Ермолаев Е.В., Воронова Н.О.

Метод определения численного значения динамической вязкости по диаметру растекания капли исследуемого веществаФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»
(Россия, Йошкар-Ола)

doi: 10.18411/lj-07-2020-19

idsp: ljjournal-07-2020-19

Аннотация

В настоящей статье проведен аналитический расчет процесса растекания капли высоковязкой жидкой среды под воздействием стационарной нагрузки, предварительно помещенной между двумя стеклянными пластинами. Получено выражение, позволяющее определить численное значение вязкости исследуемой среды по величине диаметра растекания капли. Проведен натурный эксперимент с получением численных значений вязкости на примере металлизационных вольфрамовых паст, используемых при производстве компонентов микроэлектроники.

Ключевые слова: вязкость, диаметр растекания, металлизационные вольфрамовые пасты, стеклянные пластины.

Abstract

In this article is completed an analytical calculation of the spreading process of a drop of a highly viscous liquid fluid under the influence of a stationary load pre-installed between two glass plates. Found expression that allows to determine the numerical value of the viscosity of the fluid under study by the value the diameter of the spreading drop. The full-scale of experiment is conducted to obtain quantitative values of viscosity the example of using metallizing tungsten pastes in the production of microelectronics components.

Keywords: viscosity, spreading the diameter, metallizing tungsten pastes, glass plates.

В работе [1] разработано устройство для определения косвенного показателя вязкости жидкофазных систем. В качестве косвенного показателя предложено использовать диаметр растекания капли жидкой среды под приложением стационарной нагрузки в течение времени t . Покажем далее, как можно использовать численные значения диаметра растекания капли исследуемой жидкой среды для определения численного значения динамической вязкости. Для этого наглядно продемонстрируем, что происходит с каплей исследуемой среды с течением времени, помещенной между двумя стеклянными пластинами и подверженной стационарной нагрузке (Рис.1).

Рисунок 1 – Растекание капли исследуемой среды между двумя пластинами с приложением стационарной нагрузки

Задача о течении вязкой жидкости между сжимаемыми пластинами решена довольно давно и неоднократно обсуждалась в руководствах по гидродинамике вязкой жидкости [2]. Поэтому целесообразно, не останавливаясь на деталях вычислений, привести итоговую формулу, связывающую вес верхней пластины, оказывающей давление P на вязкую жидкость и скорость растекания жидкости u :

$$P = \frac{3\pi\eta u R^4}{8h^3} \quad (1)$$

Необходимо отметить, что при растекании капли вязкой жидкости сохраняется условие постоянства объема (см. Рис.1), т.е. объем капли исследуемой жидкости до приложения нагрузки $v_0 = \pi R_0^2 \cdot 2h_0$ будет равен объему капли жидкости после приложения нагрузки $v = \pi R^2 \cdot 2h$ в течение любого времени t :

$$\begin{aligned} v_0 &= v \\ \pi R_0^2 \cdot 2h_0 &= \pi R^2 \cdot 2h \Rightarrow R_0^2 h_0 = R^2 h \end{aligned} \quad (2)$$

Скорость изменения расстояния между пластинами из-за растекания капли жидкости может быть выражена следующим выражением:

$$u = -\frac{dh}{dt} \quad (3)$$

Знак минус означает, что скорость растекания капли жидкости убывает со временем. Происходит это из-за возрастающей силы трения между исследуемым материалом и внутренней поверхностью пластин, вследствие увеличения площади взаимодействия двух материалов ($R > R_0$). Подставляя выражение (3) в (1), получим следующее соотношение:

$$P dt = -\frac{3\pi\eta R^4 dh}{8h^3} \quad (4)$$

Решим интегральное уравнение методом замены переменной исходя из условия постоянства объема (2):

$$\begin{aligned} \int_0^t P dt &= - \int_{h_0}^h \frac{3\pi\eta R^4 dh}{8h^3} = \left| h = \frac{R_0^2 h_0}{R^2} \Rightarrow dh = -\frac{2R_0^2 h_0}{R^3} \right| = - \int_{R_0}^R \frac{3\pi\eta R^7 dR}{8R_0^4 h_0^2} \\ Pt &= \frac{3\pi\eta}{32R_0^4 h_0^2} (R^8 - R_0^8) \Rightarrow \eta = \frac{32PtR_0^4 h_0^2}{3\pi(R^8 - R_0^8)} \end{aligned} \quad (5)$$

Исходя из того, что начальный объем капли исследуемого образца определяется выражением $v_0 = \pi R_0^2 \cdot 2h_0$, можно записать выражение (5) в следующем виде:

$$\eta = \frac{32PtR_0^4 h_0^2}{3\pi(R^8 - R_0^8)} \cdot \frac{\pi^2}{\pi^2} = \frac{8Pt v_0^2}{3\pi^3 (R^8 - R_0^8)} \quad (6)$$

При этом необходимо отметить, что при измерении вязкости с помощью устройства, представленного в работе [1], приложенная нагрузка на исследуемый материал создается как стеклянной ($P1$), так и металлической пластиной ($P2$) с

загрузочным отверстием. Поэтому необходимо учитывать суммарное воздействие двух «грузов», оказывающих давление на исследуемый материал.

