

6. ВЯЗКОСТЬ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

При движении потока жидкости, когда скорость течения различных слоев потока неодинакова, в нем самопроизвольно происходят процессы, стремящиеся выровнять скорости течения слоев. Эти процессы называются внутренним трением или вязкостью.

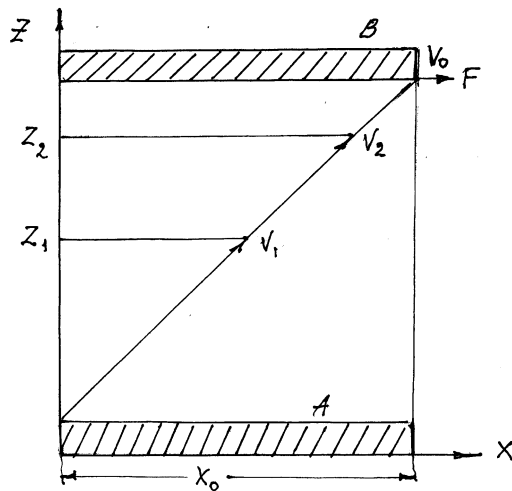
Вязкость, или внутреннее трение, представляет собой внутреннее сопротивление, оказываемое взаимному перемещению смежных слоев жидкости, поэтому и определять ее можно только при движении расплава.

В то время как твердое тело обладает свойством оказывать сопротивление самой деформации, жидкость оказывает сопротивление увеличению скорости деформации. Это свойство жидкости называется вязкостью.

Свойство вязкости тесно связано со структурой жидкости и определяется характером межчастичного взаимодействия. Для характеристики вязкости жидкости принят коэффициент вязкости η , называемый *динамической вязкостью*. Значение этого коэффициента можно определить, исходя из закономерностей изменения силы внутреннего трения, возникающей между двумя слоями несжимаемой жидкости, перемещающимися с различной скоростью по отношению друг к другу. Для стационарного потока подобной жидкости, согласно Ньютону, справедливо уравнение

$$F = \eta S dV/dx, \quad (3.1)$$

где F – сила взаимодействия двух движущихся слоев, Н; S – площадь соприкосновения слоев, м²; dV/dx – градиент скорости слоев жидкости по нормали к направлению потока, с⁻¹ (рис. 3.1).



V_0 – постоянная скорость
 $V(Z)$ – скорость слоя, зависящая от расстояния Z от неподвижной пластины A

X_0 – величина начального сдвига

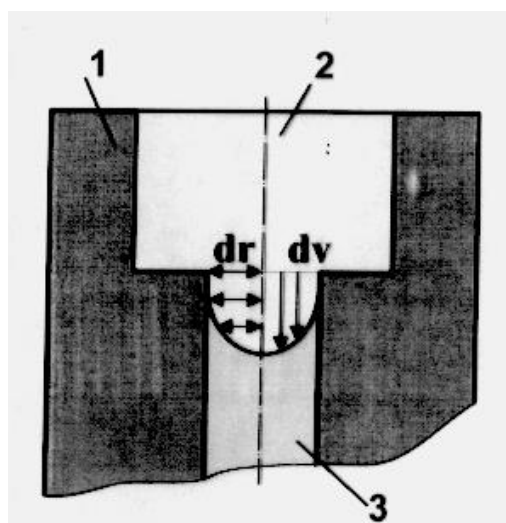
$$F = \eta \frac{V_2 - V_1}{Z_2 - Z_1} S$$

$\frac{V_2 - V_1}{Z_2 - Z_1}$ – градиент скорости течения (скорость сдвига)

