

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОГО СТЕКЛА НА КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

А.Е. Марченко¹, И.О. Глот², Н.В. Скорина¹

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, РФ. 614018, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1

Исследована вязкость 6%-ых дисперсий Na-КМЦ в жидких Na- и K-стеклах в зависимости от температуры, а также вязкость чистых жидких Na-, K- и NaK-стеклол от избыточного давления и температуры. Каждая из них представляет собой консистентную среду реальных электродных обмазочных масс. С использованием полученных результатов математическими методами проверено функционирование модели совместного влияния избыточного давления и диссипативного разогрева на вязкость, профиль скоростей и стабильность напорного потока электродных обмазок в ступенчатом канале в условиях формирования покрытия путем экструзионного нанесения на стальные прутки. Хотя имеется два разных по мощности конкурирующие источники изменения сдвиговой вязкости обмазки (температура и давление), проведенными расчетами не выявлены ситуации с неустойчивыми (пульсирующими) режимами течения через внезапно сужающийся канал, которые могли бы стать причиной нестабильности потока обмазки, а, следовательно, разнотолщинности электродных покрытий. По крайней мере, в изученном диапазоне размеров капилляров $L/R_k < 10$ и давлений, при которых реально прессуются электроды. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, технология производства, разнотолщинность покрытия, реология, вязкоупругость обмазок

Разнотолщинность покрытия – опаснейший дефект покрытых электродов для дуговой сварки плавлением. Он ухудшает технологические характеристики процесса сварки, качество швов и понижает эксплуатационную надежность изделий, изготавливаемых с применением сварки.

Разнотолщинность покрытия возникает при изготовлении электродов путем экструзионного нанесения пастообразной обмазки, трансформированной в высокоградиентный неизотермический напорный поток в формующей головке электро-дообмазочного пресса, на стальные прутки слоем кольцеобразного сечения. Скорость процесса до 800 электродов с диаметром стержня от 2-х до 6 мм в минуту, каждый длиной от 250 до 450 мм. Формующее давление на массу P – до 80 МПа. Поверхность оболочки покрытия на выходе из фильеры может в результате диссипативного разогрева достигать 90...100 °С.

В силу пока не выясненных до конца причин напорный поток обмазки неожиданно переходит в режим эластической турбулентности. Взаимодействуя в таком состоянии с расположенным внутри потока упругим металлическим сердечником, обмазка покрывает его неравномерным слоем. При этом канал между сердечником и калибрующей втулкой преодолевается заполняющей обмазкой тем с меньшими энергетическими затратами, чем значительно он отличается от симметричной

кольцевой конфигурации, хотя суммарная площадь сечения канала остается неизменной.

Реологические характеристики электродных обмазочных масс, как и других экструзионно формируемых пастообразных материалов, в состоянии напорного потока определяются градиентами скорости сдвиговой $\dot{\gamma}$, продольной $\dot{\epsilon}$, и циркуляционной (вращательной) деформации $\dot{\omega}$.

Естественная конвергентная зона, непосредственно примыкающая к плоскому входу калибрующего канала в головке электродообмазочного пресса или капиллярного вискозиметра, формируется путем взаимной конкуренции сдвиговой и продольной деформации [1]. Она приобретает суживающийся профиль, минимизирующий энергетические затраты на преодоление потоком сопротивления сдвиговому (с вязкостью η) и продольному течению (с вязкостью λ).

Значение эффективной сдвиговой вязкости в этом состоянии зависит, прежде всего, от степени разрушения ее коагуляционной структуры. Чем выше напряжение или скорость сдвига, тем больше разрушается структура и ниже вязкость обмазки. Влияние температуры и избыточного давления в канале учитывается поправкой на энергию активации вязкого течения a , и, соответственно, на пьезоэффекты, коэффициент β . Совместное влияние температуры T и избыточного давления P на эффективную сдвиговую вязкость

Марченко А.Е. – <https://orcid.org/0000-0003-2987-8928>, Глот И.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2842-7511>,

Скорина Н.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7339-7825>

© А.Е. Марченко, И.О. Глот, Н.В. Скорина, 2021

неньютоновских полимерных жидкостей оценивается по формуле [2]:

$$\eta = \eta_0 e^{-\alpha \Delta T} \eta_0 e^{\beta \Delta P}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что значение вязкости с увеличением температуры понижается, а с повышением давления возрастает.

По нашим данным, вязкость жидкостекольных суспензий КМЦ и жидких стекол, на основе которых они составлены, понижается с повышением и температуры, и давления, последнее – согласно нашим данным, по крайней мере, в пределах, не превышающих значений, при которых осуществляется опрессовка электродов. При более высоких давлениях вязкость жидких стекол, как многих других жидкостей, повышается [3].

