

УДК 621.315.537.311

ЭКСПРЕСС-ИЗМЕРЕНИЕ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ ПРИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЯЗКОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ*

Поводатор А.М., инженер

*Цепелев В.С., д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики
металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии (v.s.tsepelev@ustu.ru)*

Конашков В.В., к.т.н., старший научный сотрудник

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Рассмотрены способы ускорения определения кинематической вязкости высокотемпературных металлических расплавов. Подтверждена возможность стандартизации, упрощения и ускорения экспериментов, что обеспечено использованием параметров двух точек колебательной траектории затухания, отличающихся в e раз, а также двухполярного синхронизированного закручивания подвешенного на упругой нити тигля с расплавом. Показано, что измерение параметров металлических жидкостей позволяет проводить анализ материалов и давать рекомендации для получения сплавов с заданными характеристиками. Изучены возможности осуществления экспресс-измерений с приемлемой для большинства случаев точностью, сокращения времени экспериментов и обеспечение возможности их стандартизации, снижение влияния на проведение экспериментов субъективной роли исследователя. Применение двухстороннего закручивания дает выигрыш по времени для одного цикла измерения в 1,5 раза, по времени закручивания – 4 раза. Предлагаемый подход обеспечивает приемлемую точность расчетов.

Ключевые слова: расплав, экспонента, две точки, двухполярное синхронизированное закручивание, экспресс-измерение.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-407-411

Измерение параметров металлических жидкостей, расплавов и шлаков, в том числе определение кинематической вязкости ν образцов высокотемпературных расплавов, помещенных в электропечь, позволяет проводить анализ материалов и давать рекомендации для получения сплавов с заданными характеристиками. При этом термозависимости (политермы) $\nu = \Psi(t_i^\circ)$ цикла нагрева и охлаждения образца позволяют выделять характерные температурные точки t_i° и гистерезисные характеристики этого цикла. Для высокотемпературных исследований сплавов ($t_i^\circ \geq 1000$ °С) [1] используют немногие способы измерения вязкости, преимущественно фотометрическое определение $\nu = \Psi(t_i^\circ)$, основанное на зависимости $\nu \sim \delta^2$. Расчет логарифмического декремента затухания δ производят по значениям амплитуд A_i : $\delta = \ln(A_i/A_{i+1})$ периодов T_i , временных значений t_i : $\delta = -1/n \{\ln(t_0/t_n)\}$, числа n_i крутильных колебаний тигля с расплавом, скорости прохождения положения равновесия: $\delta = -1/n \{\ln(V_0/V_n)\}$. Установки для подобных измерений уникальны, поэтому в них используют оптимальное для этой установки число n_i амплитуд A_i затухающих колебаний для определения δ [2]. Определяют δ путем регистрации амплитудно-временных параметров колебательной тра-

ектории светового луча, отраженного от зеркала, закрепленного на закручиваемой упругой нити, на которой подвешен тигель с образцом сплава, посредством фотосенсоров. Измеряют временные моменты t_1, t_2 засветки фотосенсоров (например, по передним фронтам) и разность между ними $\Delta t = \tau$ при прохождении отраженным световым лучом линейного отрезка ΔA вблизи точки смены полярности колебания амплитуды A_i . Точность определения ν составляет единицы процентов [1].

Стандартной процедурой определения $\nu = \Psi(t_i^\circ)$ является многократное повторенное за один эксперимент закручивание посредством периодического включения электромагнитного узла в виде электродвигателя постоянного тока тигля с расплавом, подвешенного вместе с зеркалом на упругой нити, посредством однополярных импульсов питания, синхронизированных с периодом T_i крутильных колебаний [3, 4].

Далее этот узел отключают, наблюдают свободное затухание колебаний по измерению отклонений светового луча, т. е. амплитуд A_i колебаний. Для вычисления δ измеряют начальную амплитуду A_0 затухающего колебания, амплитуды A_n , их временные параметры t_0, t_n и число колебаний n между ними.

