

УДК 621.79 + 553.042

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДООБМАЗОЧНЫХ МАСС НА ОСНОВЕ ГАББРО-ДИАБАЗОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Наумов С.В., Канина А.Е., Игнатова А.М., Игнатов М.Н.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,

Пермь, e-mail: naumovstanislav@yandex.ru,

ignatovaanna2007@rambler.ru, ig89028332000@gmail.com

В статье рассматривается вопрос влияния гранулометрического состава компонентов обмазки сварочных электродов из габбро-диабазов на реологические свойства обмазочной массы. Представлена математическая модель расчета, даны рекомендации по проведению экспериментов. Установлены основные зависимости и взаимосвязи между реологическими показателями обмазочных масс и гранулометрическим составом сварочных материалов. Сухая смесь электродообмазочной массы готовилась из материалов постоянного гранулометрического состава, перемешивалась с дозой жидкого стекла (содержание стекла в обмазочной массе – 22% мас; модуль – 2,54; плотность – 1,54 г/см³) в течение одного и того же промежутка времени ($t = 12$ мин), после чего у приготовленной массы одновременно были определены реологические характеристики, получены и исследованы образцы на прочность сырой обмазочной массы. Анализ результатов показывает, что получение качественных электродных покрытий возможно при значениях сдвигающихся напряжений массы в пределах 2-4·10⁴ Па, предел прочности на разрыв такой обмазочной массы составляет 0,36–0,44 кг/см².

Ключевые слова: сварка, флюс, электрод, обмазка, течение, дисперсность, гранулометрический состав, габбро-диабазы

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MASS FOR COATING ELECTRODES BASED ON GABBRO-DIABASE FOR WELDING WITH COATED ELECTRODES

Naumov S.V., Kanina A.E., Ignatova A.M., Ignatov M.N.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь,
e-mail: naumovstanislav@yandex.ru, ignatovaanna2007@rambler.ru, ig89028332000@gmail.com

The article discusses the effect of particle size distribution of components plastering welding electrodes of gabbro-d diabase on the rheological properties of the coating mass. A mathematical model to calculate, recommendations for experiments. The basic dependence and the relationship between the rheological parameters of coating mass and size distribution of welding consumables. The dry mixture was prepared from elektrodobmazochnoy weight material constant particle size, mixed with a dose of liquid glass (glass content in the coating mass – 22% by weight; module – 2,54, density – 1,54 g/cm³) within the same period of time ($t = 12$ min), after which the cooked weight were simultaneously determined rheological characteristics of the samples obtained and analyzed for the green strength of coating mass. Analysis of the results shows that the receiving quality of the electrode coatings may shear stress values in mass within 4·10⁻² (4) Pa, the tensile strength of a coating mass of 0,36–0,44 kg/cm. m.

Keywords: welding, flux, electrode coating, flow, dispersion, particle size distribution, gabbro-d diabase

Экструзия электродных покрытий из керамической пластифицированной электродообмазочной массы на металлический электродный стержень широко известна и достаточно подробно изучена [1, 2].

Однако необходимость малотоннажного производства специальных покрытых электродов различной номенклатуры и назначения требует знания научно-обоснованных рекомендаций по подготовке и переработке пластифицированных электродообмазочных масс, разработки методик оценки их реологических характеристик, разработки режимно-конструктивных параметров комплекса технологического оборудования для таких производств.

Технологические свойства электродообмазочных масс в значительной мере зависят от характеристики связующего компонента (в нашем случае водный раствор

жидкого стекла), гранулометрического состава компонентов сварочных материалов, соотношения заданного состава компонентов и связующего в пластифицированной электродообмазочной массе.

В процессах экструзии электродных покрытий на металлический стержень осуществляется течение пластифицированной массы в каналах различной формы. Реологические свойства такой массы по-разному проявляются в зависимости от геометрии потока. Знание реологических свойств электродообмазочной массы позволяет сформировать условия, необходимые для получения электродного покрытия с заданным уровнем технологических свойств.