Известно, что эффективная вязкость подавляющего большинства суспензий однозначно пропорциональна вязкости дисперсной среды, а их энергии активации и барические коэффициенты вязкости одинаковы, даже когда вязкость первых превышает вязкость вторых в сотни и тысячи раз [4]. В связи с этим мы использовали жидкие стекла и их 6%-ые дисперсии Na-КМЦ как реологические модели электродных обмазочных масс при оценке влияния на них нагрева и избыточного давления.

В настоящей статье изложены результаты проведенных нами исследований совместной роли эффективной, температурной и барической вязкостей в качестве возможного источника реологической нестабильности обмазок в условиях сдвиговой деформации.

Влияние температуры, напряжения и скорости деформации на сдвиговую вязкость жидкостекольных суспензий Na-КМЦ.

На рис. 1 сопоставляются политермы вязкости жидкостекольных суспензий Na-КМЦ, полученных с применением ротационного вискозиметра Реотест II.

Видно, что η жидкостекольных дисперсий КМЦ в диапазоне температур, до которых самопроизвольно разогревается обмазка в процессе нанесения на электродные прутки, является экспоненциальной функцией температуры $\eta(T) = \eta_0 e^{\alpha(\dot{\gamma}, \tau)/RT}$ и одновременно скоростью $\dot{\gamma}$ и напряжения сдвига τ . На рис. 1, а, б значения $\dot{\gamma}$ (кривые 1 и 2) составляют 1 и 100 с⁻¹, соответственно.

На позиции «в» они обозначены номинальными значениями $\dot{\gamma}$ в пределах от 0,8 до 175 с⁻¹, расположены вдоль политерм вязкости. Как видим, по мере повышения температуры вязкость суспензий действительно понижается, причем тем в большей степени, чем выше $\dot{\gamma}$ и τ , а также чувствительнее структура тестируемого материала к тепловому и механическому разрушению. В режимах течения $\dot{\gamma} = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$ калиевые модификации стекол и суспензий из Na-КМЦ на их основе характеризуются большей энергией активации, чем натриевые, что, согласно с [5], можно представить как

$$\alpha_\tau > \dot{\gamma}, \quad \frac{\alpha_\tau}{\alpha_{\dot{\gamma}}} = 1 - \dot{\gamma} \left(\frac{\eta}{\tau} \right)_T \quad (2)$$

$$\alpha_\tau = \frac{d \ln \eta}{d(T^{-1})} \text{ при } \tau = \text{const};$$

$$\alpha_{\dot{\gamma}} = \frac{d \ln \eta}{d(T^{-1})} \text{ при } \dot{\gamma} = \text{const}. \quad (3)$$

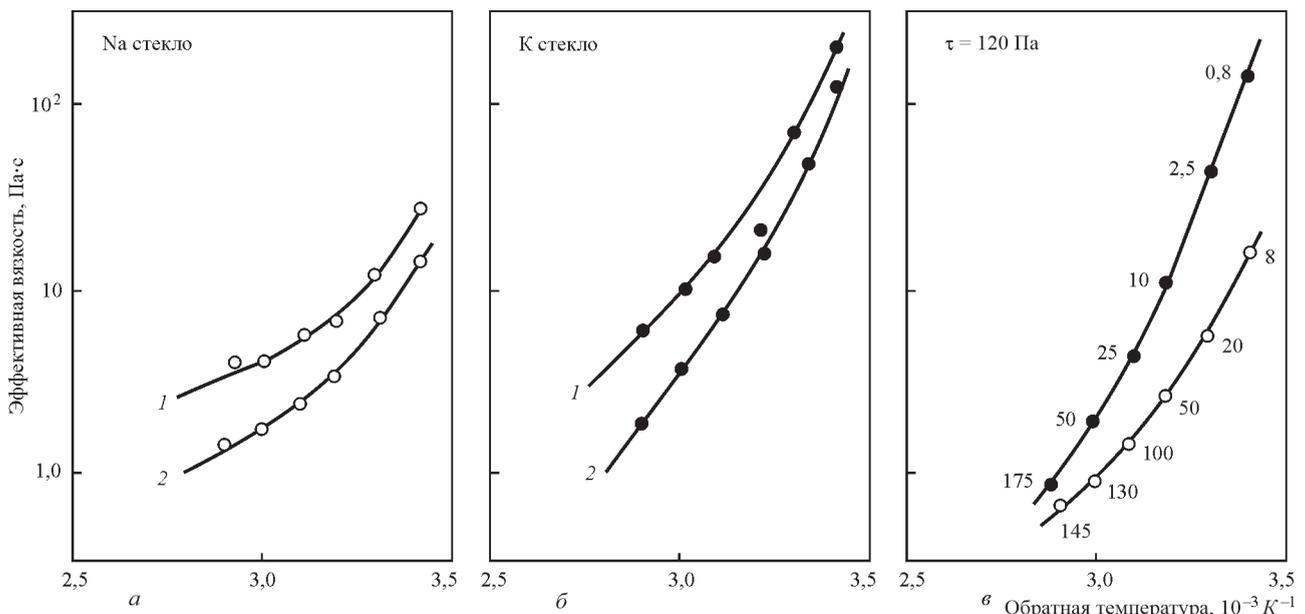


Рис. 1. Политермы вязкости 6%-ых дисперсий КМЦ марки 72/470 в жидком Na- и К-стекле с М = 2,9. Режим течения: $\dot{\gamma} = \text{const}$ (а, б) и $\tau = \text{const}$ (в). Остальные обозначения см. в тексте

Влияние избыточного давления на вязкость жидкого стекла. Влияние избыточного давления на вязкость жидких Na-, K- и комбинированных NaK-жидких стекол показано на рис. 2.