При больших амплитудах A_i крутильных колебаний, характерных для первых колебаний, в расплаве возможна неконтролируемая турбулентность с учетом трения внутри условных «слоев» расплава, трения со

* Работа выполнена при финансовой поддержке научных исследований высших учебных заведений в рамках государственного задания Российской Федерации № 2014/236.

стенками керамического тигля, инерционности расплава. Это снижает достоверность определения вязкости расплава и, в конечном итоге, точность ее определения. С другой стороны, при малых амплитудах A_i возникает проблема отсутствия течения и перемещения расплава в пределе до нуля аналогично твердому образцу и, фактически, увеличения вычисленного значения вязкости в пределе до бесконечности. Существует определенная произвольность и субъективность выбора количества колебаний n между амплитудами A_0 и A_n , например, от $n = 4 \div 6$ до $n = 8 \div 11$ колебаний [5, 6]. В области начальных «больших» затухающих колебаний ($n = 10 \div 30$) существует линейный участок траектории, что позволяет считать линейной зависимость $\Delta t = \varphi(\Delta A)$. В «хвостовой» части затухающих колебаний появляется нелинейность вследствие вырождения наклонной прямой из короткого отрезка посреди колебательной косинусоиды в собственно косинусоиду. В этом случае существуют и аппаратные ограничения, обусловленные конечными размерами сдвинутых вплотную фотосенсоров, составляющими несколько мм, и светового пятна, их освещающего. При этом временной интервал Δt и, соответственно, интервал амплитуд ΔA не могут быть меньше каких либо величин для данной установки. Это ограничивает применение малых амплитуд A_i и ведет к уменьшению точности расчетов δ .

При многочасовых экспериментах неизбежен длительный отрезок времени до получения конечных результатов, при этом квалификация экспериментатора играет важную роль. Кроме того, возможен угар компонентов расплава. Вследствие этого затруднено обеспечение экспресс-измерений, стандартизации и снижения субъективности при определении затухания δ , а в результате и вязкости ν расплавов. Поэтому задачей работы является изучение возможности осуществления экспресс-измерений с приемлемой для большинства случаев точностью, сокращения времени экспериментов и обеспечение возможности их стандартизации, снижение влияния на проведение экспериментов субъективной роли исследователя. В конечном итоге это может обеспечить ускорение и упрощение процедуры определения кинематической вязкости высокотемпературных металлических расплавов.

Измерительный комплекс содержит вакуумную электропечь, в центре которой на упругой нихромовой нити подвешен тигель с шихтой. Высокотемпературную зону создает молибденовый цилиндрический электронагреватель. Вне этой зоны расположен электромагнитный узел – блок закручивания нити на заданный угол для запуска крутильных колебаний. Измерительное устройство состоит из зеркала, источника света и полупрозрачной контрольной шкалы с нулем посередине, а также фотоприемника, содержащего расположенные вплотную оптодатчики Φ_1 и Φ_2 типа TSL250. Переключатель полярности блока питания электромагнитного узла содержит реле. Управляющий

компьютер соединен с фотоприемником, выключателем блока питания и переключателем полярности. Объем расплава в тигле составляет $3 - 5 \text{ см}^3$. Магнитная система электромагнитного узла выполнена в виде статора электродвигателя постоянного тока мощностью 70 мВт и магнитного элемента – ротора, масса которого меньше или равна массе тигля с образцом расплава.