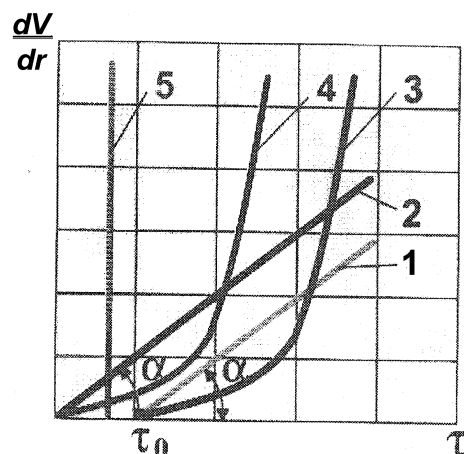
Рис. 3.1. Схема однородного сдвига (вязкого течения) слоя жидкости, заключенного между двумя твердыми пластинами площадью S , из которых нижняя (A) неподвижна, а верхняя (B) под действием тангенциальной силы F движется с постоянной скоростью V_0

В СИ в качестве единицы измерения динамической вязкости принята Па · с (МПа · с).

Различные тела по-разному ведут себя под действием приложенной нагрузки (рис. 3.2).



- 1 – форма
- 2 – расплав
- 3 – воздух



- 1 – Бингамово тело
- 2 – ньютоновская жидкость
- 3 – тело Шведова
- 4 – псевдопластичное тело
- 5 – абсолютно хрупкое тело

Рис. 3.2. Различные виды реологических моделей

Модель ньютоновской жидкости (прямая 2) характеризуется наличием линейной зависимости между касательным сдвиговым напряжением τ и поперечным градиентом скорости $\frac{dV}{dx}$ или скоростью деформации $\frac{d\varepsilon}{d\tau}$. При этом смещение слоев происходит при любом малом приложенном сдвиговом усилии. Такая реологическая модель отвечает так называемой ньютоновской жидкости и описывается уравнением

$$\tau = \eta \frac{dV}{dx(r)} = \eta \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \quad (3.2)$$

где τ – касательное напряжение, возникающее в жидкости, Па; $\frac{dV}{dx} = \frac{dV}{d\tau}$ – градиент скорости течения жидкости, 1/с; η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па · с; $\frac{d\varepsilon}{d\tau}$ – скорость деформации.

При определенных условиях расплавы могут рассматриваться как ньютоновские жидкости, для которых выполняется условие (3.2). ньютоновские жидкости – жидкости, подчиняющиеся закону внутреннего трения Ньютона, в соответствии с которым напряжения τ прямо пропорциональны скоростям деформации $\frac{dV}{dr}$. Характер зависимости $\frac{dV}{dr} = f(\tau)$ для ньютоновской жидкости представлен на рис. 3.2 (прямая 2). Кривая 4 характеризует поведение не-ньютоновской жидкости (псевдопластичное тело), где величина η зависит от скорости деформации. Зависимость 1 отвечает реологическому телу Бингама,

течение которого начинается только тогда, когда нагрузка превзойдет статическое напряжение сдвига. В этом случае

$$\tau = \tau_0 + \eta_b \frac{dV}{dx}. \quad (3.3)$$

При температурах выше ликвидуса жидкие металлические сплавы по реологическому состоянию близки к вязким ньютоновским жидкостям. В интервале кристаллизации, где система становится гетерофазной, сплав отвечает уже более сложной реологической модели, более близкой к зависимостям 1 и 3, причем величина τ_0 увеличивается с ростом количества твердой фазы в потоке вплоть до полной потери текучести. Величина, обратная вязкости, является мерой текучести, следовательно, чем меньше вязкость, тем больше текучесть.

Кинематическая вязкость ν представляет собой отношение

$$\nu = \frac{\eta}{d}, \quad (3.4)$$

где ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; d – плотность, т. е. масса единицы объема жидкости.

Размерность кинематической вязкости в СИ совпадает с размерностью диффузии. Таким образом, кинематическая вязкость представляет собою как бы коэффициент диффузии для скорости течения.

Андрэде определил, что вязкость при температуре плавления равна

$$\eta = AM^{1/2}T_p^{1/2} \cdot V^{-2/3}, \quad (3.5)$$

где A – константа, равная $5,7 \times 10^{-4}$; M , V – атомная масса и атомный объем металла; T_p – температура плавления.

Из формулы (3.5) видно, что вязкость является характеристикой энергии связи между атомами (зависимость от T_p). В то же время вязкость должна быть периодической функцией атомного номера, так как зависит от M и V . Поэтому вязкость изменяется в зависимости от электронного строения металла, что видно из табл. 3.1.