Как следует из приведенных данных, характер барических изменений вязкости жидких стекол, в принципе, можно представить степенной функцией $\eta(P) = \eta_0(1-P)^2$. В зависимости от состава и концентрации жидкого стекла ее график принимает в пределах использованного нами диапазона давлений вид либо полной параболы, либо левой или правой ее ветви. У низковязких жидких стекол парабола вырождается в прямую.

У жидких стекол, которые в большей или меньшей степени отреагировали на повышение давления, графики $\eta(P)$ имеют экстремальный, а не монотонно нарастающий вид, как у полимерных объектов. Наибольшее же понижение вязкости по существу приходится на давления, которые обычно не рекомендуется превышать при опрессовке электродов.

Параболическая форма $\eta = f(P)$ выявлена у жидких 2,9NaK- и 2,9Na-стекол с вязкостью 1250 мПа·с. У первого стекла ярче выражены минимум вязкости и левая асимметрия параболы, у второго – левая асимметрия параболы при меньшем минимуме вязкости.

С понижением вязкости сопоставляемых стекол до 570...500 мПа·с экстремальность кривых $\eta = f(P)$ существенно уменьшилась, но форма асимметрии осталась прежней. При понижении вязкости стекол до 100 мПа·с экстремальность и

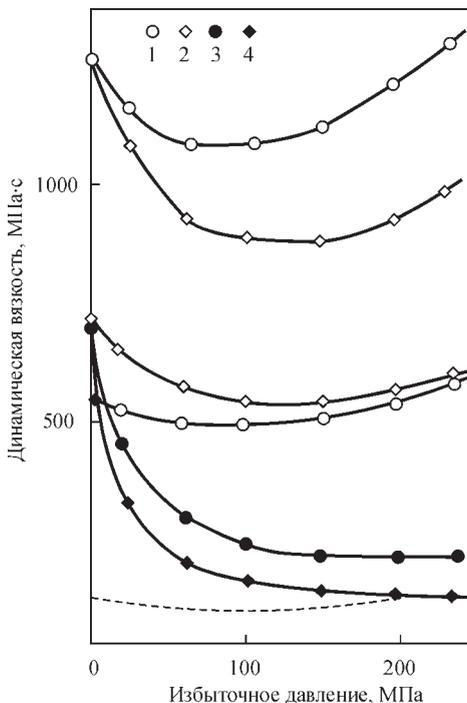


Рис. 2. Влияние избыточного давления на вязкость Na (1), NaK (2) и K (3) жидких стекол с модулем 2,9, а также NaK (4) жидкого стекла с $M = 3,4$; исходная вязкость стекол 500, 700 и 1250 мПа·с [3]

ассиметрия кривых $\eta = f(P)$ полностью вырождаются (на рис. 2 они отображены пунктирной прямой).

С технологической точки зрения наиболее благоприятна форма кривых $\eta = f(P)$, которая выявлена у калиевых и натриево-калиевых жидких стекол со значениями модуля 3,0 и 3,3, соответственно, поскольку в них нет опасной с технологической точки зрения восходящей параболической ветви.

Поскольку барическая вязкость жидких стекол измерялась в наших опытах вискозиметром Гепплера, полученные результаты не могут быть преобразованы по τ и $\dot{\gamma}$. Принимая во внимание, что ход барической зависимости $\eta(P)$ в принципе совпадает с температурным изменением вязкости $\eta(T)$, барические коэффициенты вязкости по аналогии с активационными можно представить в виде [5]:

$$\beta_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\eta}{P} \right)_{\dot{\gamma}, T} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\tau}{P} \right)_{\dot{\gamma}, T}, \quad (4)$$

а их соотношение в виде

$$\beta_{\tau} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \frac{\dot{\gamma}}{\tau} \beta_{\dot{\gamma}} = \frac{d \ln \dot{\gamma}}{d \ln \tau} \beta_{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

причем $\beta_{\tau} \geq \beta_{\dot{\gamma}}$, поскольку $\frac{d \ln \dot{\gamma}}{d \ln \tau} \geq 1$.

Чем выше температура, скорость и напряжения сдвига, тем меньше значения пьезокоэффициентов вязкости [5].