В ходе эксперимента подготавливают изучаемый образец известной массы, который в тигле подвешивается в печь в изотермической зоне, включают источник света, отраженный световой луч устанавливают в середину оптической шкалы. Затем создают вакуум до $0,01 \text{ Па}$ и включают нагреватель. Например, при исследовании авторами чугуна, легированного никелем, редкоземельными металлами, марганцем и другими элементами ($3 \% \text{ C}$, $2 \% \text{ Si}$, $2 \% \text{ Mn}$, $15 \% \text{ Ni}$, $6 \% \text{ Cu}$), проходит около $2,5 \text{ ч}$ для достижения одной из требуемых по целям эксперимента температур ($1270 \text{ }^\circ\text{C}$). После нагрева до нужной температуры питание $+15 \text{ В}$ через переключатель полярности подается на электромагнитный узел, который начинает закручивать упругую нить. После этого, примерно через $50 \text{ мс} \div 2 \text{ с}$, движущийся отраженный световой луч попадает на один из оптодатчиков Φ_1 , на выходе фотоприемного устройства появляется соответствующий стартовый сигнал U_1 , который вводится в компьютер. Этот сигнал запускает расчет временных интервалов Δt_i для вычисления δ по известным формулам. Через некоторое время в момент t_2 световой луч засвечивает другой оптодатчик Φ_2 , на выходе появляется сигнал U_2 – стоповый для данного фрагмента компьютерной программы. Траектория луча при этом находится в наиболее линейной (околонулевой) амплитудной области. Динамика прохождения отраженным световым лучом оптодатчиков (t_1, t_2) и появление сигналов U_1, U_2 обеспечивает коммутацию переключателя полярности, который управляет динамикой закручивания упругой нити. Сигналом к выключению закручивания и, соответственно, к началу измерения служит достижение максимальной установившейся для данного эксперимента амплитуды A_0 колебаний и минимального временного интервала. Вышеописанные затухающие крутильные колебания в измерительном комплексе показаны на рис. 1.

Для вышеуказанного расплава легированного чугуна, при общем времени эксперимента $t \approx 3 \text{ ч}$, для режима одностороннего закручивания при однополярном напряжении, подаваемом на электромагнитный узел, изучение, например, одной температурной точки требует 12 отсчетов для закручивания и 6 отсчетов для измерения. В этом случае, при длительности коммутационного импульса – меандра $T/2 = 2,06 \text{ с}$ и периода колебаний светового луча $T = 4,12 \text{ с}$, цикл одного измерения занимает $t \approx 1 \text{ мин}$. В случае двухстороннего закручивания, реализуемого посредством двухполярного импульсного напряжения, подаваемого на электромагнитный узел, необходимо три отсчета для закручивания

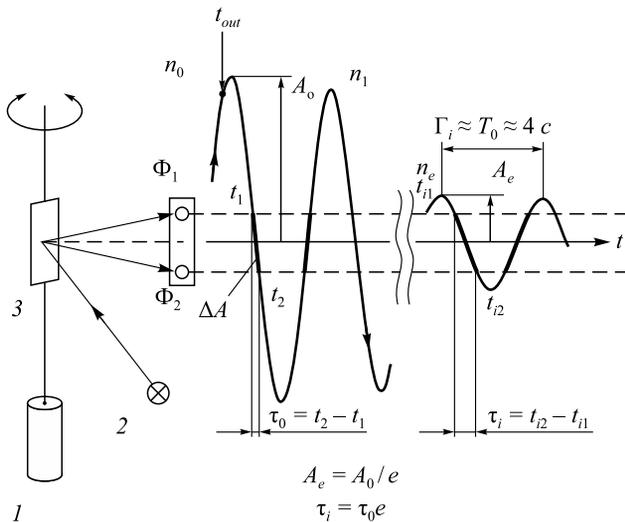


Рис. 1. Основные узлы измерительного комплекса и параметры траектории затухающих колебаний:
 1 – тигель с образцом, подвешенный на упругой нити; 2 – источник света; 3 – зеркало; Φ_1, Φ_2 – фотосенсоры; A_i – амплитуды колебаний; t_1 – старт компьютерного отсчета; t_2 – стоп компьютерного отсчета; t_{out} – момент отключения закручивания нити и начала свободных колебаний; n_i – номер колебания; T – период колебаний; ΔA – линейный участок косинусоиды; τ_i – время прохождения линейного участка косинусоиды

Fig. 1. The basic units of measuring complex and parameters of the trajectory of damped oscillations:

1 – crucible with the sample suspended on elastic thread; 2 – light source; 3 – mirror; Φ_1, Φ_2 – photosensor; A_i – amplitude oscillations; t_1 – start of the computer readout; t_2 – stop of the computer readout; t_{out} – tripping torque tightens thread and start free oscillations; n_i – number of oscillations; T – oscillation period; ΔA – linear plot of the cosine wave; τ_i – time of the passage of linear phase of cosine wave