Таблица 3.1

Зависимость вязкости от электронного строения металлов

Металл	Внешняя электронная конфигурация	Вязкость, сП (мПа · с)	Металл	Внешняя электронная конфигурация	Вязкость, сП (мПа · с)
Li	2 s ¹	0,55	Zn	3 d ¹⁰ 4 s ²	2,82
Na	3 s ¹	0,68	Cd	4 d ¹⁰ 5 s ²	2,29
K	4 s ¹	0,64	Hg	5 d ¹⁰ 6 s ²	1,61
Rb	5 s ¹	0,52	Fe	3 d ⁶ 4 s ²	5,40
Mg	3 s ²	1,07	Co	3 d ⁷ 4 s ²	4,80
Ca	4 s ²	1,06	Ni	3 d ⁸ 4 s ²	5,0
Al	3 s ² 3 p ¹	1,13			
Ga	4 s ² 4 p ¹	1,70			
In	5 s ² 5 p ¹	1,65			

Вязкость жидких металлов снижается с повышением температуры и степени их чистоты. Для описания температурной зависимости вязкости жидких металлов чаще всего используется уравнение Я. И. Френкеля

$$\eta = A \cdot \exp(E_\eta / RT), \quad (3.6)$$

где A – постоянная, зависящая от природы металла; E_η – энергия активации вязкого течения, необходимая для перехода частицы или группы частиц из одного положения равновесия в другое; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Это уравнение справедливо для сравнительно небольшого температурного интервала (100–200 °С выше точки плавления), что подтверждается линейной зависимостью $\lg \eta$ от $1/T$. Отклонение от линейной зависимости при высоких перегревах свидетельствует об уменьшении E_η .

Значения E_η изменяются в широких пределах (от 5 до 50 кДж/моль) и зависят от природы жидкого металла.

Эмпирическая формула для определения энергии активации вязкого течения

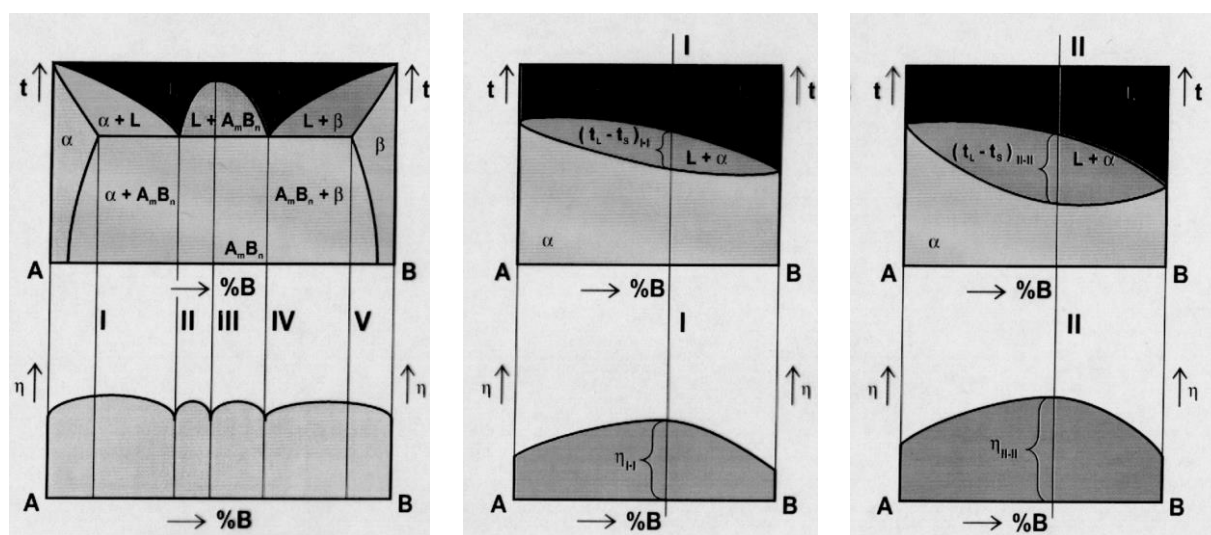
$$E_\eta = 14,33 T_{пл}. \quad (3.7)$$

Если учесть, что $\nu = \eta/d$ и плотность d изменяется прямо пропорционально температуре, то по Эйрингу