Отметим, что для идентификации условий, при которых получены значения вязкости P_0 и др. реологических характеристик, наряду с consistentными переменными τ и $\dot{\gamma}$, используют режимные символы напорно-расходных характеристик Q и P .

Уменьшение вязкости под влиянием избыточного давления и температуры вероятнее всего

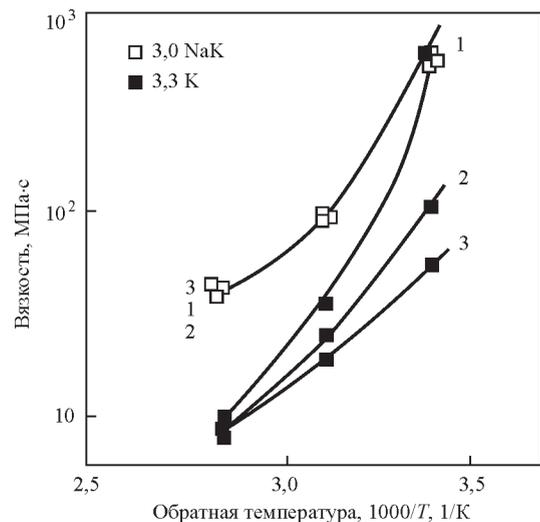


Рис. 3. Совместное влияние температуры и давления на вязкость K ($M = 3,3$) и NaK ($M = 3,0$) жидкого стекла с вязкостью 700 мПа·с. 1, 2, 3 – атмосферное и избыточное давление 10 и 20 МПа [3]

вызывается разрушением относительно слабых структурных связей в жидком стекле. Причем именно тех связей, которые образованы структурными элементами кремнийкислородных анионов (ККА), а не растворителя.

Действительно, влиянию давления в наибольшей мере подвержена вязкость калиевых и высокомодульных натриевокалиевых жидких стекол. Согласно представлениям о полиэлектролитической природе водных растворов щелочных силикатов структура именно таких жидких стекол, как правило, образуется слабыми, хаотичными, синергетическими связями.

Сами же структуры относятся к кластерному типу, чем и предопределяется их низкая стойкость против механического, активационного и барического разрушения [6, 7].

По влиянию на структуру объектов сопоставляемые виды воздействия можно считать практически равноценными друг другу. Это согласуется с результатами экспериментальной оценки влияния давления и температуры на вязкость, которые представлены на рис. 3 и 4.

С другой стороны, это согласуется с прочностью структурных связей Q^n_i которые выявлены в структуре ККА жидких К-, а также высокомодульных NaK-стекол методом ЯМР-спектроскопии. Суммарная доля эластичных связей ($Q^2 + Q^3$) преобладает в структуре ККА калиевого $M = 3,65$ (76,5 %) и комбинированных NaK $M = 3,15$ жидких стекол (78,5 %). Минимальная доля наиболее жестких силоксановых связей Q^4 обнаруживается в структу-

ре ККА комбинированных жидких NaK (11,5 %), промежуточная – у LiNa (22,5 %), а максимальная у LiK модификаций (27,0 %), содержащих примерно 30 мол % сопутствующей составляющей. Как правило, эти же стекла демонстрировали и самый высокий синергетический подъем вязкости [8].

Совместное влияние давления и температуры на напорное течение электродных обмазок во внезапно сужающемся канале. Совместное воздействие на характер течения обмазочной массы двух факторов – избыточного давления и температуры, исследовалось с помощью математического моделирования. Анализировалось течение и теплообмен вязкой жидкости в цилиндрическом канале с внезапным сужением. Система уравнений движения и теплового баланса решалась численно методом конечных разностей [9]. Для оценки технологических свойств обмазочной массы использовалось соотношение

$$\eta(T, P) = \eta_0 \varphi(T) \psi(P), \quad (6)$$

где η_0 – вязкость при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Температурное понижение вязкости учитывалось коэффициентом

$$\varphi(T) = A \exp(B/T), \quad (7)$$

а барические изменения – степенным законом (квадратным трехчленом):

$$\psi(P) = \left[1 - 5,7 \left(\frac{P}{10^9} \right) + \left(\frac{P}{10^9} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; B – энергия активации вязкого течения.

Принятое реологическое соотношение (6) позволяет получать перепады давления в канале от 20 МПа при расходе 1 л/мин до 170 МПа при расходе 10 л/мин.

Область течения моделировалась сопряжением цилиндрического резервуара (расходного цилиндра) и капилляра с соотношением диаметров $D_R/d_k > 5$, при котором отсутствует стерический эффект, т.е. обеспечивается независимость характера течения в капилляре от течения в резервуаре. Размерность использованной расчетной сетки (15×15 в резервуаре и 8×6 в капилляре) выбрана из соображений сочетания приемлемой точности и экономичности вычислений. Расход обмазки принят равным 10 л/мин: в этом случае моделируются реальные условия истечения, при которых в капилляре реализуется участок как уменьшающейся, так и нарастающей вязкости жидкого стекла [3]. Серия численных экспериментов продемонстрировала роль каждого из указанных факторов (температуры и перепада давления) при формировании потока в капилляре. Расчеты показывают, что основная часть перепада давления в канале с внезапным сужением формируется в капилляре.