и шесть отсчетов для измерения, при этом цикл одного измерения занимает $t \approx 0,5$ мин. Таким образом, при одностороннем закручивании время собственно измерения до полного затухания занимает $2 \div 3$ мин из 15 мин на одну температурную точку или на один цикл измерения, при двустороннем – $2 \div 3$ мин из 10 мин. Выигрыш по времени для одного цикла составляет 1,5 раз, по времени закручивания – 4 раза. Эти результаты запатентованы [7] и проиллюстрированы на рис. 2, где приведена для одной из температурных точек ($t_0 = 1270$ °C) динамика амплитуды A_i колебаний при двух режимах закручивания упругой нити с тиглем, содержащим расплав вышеуказанного легированного чугуна: кривая б отражает процедуру однополярного (одностороннего), кривая з – двухполярного (двустороннего) закручивания.

После окончания разгона в точке t_{out} и достижения необходимой амплитуды, например, $A_0 = 250 \div 300$ мм, компьютер отключает питание электромагнитного узла и наступает режим свободно затухающих колебаний. В процессе измерений выделяют момент, когда текущая амплитуда уменьшается в e раз: $A_i = A_0/e = A_e$, временной интервал возрастает в e раз: $\Delta t_i = e\Delta t_0 = \Delta t_e$, а количество колебаний становится равным $n_i = n_e$. При этом используют формулу

$$\delta = \frac{1}{n} \left\{ \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \right\}. \quad (1)$$

При использовании в расчетах по формуле (1) амплитуды A_e в качестве $A_i = A_n$ и с учетом того, что $A_0 = eA_n$, формула (1) после преобразований упрощается:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{n} \left\{ \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \right\} = \frac{1}{n} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1/e} \right) \right\} = \frac{1}{n} \{ \ln e \} = \\ &= \frac{1}{n} \left\{ \ln \left(\frac{1}{0,368} \right) \right\} = \frac{1}{n}. \end{aligned} \quad (2)$$

В этом случае декремент δ равен величине, обратной числу колебаний n между колебаниями с амплитудами A_0 и $A_i = A_n$. Это позволяет ускорить, упростить и оптимизировать процедуру измерений, так как в вычислениях достаточно использовать только число колебаний n_e . Это упрощает и облегчает как понимание хода исследования, так и принятие решений экспериментатором.

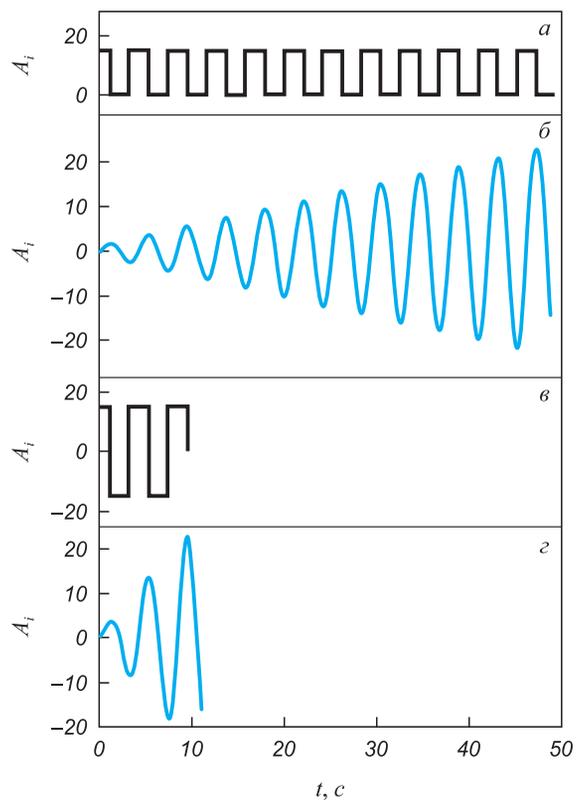


Рис. 2. Эпюры напряжений на узле закручивания упругой нити и траектории колебаний:

а – однополярное напряжение (В); б – траектория нарастающих колебаний A_i , см оптической шкалы; в – двухполярное напряжение (В); з – траектория нарастающих колебаний A_i , см оптической шкалы

Fig. 2. Stress blocks on tightening unit of elastic thread and trajectory of oscillations:

а – unipolar voltage (V); б – trajectory of increasing oscillations A_i , cm of optical scale; в – bipolar voltage (V); з – a trajectory of increasing oscillations A_i , cm of optical scale

С момента, когда $A_i = A_0$ и $t_0 = 0$, начинают собственно процедуру измерения параметров затухающих колебаний для вычисления δ и в конечном итоге вязкости ν . Отметим, что период колебаний, например, $T = 4,2$ с однозначно связан с числом колебаний, например, $n_i = 10 \div 20$ для каждого конкретного эксперимента на данной установке, при времени одного измерения $40 \div 60$ с и полного затухания колебаний до нескольких десятков минут. На колебательной траектории отмечают амплитудные экстремумы, начиная с A_0 до A_i , моменты времени t_1, t_2 прохождения линейного участка ΔA колебательной траектории отраженным лучом.

По результатам экспериментов с расплавами чистой электротехнической меди для $t_0 = 1150$ °С и чугуна для $t_0 = 1350$ °С были рассчитаны соответствующие экспоненты колебаний для времени t и числа колебаний n , стандартные отклонения σ_2 , отмечена амплитуда $A_i = A_0/e = A_e$ и σ_2 для нее, а также погрешности в виде коэффициентов вариации $C_v = \left(\sqrt{\frac{\sigma}{A_{\text{средн}}}} \right) \cdot 100\%$.

Условная амплитуда Y_i , определяемая по времени прохождения светового луча на линейном участке ΔA колебательной траектории через оптосенсоры Ф: $Y_i \sim 1/\Delta t = 1/|t_1 - t_2|$, однозначно связана с амплитудами A_i . Время Δt измеряется в тактах процессора компьютера. Использование первых $5 \div 10$ амплитуд A_i в качестве A_n вызывает ошибки по σ_2 и C_v . Использование «хвоста» экспоненты требует неоправданных временных затрат, при которых неизбежен угар расплава, точность расчет незначительно и есть опасность захода в нелинейную область, где линейный отрезок ΔA косинусоиды вырождается в собственно косинусоиду. Использование A_e вместо субъективного, длительного и не всегда возможного измерения всех амплитуд A_i – оптимальное решение, позволяющее получить стандартизованный, достоверный и достаточно точный результат, причем $C_v \approx 0,5 \div 0,7\%$. На рис. 3 приведен пример со значениями C_v , амплитудами A_i , аппроксимацией затухающих колебаний экспонентой для расплава чугуна при $t_0 = 1350$ °С и числе колебаний $n_e = 17$, при котором A_e уменьшилась в e раз за время $t \approx 80$ с:

$$y \approx \{(2,91E-07)\exp(-1,46)\}.$$

По $15 \div 20$ экспериментальным точкам были выполнены вычисления δ для четырех вариантов расчета по формуле (1): $\delta = 1/n \{\ln(A_0/A_i)\}$, где $i = 1, \dots, n$; A_0 – стартовая амплитуда, с которой начинается отсчет затухающих колебаний. Первый ряд значений: A_0 в момент начала затухающих колебаний (нулевая точка) – все точки в соотношении с нулевой: нулевая и первая, нулевая и вторая, нулевая и n -я. Вторым рядом построен только по двум соседним точкам, т.е. $n = 1$. Третий ряд построен по двум не соседним точкам: нулевая и четвертая, первая и пятая, вторая и шестая и т.д. Четвертый

