

14-G.T. Helleloid, «On the Computation of Viscosity-Shear Rate Temperature Master Curves for Polymeric Liquids», Morehead Electronic Journal of Applicable Mathematics, Issue 1, 2001.

15-L. Dintenfass «Effect of Velocity Gradient on the Clotting Time of Blood and on the Consistency of Clots Formed in Vitro», Journal of the American Heart Association», Vol. XVIII No. 4, 1966.

16-US Patent 4,499,753.

17-US Patent 5,317,908

18-K. Nakashima, T. Kawagoe, T. Ookado, K. Mori, «Viscosity of binary borate and ternary borosilicate Molten Slags, Fluxes and Salts» '97 Conf. (Sydney, Australia, 5-8 Jan. 1997) (Warrendale, PA: Iron and Steel Society), p 215.

19-W.R.D. Jones, W.L. Bartlett, «The viscosity of aluminum and binary aluminum alloys», Journal Instituted of Metals, Vol. 81, 145-52, 1952-53.

Y. Shiraiishi, S. Nagasaki, Yamashiro, «Spiked Parallel plate creep/rotation

- cup viscometer—application to molten HgTe and Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 77, Issue 10, 5098, 1995.
- 60-D. Wang, R.A. Over felt, “Oscillating Cup Viscosity Measurements of Aluminum Alloys: A356 and 319”. *International Journal of Thermo physics*. Vol. 23, Issue 4, 1063-1076, 2002.
- 61-V. L. Shah, “Extension of the theory of the oscillating-disk viscometer for large boundary-layer thicknesses encountered at low pressures”, *Physica*, Vol. 49, Issue 2, 217-228, 1970.
- 62-J.G Woodward, “A vibrating-plate viscometer”, *Journal of Colloid Science*, Vol. 6, Issue 5, 481-491, 1951.
- 63-US Patent 5,710,374
- 64-J. Kestin, J.H. Whitelaw, “A relative determination of the viscosity of several gases by the oscillating disk method”, *Physica*, Vol. 29, Issue 4, 335-356, 1963.
- 65-R. Dipippo, J. Kestin, J. H. Whitelaw, “A high-temperature oscillating-disk viscometer”, *Physica*, Vol. 32, Issues 11-12, 2064-2080, 1966.
- 66-M. Hongo, “Viscosity of Argon and Argon-Ammonia Mixtures Under Pressures”, *The Review of Physical Chemistry of Japan*, Vol. 48, Number 2, 63–71, 1979.
- 67-US Patent 5,372,034
- 68-S.J. Roach, H. Henein, Owens, “A new technique to measure dynamically the surface tension, viscosity and density of melts”, *Light Metals* 2001.
- 69-S.J. Roach, H. Henein, “A new method to dynamically measure the surface tension, viscosity, and density of melts”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 36, Issue 5, 667-676, 2005.
- 70-V.N. Belonenko, “Role of bulk viscosity and acoustic parameters in tribological problems”, *Ultrasonics*, Vol. 29, Issue 2, 101-118, 1991.
- 71-R.P. Chhabra, A. Tripathi, “A correlation for the viscosity of liquid metals”, *High Temperature High Press.*, Vol. 25, 713-718, 1993.
- 72-Y. Sato, “Viscosity of molten silicon and the factors affecting measurement”, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 249, Issues 3-4, 404-415, 2003.
- 49-A. Knappworst, «A new method of high temperature viscometry by the method of oscillating hollow bodies», *Z. Phys. Chem.*, 1995.
- 50-A.A.K. Ibrahim, A.M.I. Kabiell, « Experimental and theoretical investigations on the oscillating cylinder viscometer for Newtonian liquids”, *British Journal of Applied Physics*, Vol. 11, Number 7, Issue 7, 283, 1960.
- 51-I. Elyukhina, G. Vyatkin, “Software for oscillating-cup viscometry: verification of data reasonableness and parametric identification of rheological model”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 98, Part 2, Issue 2, 2008. US Patent 3,772,262
- 52-B.S. Ashwin , T. Hagyard , I.C.B Saunders, T E Young, “ Viscometers having damped torsional oscillation”, *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 37, Number 12, Issue 12, 480, 1960
- 53-S. Gruner, W. Hoyer, “A statistical approach to estimate the experimental uncertainty of viscosity data obtained by the oscillating cup technique”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 480, Issue 2 629–633, 2009.
- 54-T.M. Bruton, “A high temperature oscillating cylinder viscometer”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 8, Number 11, Issue 11, 906, 1975.
- 55-D. Tolbaru, A.M. Popescu, S. Zuca, “Error Analysis of the Oscillating Cup Method for Viscosity Measurements of Molten Salts”, Presented at the EUCHEM Conference on Molten Salts and Ionic Liquids, Hammamet, Tunisia, September 16 –22, 2006.
- 56-Y. Sato, K. Sugisawa, D. Aoki, T. Yamamura, “Viscosities of Fe–Ni, Fe–Co and Ni–Co binary melts”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, Number 2, 363, 2005.
- 57-Y. Sato, K. Sugisawa, D. Aoki, T. Yamamura, “Viscosity of molten Fe-Ni binary alloy”, *Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, CO, USA, June 22 - 27, 2003.
- 58-Y. Ito, K. minami, A. Nagashima, “Viscosity of Liquid Lithium by an Oscillating-Cup Viscometer in the Temperature Range 464-923 K”, *International Journal Of Thermophysics*, Vol. 10, No. 1, 173-182, 1989.
- 59-K. Mazuruk, C.H. Su, S.L. Lehoczky, F. Rosenberger, “Novel oscillating