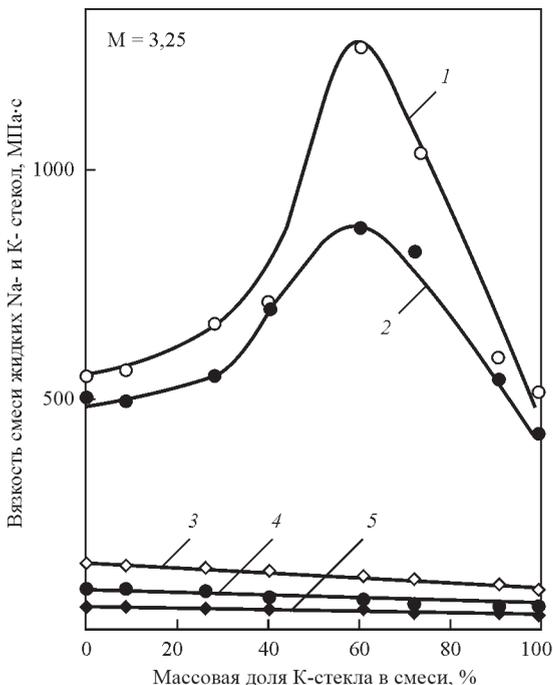


Рис. 4. Зависимость вязкости бинарных жидких Na- и K-стекол сразу после смешивания (1) и после термостатирования при температуре 20 (2), 40 (3), 60 (4) и 80 °C (5)

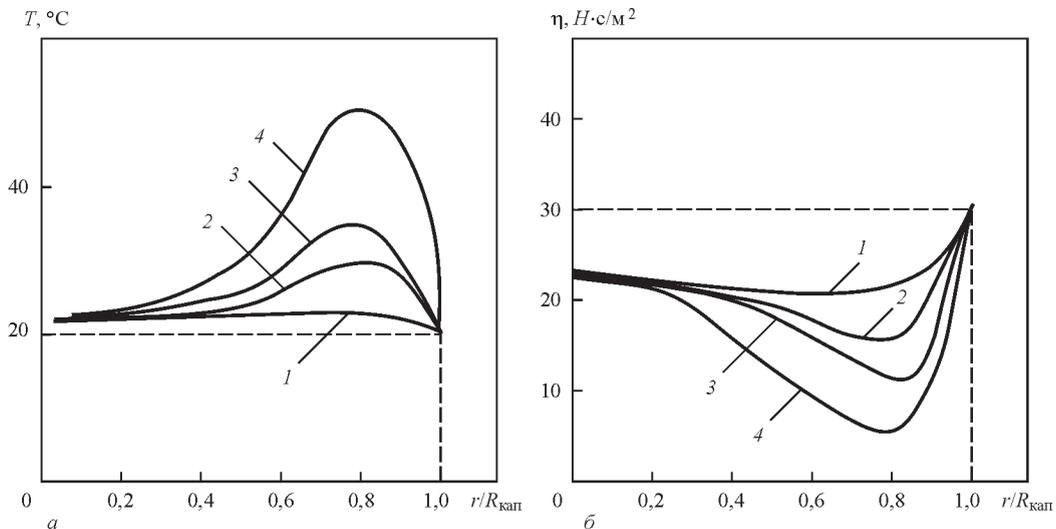


Рис. 5. Поле температуры (а) и вязкости (б) в капилляре. Расстояние от входа в капилляр $l/L_{\text{кап}}$: 0 (1), 2 (2), 4 (3) и 15 (4). $Q = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$

Зависимость вязкости от температуры повышает неоднородность полей вязкости и температуры как в радиальном, так и в продольном сечении капилляра. Картина распределения вязкости в капилляре при фиксированном расходе приведена на рис. 5. Разогрев пристеночного слоя вследствие диссипативного фактора сопровождается оттоком материала из центральной зоны. Однако ни изменение поля скоростей, ни температура не влияют существенно (не более 0,5 %) на радиальное распределение давления. Диссипативный разогрев материала возрастает с увеличением расхода (рис. 6). Однако при этом разогретый слой не распространяется в сердцевину потока. Выявленные закономерности согласуются с наблюдаемым в опыте «пробковым» режимом течения сквозь калибрующую втулку. Правда, в реальных условиях регистрируемая температура вязкостного разогрева в пристеночном слое вдвое превышает ее расчетное значение.