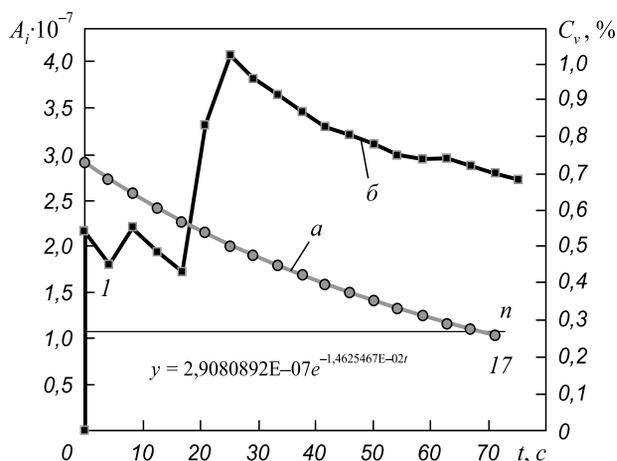


Fig. 3. Dynamics of oscillations damping A_i of molten cast iron in $t_0 = 1350$ °C:

a – equation of oscillations $y \approx \{(2,91E-07)\exp(-1,46)\}$; b – coefficient of variation $C_v, \%$; n_i – number of oscillations; A_i – amplitude of oscillations

Fig. 3. The dynamics of oscillations damping A_i of molten cast iron, in $t_0 = 1350$ °C:

a – equation of oscillations: $y \approx \{(2,91E-07)\exp(-1,46)\}$; b – coefficient of variation: $C_v, \%$; n_i – number of oscillations; A_i – amplitude of oscillations

ряд – горизонтальная прямая, построен по всем точкам с применением метода наименьших квадратов для экспоненты: $A_i = A_0 \exp(-Bt)$: например в уравнении для меди $B = 1,8468E-02$. Вычисления δ получены для Cu при $t_0 = 1150$ °С и чугуна при $t_0 = 1350$ °С [8]. Подчеркнем, что в качестве стартовой A_0 может быть использована любая ненулевая, например $3 \div 10$ -я амплитуда A_i . Соответственно, изменится и A_e . Это может понадобиться, если из-за сбоя в эксперименте возникнут проблемы в начальной области затухающих колебаний. По сравнению с условно эталонным многоточечным вычисленным вариантом худшие параметры обеспечивает построение по двум соседним точкам при $n = 1$, лучше – по двум не соседним точкам при $n = 3$, еще лучше – по всем точкам по отношению к нулевой A_0 . Использование A_e в качестве второй точки для определения $n = n_i = n_e$ обеспечивает приемлемую точность, близкую к условно эталонному варианту. Например, для Cu значение δ составило $0,077764$ по четвертому варианту (условный эталон) и $0,077666$ с использованием A_e . Аналогично, близкие результаты получены для чугуна: $\delta = 0,059546$ и $0,059613$.

Выводы. Подтверждена возможность стандартизации, упрощения и ускорения экспериментов при измерении кинематической вязкости высокотемпературных металлических расплавов. Это обеспечено использованием параметров в двух точках траектории затухания, отличающихся в e раз, а также двухполярного синхронизированного закручивания подвешенного на упругой нити тигля с расплавом. При этом снижается влияние субъективной составляющей на проведение и результаты экспериментов. Предлагаемый подход обеспечивает

приемлемую точность расчетов δ и последующего определения ν высокотемпературных металлических расплавов в случаях, когда не предъявляются повышенные требования к точности, например, в заводских лабораториях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бельтюков А.Л., Ладьянов В.И. Автоматизированная установка для определения кинематической вязкости металлических расплавов // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 2. С. 155 – 161.
2. Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Кушнир М.Н., Яковлев Г.Н. Установка для измерения кинематической вязкости металлических расплавов // Заводская лаборатория. 1980. № 10. С. 919 – 920.
3. Бельтюков А.Л., Ладьянов В.И., Олялина Н.В. Об особенностях измерения вязкости металлических расплавов методом крутильных колебаний // Расплавы. 2009. № 6. С. 19 – 21.
4. Елюхина И.В., Вяткин Г.П. К оценке влияния вторичных течений на колебания крутильного вискозиметра // Доклады Академии наук. 2006. Т. 410. № 1. С. 36 – 39.
5. Бельтюков А.Л., Ладьянов В.И., Шишмарин А.И. Вязкость расплавов Fe – Si с содержанием кремния до 45 ат. % // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 205 – 212.
6. Константинова Н.Ю., Попель П.С., Ягодин Д.А. Кинематическая вязкость жидких сплавов медь–алюминий // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 3. С. 354 – 357.
7. Пат. 2366925 РФ. Способ бесконтактного измерения вязкости металлических расплавов и устройство для его осуществления / В.С. Цепелев, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, А.М. Поводатор. 2009. Бюл. № 25.
8. Пат. 2386948 РФ. Способ определения декремента затухания при бесконтактном измерении вязкости высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев. 2010. Бюл. № 11.