В настоящее время существует несколько типов приборов для оценки реологических свойств [3]. К ним относятся ротационные приборы с рабочими узлами типа

конус-плоскость, с коаксиальными цилиндрами, параллельными пластинами, а также капиллярные и трубчатые вискозиметры. Методы капиллярной и трубчатой вискозиметрии для определения кривых течения оказываются удобнее и проще методов ротационной вискозиметрии. Капиллярные и трубчатые системы позволяют оценить пристенные и ориентационные эффекты и, кроме того, они являются простейшими модельными системами, в которых поле наполнений и скоростей деформации неоднородно, а кинематика течения наиболее проста.

На основе анализа картин течения в капилляре была разработана методика и капиллярный вискозиметр определения реологических характеристик пластифицированных керамических электрообмазочных масс [4, 5].

Основа методики [6] базируется на том, что течение пластифицированной массы

в капилляре рассматривается как простой сдвиг жидкости при установившемся ламинарном изотермическом течении в капилляре постоянного течения и бесконечной длины с учетом «входных», «концевых» и «пристеночных» эффектов.

Кривые течения (зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига) как характеристика исследуемого материала устанавливаются путем измерения перепада давления по длине капилляра и определения скорости течения.

На рис. 1 схематически показаны изменения перепадов давления в резервуаре и в капилляре. Общий перепад давления между точкой в верхней части вискозиметрического резервуара и областью выхода из трубы состоит из 3-х слагаемых:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{кап}} + \Delta P_{\text{вых}} \quad (1)$$

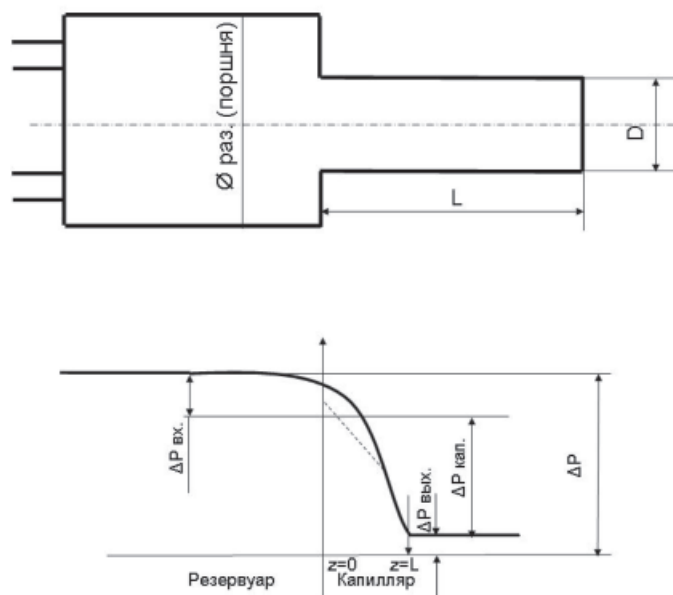


Рис. 1. Схема распределения давления в резервуаре и в капилляре

Для вязкоупругих жидкостей общий перепад давления на входе в капилляр $\Delta P_{\text{вх}}$ можно условно разделить на две составляющие: вязкую $\Delta P_{\text{вязк}}$ и высокоэластичную $\Delta P_{\text{эл}}$.

$$\Delta P_{\text{вх}} = \Delta P_{\text{вязк}} + \Delta P_{\text{эл}} \quad (2)$$

Так как $\Delta P_{\text{вязк}}$ составляет менее 5% от общего значения, то практически можно полагать:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл}} \quad (3)$$

$\Delta P_{\text{эл}}$ определяется только скоростью сдвига и практически не зависит от отношения L/D . Бегли [7] полагал, что высокие значения перепада давления на входе в капилляр можно рассматривать как фиктив-

ное увеличение длины капилляра, а также при фиксированной скорости сдвига зависимость общего падения давления от отношения длины капилляра к его диаметру должна быть линейной. Такие зависимости часто называют зависимостями по Бегли (рис. 2). Экстраполяция этих позиций к нулевому давлению дает отношение фактического значения длины капилляра к его диаметру при определенной скорости сдвига.