$$\begin{aligned} \nu &= A_1 \exp(E_\nu / RT); \\ \eta &= A_2 \exp(E_\eta / RT); \\ E_\nu &= E_\eta - E_d, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где E_d – энергия разрыхления, обусловленная температурным изменением плотности.

На рис. 3.3 приведена связь вязкости расплавов с диаграммой состояния.



I, II, III, IV, V – сплавы
 η_A ; η_B ; η_{II} ; η_{III} ; η_{IV} – min
 η ; η_V – max

I-I, II-II – сплавы
 $(t_L - t_S)_{I-I} < (t_L - t_S)_{II-II} \Rightarrow \eta_{I-I} < \eta_{II-II}$

Рис. 3.3. Связь вязкости расплавов с диаграммами состояния

Значение E_d зависит от природы жидкого металла. Например, для жидкого железа оно составляет ~ 2000 Дж/моль, а для жидкого алюминия – 1200 Дж/моль.

Значение E_η может быть определено исходя из графической зависимости $\lg \eta$ от $1/T$. Для простых жидкостей, в том числе и для металлических, шлаковых и штейновых расплавов, в которых при повышении температуры не происходит структурных изменений или резкого ослабления межчастичных связей, имеет место прямолинейная зависимость $\lg \eta$ от $1/T$. В таком случае значение E_η может быть вычислено как тангенс наклона прямой $\lg \eta$ от $1/T$ или из выражения

$$E_\eta = T_1 \cdot T_2 \cdot 19,123 (\lg \eta_1 - \lg \eta_2) / T_2 - T_1. \quad (3.9)$$

Отклонения от прямолинейной зависимости $\lg \eta$ от $1/T$, а следовательно, изменения E_η , наблюдаемые в ряде случаев для металлических и шлаковых расплавов, свидетельствуют об изменении структуры от температуры перегрева. В частности, для жидких сплавов подобное отклонение может быть связано с изменением координационного числа, а в расплавленных шлаках, вязкость которых определяется наличием крупных комплексных ионов, – с их распадом. Значительные отклонения от экспоненциальной температурной зависимости вязкости металлических расплавов происходят в предкристаллизационный период, а также при переохлаждениях жидкой фазы. Такое явление наблюдается при переходе в гетерогенное состояние. Для оценки структурных изменений в жидких сплавах довольно часто используют значения энергии Гиббса активации вязкого течения $G_{\text{вяз}}$ и энтропии Гиббса $S_{\text{вяз}}$. Эту связь с динамической вязкостью установил Эйринг:

$$\eta = (hN/\nu) [\exp (\Delta G_{\text{вяз}}/RT)] = (hN/\nu) [\exp (\Delta H_{\text{вяз}}/RT) \exp (-\Delta S_{\text{вяз}}/RT)], \quad (3.10)$$

где $\Delta H_{\text{вяз}}$ – изменение энтальпии вязкого течения; ν – мольный объем жидкости; N – число Авогадро; h – постоянная Планка.

Для определения $\Delta G_{\text{вяз}}$, исходя из значений кинематической вязкости, можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\Delta G_{\text{вяз}} = RTh (M\nu / Nh), \quad (3.11)$$

где M – молекулярная масса жидкости.

$$\Delta S_{\text{вяз}} = - (\Delta G_{\text{вяз}}/\nu T) \quad (3.12)$$

определяется по тангенсу угла наклона линии зависимости $\Delta G_{\text{вяз}}$ от температуры.

Вязкость зависит от удельной теплоемкости, скрытой теплоты плавления, атомного объема (рис. 3.4, а) и энтропии (рис. 3.4, б) теплопередачи от жидкого металла к форме и др.