Поступила 22 сентября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 6, pp. 407–411.

QUICK MEASUREMENT OF THE ATTENUATION RATIO IN PHOTOMETRIC TESTING OF THE HEAT-RESISTANT METAL ALLOYS' VISCOSITY

Povodator A.M., Engineer

Tsepelev V.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Research Center of Physics of metallic liquids of the Institute of Materials and Metallurgy (v.s.tsepelev@ustu.ru)

Konashkov V.V., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The authors considered the ways of expediting the determination of the kinematic viscosity ν of high temperature metallic melts. This was achieved using the parameters of the two points of the oscillatory trajectory of attenuation that differs in e times, and bipolar synchronized tightening suspended on elastic thread crucible melt. It is shown that the measurement of metallic liquids allows to analyze the materials and to make recommendations for the production of alloys with desired characteristics. The possibilities of the express-measurement with acceptable accuracy for most applications, reducing the time and experimentation to enable their standardization and reducing the impact on the experiments of subjective role of the researcher were studied. The use of two-way tightening gives a gain in time for one measurement cycle in 1.5 times, in time of twist – 4 times. The proposed approach provides an acceptable accuracy of calculations.

Keywords: melt, exponent, two points, bipolar synchronized tightening, quick measurement.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-407-411

REFERENCES

1. Bel'tyukov A.L., Lad'yanov V.I. An automated setup for determining the kinematic viscosity of metal melts. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 2, pp. 304–310.
2. Tyagunov G.V., Tsepelev V.S., Kushnir M.N., Yakovlev G.N. Device for measuring the kinematic viscosity of molten metals. *Zavodskaya laboratoriya*, 1980, no. 10, pp. 919–920. (In Russ.).
3. Bel'tyukov A.L., Lad'yanov V.I., Olyalina N.V. The peculiarities of measuring the viscosity of metallic melts by torsional vibrations. *Rasplavy*, 2009, no. 6, pp. 19–21. (In Russ.).
4. Elyukhina I.V., Vyatkin G.P. The impact of secondary flows on fluctuations of torsional viscometer. *Doklady Akademii Nauk*, 2006. Vol. 410, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.).
5. Bel'tyukov A.L., Lad'yanov V.I., Shishmarin A.I. Viscosity of Fe-Si melts with silicon content up to 45 at. %. *High Temperature*. 2014. Vol. 52, no. 2, pp. 185–191.
6. Konstantinova N.Yu., Popel' P.S., Yagodin D.A. The kinematic viscosity of liquid copper-aluminum alloys. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2009. Vol. 47, no. 3, pp. 354–357. (In Russ.).
7. Tsepelev V.S., Konashkov V.V., V'yukhin V.V., Povodator A.M. *Sposob beskontaktnogo izmereniya вязкости металлических расплавов i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of contactless measurement of viscosity of metallic melts and the device for its realization], Patent RF no. 2366925, *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 25. (In Russ.).
8. Povodator A.M., Konashkov V.V., V'yukhin V.V., Tsepelev V.S. *Sposob opredeleniya dekrementa zatukhaniya pri beskontaktnom izmerenii вязкости высокотемпературных металлических расплавов* [A method for determining the damping rate for non-contact measurement of viscosity of high-temperature metallic melts]. Patent RF no. 2386948, *Byulleten' izobretenii*. 2010, no. 11. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed with the financial support for scientific research institutions of higher education within the State tasks of the Russian Federation no. 2014/236.

Received 22, September 2014