Иная картина получается при моделировании потока, вязкость которого зависит только от повышения

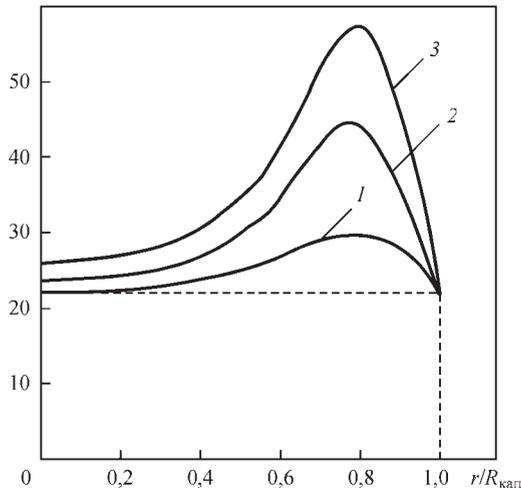


Рис. 6. Температура обложки на выходе из капилляра при секундном расходе: 1 – $1,7 \cdot 10^{-5}$; 2 – $5,0 \cdot 10^{-5}$; 3 – $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; $\eta = \eta_0 A \exp(B/T)$

ния давления. В этом случае, как следует из расчетов, вязкость изменяется только вдоль капилляра, а по его поперечному сечению остается без изменений.

Рис. 7 сопоставляет распределение давления вдоль канала для экструдированной массы с ньютоновскими свойствами (1), массы с барической (2) и термочувствительной вязкостью (3).

Здесь кривые 1 и 2 относятся соответственно к ньютоновской и барической вязкости. Видно, что в целом перепад давления у жидкости с барической вязкостью меньше, чем у ньютоновской. В зависимости от расхода это отклонение жидкости от ньютоновского поведения описывается экстремальным законом, причем максимальное понижение давления приходится на расход, примерно равный $8,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, ответственность за уменьшение перепада давления во внезапно сужающемся канале, в основном, ложится на диссипативный разогрев. Зависимость же вязкости от давления вызывает дополнительное (значительно меньшее по величине) понижение давления при заданном расходе (рис. 8).

Несмотря на наличие двух разных по мощности конкурирующих источников понижения вяз-

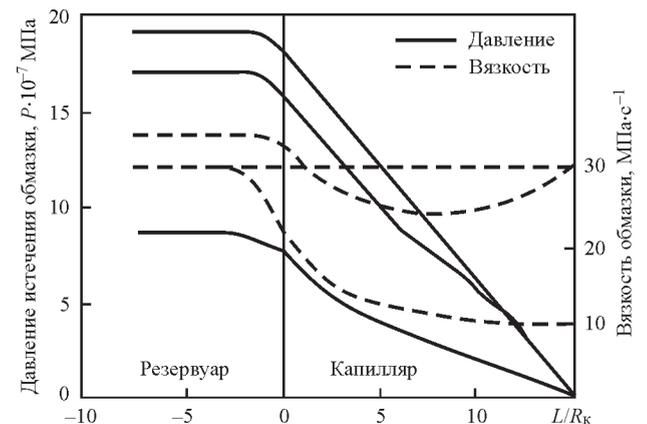


Рис. 7. Распределение давления и вязкости по длине капилляра: 1 – ньютоновская; 2 – барическая; 3 – термочувствительная обложка

Сопоставление теплофизических характеристик образцов для электродов АНО-4 и УОНИ 13/55 (влажность 11,5 мас. %, температура комнатная) [10]

Вид электродов	Жидкое стекло			λ , Вт/м·К	$\nu \cdot 10^7$, м ² /с	$\rho \cdot c \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³ ·К
	Модуль	Вязкость, МПа·с	Мас. %			
УОНИ 13/55	2,9	700	29,0	$\frac{1,30 \dots 1,35}{1,30}$	$\frac{4,60 \dots 5,30}{5,0}$	$\frac{2,50 \dots 2,80}{2,60}$
	3,2	50	19,5	$\frac{1,25 \dots 1,40}{1,35}$	$\frac{2,50 \dots 3,75}{3,20}$	$\frac{3,65 \dots 5,55}{4,20}$
АНО-4	2,9	700	29,0	$\frac{0,95 \dots 1,15}{1,05}$	$\frac{5,70 \dots 10,0}{7,80}$	$\frac{0,95 \dots 1,80}{1,30}$
	3,2	50	18,5	$\frac{1,20 \dots 1,25}{1,18}$	$\frac{4,65 \dots 11,5}{7,5}$	$\frac{1,05 \dots 2,35}{1,70}$

Примечание. В числителе приводятся минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние из трех определений.