Исходя из этого, Бегли предложил следующее уравнение для расчета истинного напряжения сдвига на стенке капилляра τ_w :

$$\tau_w = \Delta P / 2 \left(\frac{L}{R} + n_B \right), \quad (4)$$

где ΔP – общая разность давлений в двух точках: в вискозиметрическом резервуаре и на выходе из капилляра; L/R – отношение длины капилляра к его радиусу; n_b – входная поправка при фиктивном удлинении капилляра.

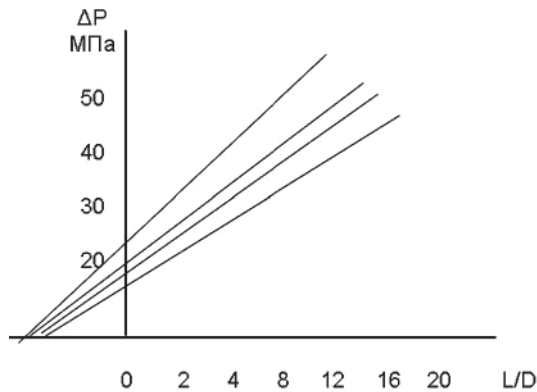


Рис. 2. Зависимость общего перепада давления от отношения длины капилляра к его диаметру при различных скоростях сдвига

Кривые течения как характеристики исследуемого материала не должны зависеть от геометрических параметров канала. Входная поправка необходима для получения кривых течения, инвариантных относительно геометрических параметров капилляра.

Значение поправки n_b можно определить, построив график зависимости $\Delta P = f(L/R)$. Этот метод определения предполагает проведение измерений на нескольких капиллярах с различными отношениями L/R . Простейший прием учета входных потерь требует использования двух капилляров разной длины (L_1 и L_2), но одинакового радиуса. Измерения на обоих капиллярах должны производиться при одинаковых расходах или пересчитываться как одинаковые расходы, тогда:

$$\tau_w = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{L_1 - L_2}. \quad (5)$$

Уравнение течения жидкости для устойчивого течения с развившимся профилем скоростей (течение в капилляре) может быть записано в цилиндрических координатах:

$$-\frac{dP}{dZ} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d(r \cdot \tau_{zz})}{dr} = 0. \quad (6)$$

Интегрируется в пределах от $r=0$ до произвольного r , получим:

$$\tau_{zz} = \frac{r}{2} \cdot \frac{dP}{dZ}, \quad (7)$$

где dP/dZ градиент давления в области полностью развившегося течения, не зависит от r .

Напряжение сдвига на стенке τ_w (т.е. при $r=R$)

$$\tau_w = \frac{dP}{dZ} \cdot \frac{R}{2}. \quad (8)$$

При течении ньютоновской жидкости из резервуара в капилляр с радиусом R и длиной L эффективную скорость сдвига $\gamma_{\text{эф}}$ можно определить:

$$\gamma_{\text{эф}} = \frac{4Q}{\pi R^3} = 8 \frac{V}{D}, \quad (9)$$

где Q – объемная скорость течения; V – средняя скорость течения жидкости; D – диаметр капилляра.