Сравнивая между собой значения кинематической вязкости различных металлов, можно видеть, что величина ν связана с атомным объемом $V_{\text{ат}}$: чем больше атомный объем металла, тем меньше его вязкость (рис. 3.4, а). Эта зависимость приближенно характеризуется соотношением

$$\nu = k \frac{1}{V_{\text{ат}}}, \quad (3.13)$$

где $k = 4-5$.

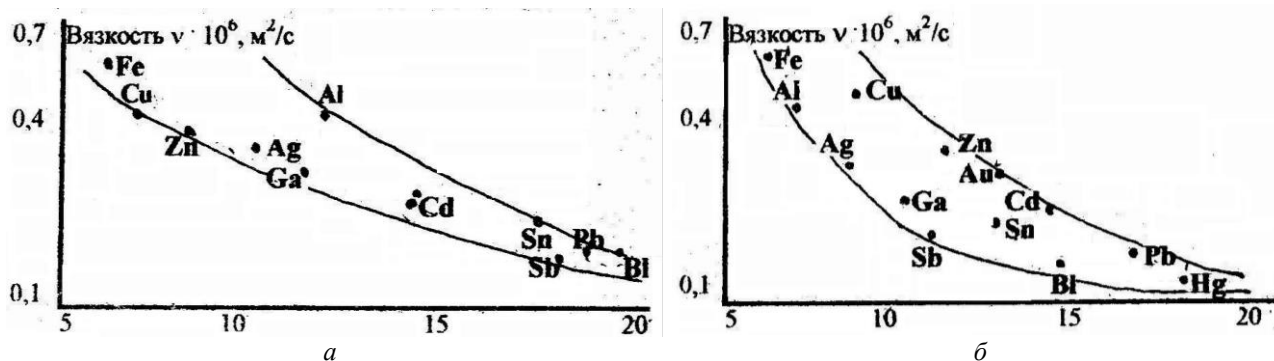


Рис. 3.4. Соотношение между вязкостью металлов и их атомным объемом (а) и стандартным значением их энтропии (б)

Есть еще одна характеристика, проявляющая связь с величиной ν , – это энтропия, отражающая степень упорядоченности атомов в сплаве. Кинематическая вязкость жидкого металла тем больше, чем меньше его энтропия, т.е. чем слабее происходит разупрочнение структуры при нагреве (рис. 3.4, б). Таким образом, два параметра могут служить средством оценки вязкости жидкого металла: а) атомный объем как геометрический фактор; б) стандартное значение энтропии как энергетический фактор.

Известно, что в сплавах энергии взаимодействия одноименных и разноименных частиц могут отличаться. Это может приводить к возникновению различных фаз, а в крайних случаях – к образованию интерметаллических соединений или к несмешиваемости компонентов.

Жидкий бинарный сплав можно рассматривать как раствор из атомов А и В. Если обозначить силы связи между одноименными и разноименными атомами как F_{AA} , F_{BB} и F_{AB} , то возможны следующие случаи:

$$F_{AA} \approx F_{BB} \approx F_{AB}; \quad (3.14)$$

$$F_{AA} < F_{AB} > F_{BB}; \quad (3.15)$$

$$F_{AA} > F_{AB} < F_{BB}; \quad (3.16)$$

$$F_{AA} > F_{AB} \geq F_{BB}. \quad (3.17)$$

Соотношение (3.14) характеризует образование идеального раствора, силы связи между одноименными и разноименными атомами близки. Случай (3.15) указывает на наличие мощных сил связи между разноименными атомами, при смешении происходит выделение тепла. Соотношение (3.16) является признаком сопротивляемости компонентов смешиванию и обуславливает наличие химической неоднородности в расплаве. В случае (3.17) также будет химическая неоднородность, однако теплота смешения может быть положительной или отрицательной.