Загрузочное отверстие в металлической пластине, предназначенной для заполнения исследуемым материалом, не меняется. Но несмотря на это начальный объем исследуемого вещества v_0 при каждом новом измерении отличается от предыдущего. Связано это с тем, что для выталкивания исследуемого вещества из загрузочного отверстия металлической пластины используется специальный штифт того же радиуса, что и загрузочное отверстие. Тем самым на конце штифта остается некоторое количество материала, которое и заставляет вносить коррективу в величину v_0 . Особенно это актуально, когда исследуют высоковязкие жидкофазные системы, когда ее налипание на поверхность выталкивающего штифта особенно заметно. На Рис.2 показана поэтапная схема загрузки материала, размещенного между двумя стеклянными пластинами.

Рисунок 2 – Схема поэтапной загрузки исследуемой вязкой среды в загрузочное отверстие устройства определения вязкости

Таким образом для коррективы объема v_0 необходимо знать массу исследуемой жидкости, оставшейся на нижней стеклянной пластине, и ее плотность:

$$v_0 = \frac{m_0}{\rho} \quad (7)$$

В свою очередь массу m_0 можно найти из следующих соображений:

$$m_0 = m' - m_{ост} = m' - m_{ост} = m' - (m_{шт1} - m_{шт0}) \quad (8)$$

Здесь m' – масса исследуемой жидкости в объеме загрузочного отверстия, которая определяется выражением $m' = \frac{\pi R_0^2 \cdot 2h'}{\rho}$, поскольку $R' = R_0$; $m_{шт1}$ – масса выталкивающего штифта с налипшей жидкостью; $m_{шт0}$ – масса выталкивающего штифта до взаимодействия с жидкостью; $m_{ост}$ – масса остаточного количества жидкости на штифте.

С учетом (7) и (8), формула (6) приобретает вид:

$$\eta = \frac{8Pt \left[\pi R_0^2 \cdot 2h' - \frac{m_{ост}}{\rho} \right]^2}{3\pi^3(R^8 - R_0^8)} = \frac{8Pt \left[\pi R_0^2 \cdot 2h' - \frac{(m_{шт1} - m_{шт0})}{\rho} \right]^2}{3\pi^3(R^8 - R_0^8)} \quad (9)$$

Найденное выражение (9) является универсальным, подходит для вычисления вязкости жидкофазных сред в широком диапазоне от (1 до 50000 Пуаз). При этом модифицированное выражение остается достоверным при вариации используемых параметров загрузочного отверстия (R_0, h') и величины внешней нагрузки P . Однако как показывают предварительные данные, полученные на экспериментальных образцах высоковязких металлизационных вольфрамовых паст, существует временной предел, выше которого проводить измерения не целесообразно.

Временные рамки проведения измерений обусловлены тем, что с течением времени процесс растекания капли исследуемой жидкой среды замедляется, как и изменение расстояние между стеклянными пластинами. График изменения диаметра капли под стационарной нагрузкой с течением времени представлен на Рис.3.

Как видно из графика, кривые для различных диапазонов вязкости имеют одинаковый затухающий характер. При этом очень важно отметить, что после 120 секунд диаметр растекания капли металлизационной пасты в течение следующих 60 секунд имеет крайне низкий прирост (от 2,4 до 4,2% в зависимости от значения вязкости металлизационной пасты). Поэтому необходимо снимать показания диаметра растекания капли жидкой среды по истечении 120 секунд.

Рисунок 3 – Динамика растекания капли вольфрамовой металлизационной пасты под постоянным давлением

Таким образом на Рис. 3 показаны численные значения вязкости металлизационной вольфрамовой пасты, каждому из которых соответствует свой диаметр растекания капли пасты после 120 секунд постоянной нагрузки величиной

3,035 Н. Численные значения вязкости пасты были получены аналитически на основе выражения (9).

1. Воронова Н.О., Ермолаев Е.В. Разработка метода измерения вязкости жидкофазных высоковязких систем на основе косвенных показателей / Н.О. Воронова, Е.В. Ермолаев // Сборник трудов VI международной конференции: «Наука и современность: вызовы глобализации». – Киев, 2020. – С. 99–104.
2. Малкин А.Я., Чахлых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. –М.: Химия, 1979. – 304 с.