Объемная скорость течения Q может быть найдена из профиля скорости $v_z(r)$ в капилляре:

$$Q = 2\pi \int_0^R v_z(r) r dr. \quad (10)$$

Принимая, что скольжение на стенке капилляра отсутствует, т.е. $v_z(r)=0$, интегрируется по частям с учетом предыдущих формул и имея для постоянной скорости сдвига $dv_z/dr = \gamma$. Получим:

$$(\tau_w^3 Q) / \pi R^3 = \int_0^{\tau_w} \gamma \tau_{rz}^2 d\tau_{rz}. \quad (11)$$

Дифференцируя и используя правило Лейбница:

$$\gamma_w = \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)_w = \frac{1}{\pi R^3} \left(\tau_w \frac{dQ}{d\tau_w} + 3Q \right). \quad (12)$$

Поставим $\gamma_{\text{эф}}$ уравнения (9) в (12):

$$\gamma_w = \frac{\gamma_{\text{эф}}}{4} \left(3 + \frac{d \ln \gamma_{\text{эф}}}{d \ln \tau_w} \right). \quad (13)$$

Это соотношение, впервые полученное Вайссенбергом [8], известно как уравнение Рабиновича-Муни и используется при расчете истинной скорости сдвига при течении ньютоновской жидкости.

С другой стороны, из экспериментальных данных хорошо известно, что для многих материалов зависимость $\tau_w = f(\gamma_{\text{эф}})$ в двойных логарифмических координатах выражается прямой линией в достаточно широкой области значений $\gamma_{\text{эф}}$.

Можно записать эмпирическое уравнение:

$$\tau_w = K(\gamma_{\text{эф}})^n. \quad (14)$$

В этом уравнении n – угловой коэффициент графика зависимости $\lg \tau_w = f(\lg \gamma_{\text{эф}})$:

$$n = \frac{d \ln \tau_w}{d \ln \gamma_{\text{эф}}}. \quad (15)$$

Тогда уравнение для $\gamma_{эф}$ можно переписать:

$$\gamma_w = \frac{3n+1}{4n} \cdot \gamma_{эф}. \quad (16)$$

Подставив эту формулу в выражении для τ_w , получим:

$$\tau_w = K\gamma_{эф}^n, \quad (17)$$

где $K = K^1 \cdot [4n/(3n+1)]^n. \quad (18)$

При $n = 1$ эта формула сводится к выражению, описывающему течение ньютоновских жидкостей:

$$\tau_w = K\gamma_{эф}. \quad (19)$$

где K – ньютоновская вязкость среды.

Можно сделать вывод, что значения n , отличные от 1, указывают на отклонение свойств материала от характеристики ньютоновской дикости. Уравнению $\tau_w = K\gamma_w^n$ известно как степенной закон течения Оствальда-де-Вилла, а жидкости, ему подчиняющиеся, – «степенные».

Распределение скорости в капилляре для «степенной» жидкости определим, интегрируя:

$$\gamma = \frac{dV_z}{dr}; \quad V_{z(r)} = -\int_R^r \gamma dr; \quad V_{z(r)} = 0, \quad (20)$$

т.е. скольжение на стенке капилляра отсутствует.

Из дальнейших преобразований получим:

$$V_{z(r)} = V \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left[1 - \frac{r}{R} \right]^{(n+1)/n}. \quad (21)$$

Таким образом, для построения кривой течения (зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига) достаточно произвести измерение перепада давления по длине капилляра и определить скорость течения. С помощью уравнения (17) и кривых течения, встроенных в двойных логарифмических координатах, можно определить две реологические константы K и n в степенном законе течения: n – по углу наклона кривой; K – это τ_w при $\gamma_w = 1$. Из кривых течения можно рассчитать также вязкость:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\gamma_w}; \quad \eta = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (22)$$