Если исходить из предположения, что при переходе из твердого состояния в жидкое энергия межчастичного взаимодействия мало изменяется, то следует ожидать существования определенной связи между изотермами вязкости и диаграммами состояния:

– согласно Н. С. Курнакову, в двойных системах с сильным взаимодействием компонентов, сопровождающимся образованием химического соединения, не диссоциирующего в расплавленном состоянии, на диаграмме «состав – вязкость» должен существовать максимум, соответствующий этому химическому соединению; сингулярная точка наиболее выражена при температурах, близких к температуре плавления химического соединения; при образовании неустойчивого химического соединения максимум вязкости в зависимости от степени диссоциации выражен менее четко; с повышением температуры максимум вязкости сглаживается и перемещается в сторону более тугоплавкого компонента;

– при образовании жидкого раствора характер изотерм вязкости зависит от соотношения сил связей между компонентами и обычно изотермы вязкости слабо выпуклы или вогнуты к оси составов;

– для бинарных металлических систем, в которых компоненты образуют непрерывный ряд твердых растворов, характерно монотонное изменение вязкости при изменении состава; изотермы вязкости представляют либо прямые, либо плавные кривые, слегка изогнутые в ту или другую сторону от оси составов; такой характер изотерм вязкости свидетельствует о малом различии сил связи между одно- и разноименными атомами;

– в системах с интерметаллическими соединениями на изотермах вязкости обнаруживаются пологие или острые максимумы или изгибы при концентрациях, соответствующих составу соединений;

– для эвтектических систем, для которых характерны малые положительные отклонения от идеальности, изотермы вязкости либо прямолинейны, либо проявляют малые отрицательные отклонения от прямолинейной зависимости;

– для ряда металлических систем с областью несмешиваемости на изотермах вязкости установлен максимум вблизи критической точки расслоения.

Таким образом, вязкость является структурно-чувственным свойством, активно реагирующим на особенности строения жидкого сплава.

Жидкие сплавы всегда содержат большое количество взвешенных включений. Количество, форма, состояние (жидкое или твердое) и характер распределения неметаллических включений влияют на вязкость расплава.

Особенно сильно повышается вязкость, когда в жидком сплаве образуются твердые включения. Так, проведение раскисления металла в большинстве случаев приводит к образованию мелкодисперсных твердых продуктов (например, SiO_2 , AlO_3 , MnO в сталях). Введение азота для уменьшения зерна в ферритную высокохромистую сталь повышает ее влияние вследствие образования тугоплавких нитридов хрома. В чугунах из-за присутствия нерастворенных графитных комплексов при небольшом перегреве расплавов вязкость резко повышается. Алюминиевым расплавам свойственно ухудшение текучести ввиду образования Al_2O_3 и т. д.

Сравнение характера течения расплава в литейной форме можно осуществить только при достижении одинакового числа Рейнольдса в обеих системах:

$$R = \frac{V_1 D_1}{\nu_1} = \frac{V_2 D_2}{\nu_2}, \quad (3.18)$$

где D – характеристические размеры (при течении через трубку это ее диаметр D); V – скорость потока; ν – кинематическая вязкость.

Если число Рейнольдса имеет большое значение (например, для серого чугуна – более 7000, для литой стали – более 3500), то в данной системе (канале) течение становится турбулентным и количество протекающей жидкости (расплава) понизится по сравнению с таковым, рассчитанным по уравнению для ламинарного течения в трубке.

Определение вязкости жидких металлов и сплавов представляет большие трудности вследствие высокой температуры и большой реакционной способности металлических расплавов. Для измерения их вязкости применяют следующие методы: ротационный и вибрационный, затухающих крутильных колебаний и падающего шарика.

Простейшая схема ротационного метода (рис. 3.5) представляет собой два соосных цилиндра, внешний из которых принудительно вращается. Вязкость ($\text{Па} \cdot \text{с}$) определяется в зависимости от угловой скорости ω вращающегося внешнего цилиндра и крутящего момента M_k , оцениваемого по углу поворота внутреннего цилиндра по уравнению

$$\eta = \frac{M_k}{4\pi(1+C)\omega} \frac{1}{R_1^2} - \frac{L}{R_2^2}, \quad (3.19)$$

где M_k – крутящий момент, Н/м; R_1 и R_2 – радиусы цилиндров, м; L – длина погруженного цилиндра, м; ω – угловая скорость, рад/с; C – поправочный коэффициент, учитывающий концевой эффект цилиндров (определяется опытным путем).