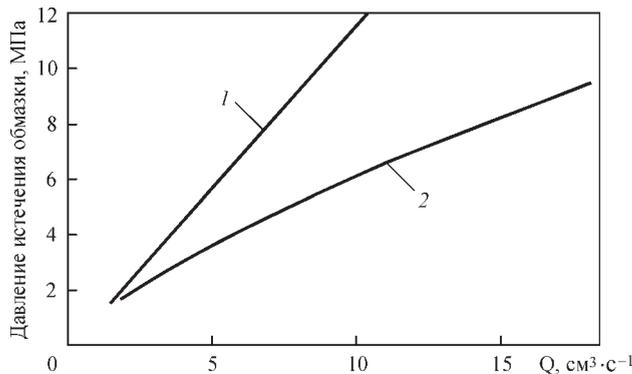


Рис. 8. Расходно-напорная характеристика обмазочной массы ньютоновского (1) и термочувствительного типа (2): $\eta = \eta_0 = \text{const}$; $2 - \eta = \eta_0 A \exp(B/T)$; $\eta_0 = 30 \text{ н·с/м}^2$; $A = 0,52$; $B = 65$

кости экструдированного материала в виде температуры и давления расчеты не выявили, по крайней мере, в диапазоне $L/R_k < 10$, ситуаций, при которых возникли бы неустойчивые (пульсирующие) режимы течения через внезапно сужающийся канал, способные спровоцировать разнотолщинность покрытия при опрессовке электродов. При больших значениях L/R_k такие ситуации могут стать вполне ожидаемы вследствие антибатного изменения, с одной стороны, эффективной и температурной, а с другой, – барической вязкости обмазки.

Экспериментальным путем установлено, что на вязкостный нагрев массы в капилляре влияет вид обмазки, химический состав, вязкость жидкого стекла, доля щелочного гидросиликата, вносимого в обмазку стеклом, и зерновой состав наполнителя. В известной мере это может быть следствием совместного влияния вещественного состава покрытия и характеристик жидкого стекла на теплофизические характеристики обмазочных масс. Как следует из данных, приведенных в таблице, при почти одинаковой теплопроводности ν , температуропроводность ν обмазки УОНИ 13/55 ниже, а объемная теплоемкость $\rho \cdot c$, выше, чем у обмазки АНО-4 [10].

Важно также, что обмазка УОНИ 13/55, особенно изготовленная на высокомодульном низковязком жидком стекле, обладает высокой структурированностью. На разрушение ее коагуляционной структуры расходуется какая-то часть энергии, в результате чего ее вязкостный разогрев

ослабляется. Восстановление структуры происходит за пределами капилляра и на тепловом балансе в капилляре сказаться не может.

Выводы

1. По результатам проведенных реологических исследований жидкостекольных дисперсий Na-КМЦ и чистых Na- и К- и NaK жидких стекол, представляющих собой консистентную среду реальных обмазочных масс, математическими методами моделировали изменение их структурной, активационной и барической вязкости в зависимости от скорости деформации, температуры и избыточного давления. Значениями последних варьировали в пределах, характерных для реальных условий опрессовки электродов.

2. Несмотря на наличие двух конкурирующих источников изменения сдвиговой вязкости обмазки (температуры и давления) расчеты не выявили, по крайней мере, в изученном диапазоне $L/R_k < 10$ и давлений, при которых реально прессируются электроды, ситуаций с неустойчивыми (пульсирующими) режимами течения сквозь внезапно сужающийся канал. При больших значениях L/R_k и давлений такие ситуации вполне возможны вследствие антибатного изменения температурной и барической вязкости некоторых видов жидких стекол и изготовленных на них обмазок: первая прекращает понижаться, а вторая, после достижения минимума, начинает возрастать при $L/R_k > 10$ и $P > 100$ МПа.

3. С технологической точки зрения калиевые и NaK жидкие стекла, особенно их высокомодульные модификации, заслуживают предпочтения. Они обеспечивают консистенции обмазок, мало склонные к появлению нестабильностей в состоянии напорного потока, поскольку не выявляют опасной восходящей ветви параболической зависимости вязкости от избыточного давления.

Список литературы

1. Cogswell F.N. (1972) Converging flow of polymer melts in extrusion dies. *Polym. Eng. And Sci.*, 12, 2, 64–73.
2. Kamal M.R., Nuyn H. (1980) Capillary viscometry a complete analysis including pressure and viscous heating effect. *Ibid*, 20, 2, 109–119.
3. Марченко А.Е., Скорина Н.В., Сидлин З.А., Костюченко В.П. (1992) *Исследование вязкости жидких стекол при*

давления опрессовки электродов. Новые сварочные и наплавочные материалы и их применение в промышленности: Материалы науч.-техн. семинара, посвященного 100-летию со дня рождения К.В. Петраня (г. С.-Петербург, 19–20 мая 1992 г.). С.-Петербург, сс. 43–49.