Для жидкости, подчиняющейся степенному закону, выражение для вязкости получим, подставив (17) в (22):

$$\tau_w = K\gamma_w^{n-1}. \quad (23)$$

Отсюда следует, что при $n < 1$ вязкость уменьшается с возрастанием скорости

сдвига γ . Из литературы [9, 10] известно, что для ряда исследованных материалов вязкость остается постоянной при низкой скорости сдвига вплоть до определенного значения γ , а затем дальнейшее возрастание скорости сдвига вызывает снижение вязкости. При исследовании процессов течения систем могут проявляться пристенные и ориентационные эффекты, например, проскальзывание на стенке. Результатом этих эффектов может быть значительное изменение граничных условий при течении материала. В результате проскальзывания наблюдается снижение эффективного радиуса по сравнению с номинальным радиусом измерительного угла (капилляра), который по обработке данных входит в расчетную формулу в третьей степени. Поэтому погрешность при определении кривой течения может быть существенной. При оценке влияния пристенного скольжения на результаты измерений в капиллярных вискозиметрах исходят из предположения, что скорость движения среды относительно стенки капилляра определяется скачком скорости в пристенном слое ($V_{ск}$ – скорость скольжения), а также скоростью сдвига ламинарно пересекающихся слоев в объеме. Если $V_{ск}$ – однозначная функция напряжения сдвига, то средняя скорость сдвига γ определяется:

$$\gamma = \gamma_{об} + \frac{V_{ск}(\tau)}{R}. \quad (24)$$

Измерение γ для капилляров с различными радиусами R при нескольких постоянных значениях позволяет определить функции течения $\gamma_{об}(\tau_w)$ и скольжения $V_{ск}(\tau_w)$ (метод Муни).

Реологические характеристики пластифицированной массы определяются в следующей последовательности:

1. Готовят набор капилляров следующих геометрических соотношений – L/D (L – длина капилляра, D – диаметр капилляра) (мм): 4/2, 8/2, 12/2, 20/2, 6/3, 12/3, 18/3, 30/3, 5/10, 5/20, 5/30, 5/50.

2. Для каждого капилляра проводят серию экспериментов пристеночных скоростей течения. Для этого рабочий узел, состоящий из капилляра и вискозиметрического резервуара с исходным материалом, тарируют, затем материал подвергают нагружению при различных скоростях движения поршня. При этом для каждой скорости измеряют величину давления прессования. Далее для каждого капилляра соответствующей скорости поршня рассчитывают:

– давление P по усилию F на прессе $P = F/S$, где S – площадь поперечного сече-

ния поршня или замеряют давление датчиками, установленными на капилляре;

– объемную скорость истечения Q (объемный расход в единицу времени)

$$Q = \pi R_n^3 V_n, \quad (25)$$

где R_n – радиус поперечного сечения поршня; V_n – скорость движения поршня. Если в качестве нагрузочного устройства используется шнек, то расход Q определяется в процессе экструзии, например, весовым способом. При этом объем истекающего из капилляра материала за единицу времени рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{P}{\beta t_n}, \quad (26)$$

где P – вес образца; β – удельный вес; t_n – время выхода образца; эффективную скорость сдвига $\gamma_{\text{эф}}$ при течении ньютоновской жидкости из резервуара в капилляр с радиусом R и длиной L :

$$\gamma = 40/\pi R^3, \quad (27)$$

где Q – объемная скорость течения.

3. Для расчета сдвиговых напряжений на стенке капилляра τ_w с учетом поправок на входные эффекты необходимо:

– построить график зависимости давления от эффективной скорости сдвига $P = f(\gamma_{\text{эф}})$ для капилляров с различными геометрическими соотношениями, например: $L/D = 2, 4, 6, 10$;

– построить график зависимостей давления от геометрических параметров $P = f(L/D)$ при различных скоростях сдвига. Для этого, значения давления P для различных соотношений L/D определяют по графику (рис. 3) при определенной скорости сдвига $\gamma_{\text{эф}}$. Например, кривая для γ_1 (рис. 4) построена по точкам 1, 2, 3, 4 соответствующим аналогичным точкам графика (рис. 3). Таким образом, каждая кривая характеризует течение материала в капиллярах с разной геометрией при равных скоростях сдвига;