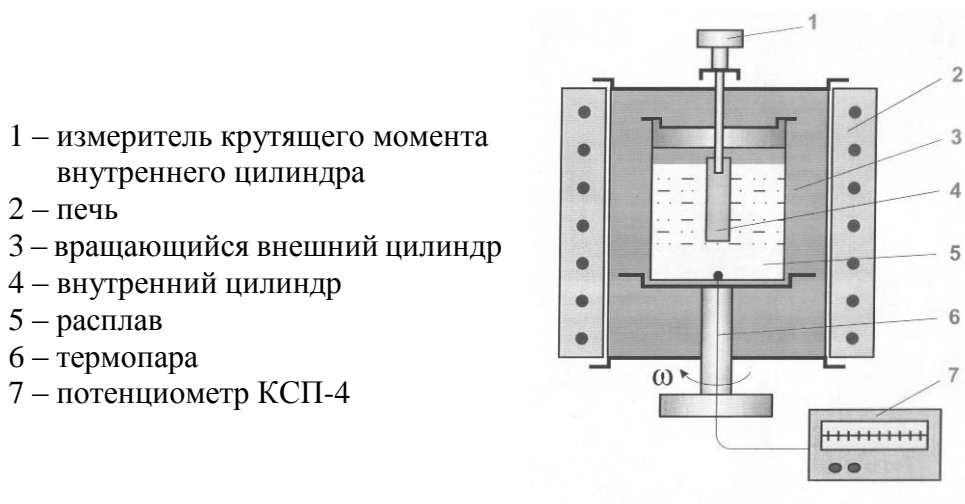


Рис. 3.5. Ротационный метод определения вязкости расплавов

Данный прибор необходимо проградуировать по материалу, вязкость которого известна (например, по касторовому маслу). При этом константу прибора k определяют из упрощенного уравнения

$$\eta = k \frac{M_k}{\omega}. \quad (3.20)$$

Обычно приборы построены так, что внешний цилиндр вращается с постоянной скоростью $n = 0,5-50,0$ об/мин и измеряется крутящий момент M_k , обусловленный трением расплава о внутренний цилиндр.

Вибрационный метод основан на определении изменений параметров вынужденных колебаний плоского тела при погружении его в вязкую среду. Метод позволяет создавать прибор для непрерывного и автоматического измерения вязкости жидкостей при высоких температурах с погрешностью до долей процента.

Вязкость рассчитывается по уравнению

$$\sqrt{\eta\rho} = \frac{C_1}{A} + C_2, \quad (3.21)$$

где A – амплитуда колебаний; ρ – плотность жидкости, кг/м³; C_1 и C_2 – постоянные вискозиметра, определяемые по измерению амплитуды колебания в жидкостях с известной вязкостью.

В практике измерения вязкости жидких металлов и шлаков наибольшее распространение получили электровибрационные вискозиметры.

Метод затухающих крутильных колебаний основан на регистрации затухания крутильных колебаний системы, сопряженной с исследуемой жидкостью, и относится к весьма чувствительным методам, позволяющим с достаточной точностью измерять вязкости расплавленных металлов.

Основной величиной, получаемой в ходе эксперимента, является логарифмический декремент затухания

$$\delta = \frac{\ln A_0 - \ln A_n}{n}, \quad (3.22)$$

где A_0 и A_n – амплитуда первого и n -го колебаний; n – число колебаний.

Одно из возможных уравнений для расчета динамической вязкости по величине декремента затухания следующее:

$$\delta - \delta_0 = k\sqrt{n\rho}, \quad (3.23)$$

где δ – логарифмический декремент затухания системы с металлом; δ_0 – то же, но без металла; k – постоянная прибора, определяемая по металлам с известной вязкостью; ρ – плотность металла, кг/м³.

Метод падающего шарика не нашел широкого применения при измерении вязкости металлургических расплавов из-за трудности его практической реализации и больших ошибок измерений.