– рассчитать входные («концевые») поправки (поправки по Бэгли n_b или P_b). Для этого необходимо проэкстраполировать кривые графика зависимостей по Бэгли (рис. 4) до нулевого значения. На оси давления отсекаются отрезки, равные P_b , а на оси L/D отрезки n_b . Для учета «концевых» эффектов можно использовать любую из этих поправок, например, воспользуемся поправкой P_b и построим зависимость P_b от эффективной скорости скольжения $\gamma_{\text{эф}}$. Для этого с графика (рис. 4) снимают значения отрезков P_b , соответствующие различным скоростям сдвига;

– вычислить сдвиговые напряжения на стенке капилляра τ_w с учетом поправки, находя значения по графику (рис. 5) для любой (соответствующей нашему расчету) скорости сдвига $\gamma_{\text{эф}}$.

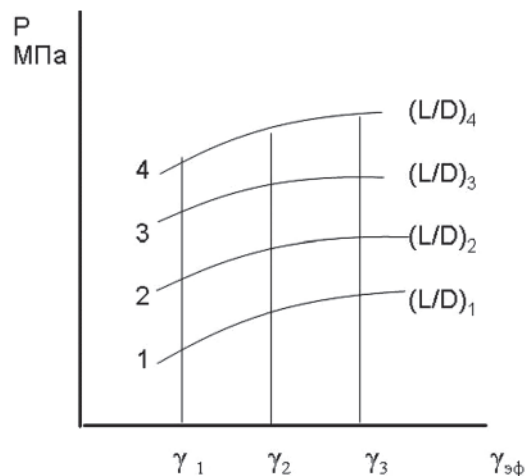


Рис. 3. Зависимость давления от эффективной скорости сдвига для капилляров с различными L/D

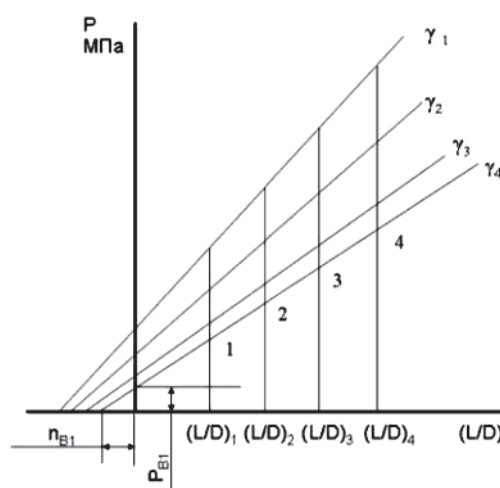


Рис. 4. Зависимость для определения входных поправок

Построим кривую течения, т.е. зависимость напряжения сдвига на стенке капилляра τ_w от эффективной скорости сдвига $\gamma_{\text{эф}}$. Полученный график позволяет определить наличие эффектов скольжения. На рис. 6 приведены примеры:

а) проскальзывание материала на стенках капилляра отсутствует;

б) скольжение существенно, т.к. для капилляров с различными радиусами своя кривая течения $\tau_w = f(\gamma_{\text{эф}})$.

При учете эффектов скольжения эксперимент необходимо провести на капиллярах с внутренней кольцевой нарезкой (глубина нарезки 1/50–1/100).

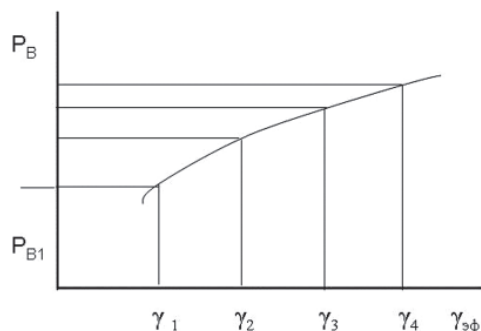


Рис. 5. Зависимость для определения сдвиговых напряжений с учетом поправки по Бегли

4. Для расчета вязкости материала, полагая, что поведение материала можно описать в рамках степенного закона (18) и построив кривую течения в двойных логарифмических координатах $\lg \tau_w - \lg (\gamma_{эф})$ (рис. 7) находим:

– n – показатель степени в 18 – угловой коэффициент графика зависимостей $\lg \tau_w - \lg (\gamma_{эф})$ (рис. 7).

$$n = \frac{\Delta \lg \tau_w}{\Delta \lg \gamma_{эф}} = \frac{\lg \tau_{w1} - \lg \tau_{w2}}{\lg \gamma_{эф1} - \lg \gamma_{эф2}}; \quad (28)$$

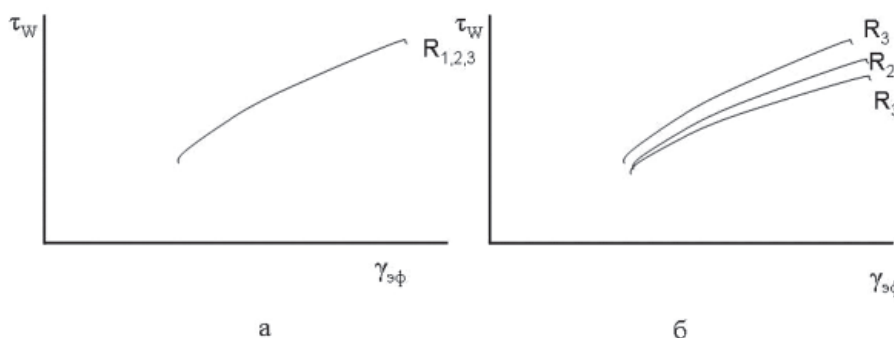


Рис. 6 Кривые течения при отсутствии проскальзывания (а) на стенках капилляра и при наличии скольжения (б)

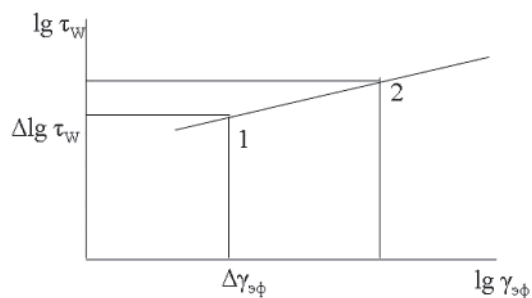


Рис. 7. Логарифмическая зависимость между сдвиговым напряжением и эффективной скоростью сдвига

– γ_w – истинная скорость на стенке капилляра рассчитывается по формуле Рабиновича-Муни (13) с учетом (18):

$$\gamma_w = [(3n + 1) / 4n] \gamma_{эф} = \frac{Q(n + 3)}{\pi R^3}; \quad (29)$$

– K – константа в степенном уравнении (18) с учетом истинной скорости:

$$K = \frac{\tau_w}{\gamma^n}; \quad (30)$$

– рассчитать эффективную вязкость материала по формуле:

$$\eta_{эф} = \frac{\tau_w}{\gamma_w}. \quad (31)$$

Для жидкости, подчиняющейся степенному закону, выражение для вязкости (18) имеет вид:

$$\eta = K \gamma^{n-1}. \quad (32)$$

Разработанный нами капиллярный вискозиметр устанавливался на разрывной машине Р5. Усилие передавалось через соответствующие динамометры сжатия.

Сухая смесь электрообмазочной массы готовилась из материалов постоянного гранулометрического состава, перемешивалась с дозой жидкого стекла (содержание стекла в обмазочной массе – 22 % мас; модуль – 2,54; плотность – 1,54 г/см³) в течение одного и того же промежутка времени ($t = 12$ мин) после чего у приготовленной массы одновременно были определены реологические характеристики, получены и исследованы образцы на прочность сырой обмазочной массы.

Анализ результатов показывает, что получение качественных электродных покрытий возможно при значениях сдвигающих напряжений $\tau_{сд}$ массы в пределах $2-4 \cdot 10^4$ Па, предел прочности на разрыв такой обмазочной массы составляет $0,36-0,44$ кг/см².

Список литературы

1. Благовещенская В.В., Гололобов Б.А., Строгова В.Я. Технология изготовления электродов для дуговой сварки. – М.: Машиностроение. 1966. – 146 с.
2. Гранулятор периодического действия / Ханов А.М., Игнатов М.Н., Олонцев И.Ф. и др. // А.С. 1706687 СССР, В01 2/10.СССР) // БИ. 1992. № 3.
3. Игнатов М.Н., Ханов А.М. Основы технологии электродного производства. – Пермь, ПГТУ, 1997. – 109 с.
4. Игнатов М.Н. Физико-химические основы получения и применения карбидосодержащих материалов для сварки никеля: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 1998. – 38 с.
5. Игнатов М.Н. Физико-химические основы получения и применения карбидосодержащих материалов для сварки никеля: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 1998. – 340 с.
6. Илюшин А.А. Пластичность. – М.: ГИТТЛ. 1963. – 271 с.
7. К оптимизации фракционного состава сварочных флюсов / М.Н. Игнатов, С.А.Казанцев, С.Г.Иванов и др. // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных материалов. – Свердловск: УПИ, 1992. – С. 130–134.
8. Мидлман С. Течение полимеров. – М.: Мир, 1971. – 200 с.
9. Фадеева В.С. Формуемость пластических дисперсных масс. – М.: Госстройиздат, 1961. – 129 с.
10. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров: пер. с англ.; под ред. А.С. Фридмана. – М.: ИЛ, 1965. – 357.

References

1. Blagoveshhenokaja V.V., Gololobov B.A., Strogova V.Ja. Tehnologija izgotovlenija jelektrodov dlja dugovoj svarki. M.: Mashinostroenie. 1966. 146 p.

2. Granuljator periodicheskogo dejstvija / Hanov A.M., Ignatov M.N., Oloncev I.F. i dr. // A.C. 1706687 SSSR, V01 2/10. SSSR) // BI. 1992. № 3.

3. Ignatov M.N., Hanov A.M. Osnovy tehnologii jelektrod-nogo proizvodstva. Perm', PGTU, 1997. 109 p.

4. Ignatov M.N. Fiziko-himicheskie osnovy poluchenija i primenenija karbidosoderzhashhij materialov dlja svarki nikelja. Avtoreferat dissertacii doktora tehniceskijh nauk. Perm', 1998. 38 p.

5. Ignatov M.N. Fiziko-himicheskie osnovy poluchenija i primenenija karbidosoderzhashhij materialov dlja svarki nikelja. Dissertacii doktora tehniceskijh nauk. Perm', 1998. 340 p.

6. Iljushin A.A. Plastichnost'. – M.: GITTL. 1963,- 271 s.

7. K optimizacii frakcionnogo sostava svarochnyh fljusov / M.N. Ignatov, S.A. Kazancev, S.G. Ivanov i dr. // Deformirovanie i razrushenie strukturno-neodnorodnyh materialov. – Sverdlovsk: UPI, 1992. pp. 130-134.

8. Midlman S. Techenie polimerov. M.: Mir, 1971. 200 p.

9. Fadeeva V.S. Formuemost' plasticheskijh dispersnyh mass. M. Gosstrojizdat, 1961. 129 p.

10. Chang Dej Han. Reologija v processah pererabotki polimerov / Per, s angl.. pod red. A.S. Fridmana. M.: IL, 1965. 357.

Рецензенты:

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, зам. директора, Западно-Уральский аттестационный центр, г. Пермь;

Кривоносова Е.А., д.т.н., профессор, ведущий специалист, Западно-Уральский аттестационный центр, г. Пермь,

Работа поступила в редакцию 08.05.2013.