4. Ходаков Г.С. (2003) Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*, XLVII, 2, 33–44.
5. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. (1977) *Реология полимеров*. Москва, Химия.
6. Айлер Р.К. (1982) *Химия кремнезема* (в 2 ч.) Пер. с англ. Л.Т. Журавлева. Прянишников В.П. (ред.). Москва, Мир. Ч. I.
7. Корнеев В.И., Данилов В.В. (1996) *Жидкое и растворимое стекло*. С.-Пб, Стройиздат.
8. Марченко А.Е., Скорина Н.В., Киселев М.О., Трачевский В.В. (2017) Исследование структуры жидких стекол для сварочных электродов методом ядерной магнитной спектроскопии. *Автоматическая сварка*, 1, 49–54.
9. Янков В.И., Глот И.О., Труфанова Н.М., Шакиров Н.В. (2010) *Течение полимеров в отверстиях фильер. Теория, расчет, практика*. Москва-Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований.
10. Марченко А.Е. (2015) О тепловой обстановке, создаваемой вязкостным разогревом электродной обмазочной массы, в зоне формирования напорного потока. *Сварочные материалы-2015* (Петраньевские чтения). *Сб. докладов международной научно-технической конференции (15–17 окт. 2015 г., Санкт-Петербург)*. С.-Пб, сс. 65–68.
2. Kamal, M.R., Nuyn, H. (1980) Capillary viscometry a complete analysis including pressure and viscous heating effect. *Ibid.*, 20(2), 109–119.
3. Marchenko, A.E., Skorina, N.V., Sidlin, Z.A., Kostyuchenko, V.P. (1992) *Examination of viscosity of liquid glasses under pressure of electrode crimping*. In: *Proc. of Sci.-Tech. Seminar dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of K.V. Petran on New Welding and Surfacing Materials and their Application in Industry* (St.-Petersburg, 19-20 May, 1992). St.-Petersburg, 43–49 [in Russian].
4. Khodakov, G.S. (2003) Rheology of suspensions. Theory of phase flow and its experimental substantiation. *Ros. Khim. Zhurnal*, XLVII, 2, 33–44 [in Russian].
5. Vinogradov, G.V., Malkin, A.Ya. (1977) *Rheology of polymers*. Moscow, Khimiya [in Russian].
6. Ayler R.K. (1982) *Chemistry of silica*. In: 2 Pts, Pt.1. Ed. by V.P. Pryanishnikov. Moscow, Mir [in Russian].
7. Korneev, V.I., Danilov, V.V. (1996) *Liquid and soluble glass*. St.-Petersburg, Strojizdat [in Russian].
8. Marchenko, A.E., Skorina, N.V., Kiselev, M.O., Trachevsky, V.V. (2017) Nuclear magnetic spectroscopy study of the structure of liquid glasses for welding electrodes. *The Paton Welding J.*, 1, 41-45.
9. Yankov, V.I., Glot, I.O., Trufanova, N.M., Shakirov, N.V. (2010) *Flow of polymers in die holes. Theory, calculation, practice*. Moscow, Izhevsk, ICI [in Russian].
10. Marchenko, A.E. (2015) On thermal environment created by viscous heating of electrode paste in the zone of formation of pressure flow. *Welding materials - 2015* (Petran lectures). In: *Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. (St.-Petersburg, 15-17 October, 2015)*. St.-Petersburg, 65–68.

References

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК РІДКОГО СКЛА НА ЯКІСТЬ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

А.Ю. Марченко¹, І.О. Глот², М.В. Скорина¹

¹ЧЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут механіки суцільних середовищ Уральського відділення РАН, РФ, 614018, м. Перм, вул. Академіка Корольова, 1

Досліджена в'язкість 6%-их дисперсій Na-КМЦ в рідких Na- та K-стеклах в залежності від температури, а також в'язкість чистих рідких Na-, K- та NaK –стекло від зовнішнього тиску і температури, що являють собою консистентне середовище реальних обмазувальних мас. З використанням отриманих результатів математичними методами перевірено функціонування моделі сумісного впливу надмірного тиску і дисипативного розігрівання на в'язкість, профіль швидкостей та стабільності напірного потоку електродних обмазок в ступінчатому каналі за умовами формування електродного покриття методом екструзійного нанесення на сталеві прути. Хоча діють два різних за потужністю конкуруючі джерела зміни зсувної в'язкості обмазки (температура і тиск), проведеними розрахунками не були виявлені ситуації з нестійкими (пульсуючими) режимами її течії через канал, що раптово звужується, які могли б спровокувати нестійкості потоку обмазки, а отже і різновисинності покриття. Принаймні, в межах дослідженого діапазону розмірів каплярів $L/R_k < 10$ і значень тиску, за якими реально виготовляються електроди. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: дугове зварювання, покриті електроди, технологія виробництва, різновисинність покриття, реологія, в'язкопружність електродних обмазок

INFLUENCE OF LIQUID GLASS CHARACTERISTICS ON QUALITY OF COATING FORMATION OF WELDING ELECTRODES

A.E. Marchenko¹, I.O. Glot², M.V. Skoryna¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, 1, Academician Korolyov Str., 614018, Perm, Russia

The viscosity of 6% dispersions of Na-CMC in liquid Na- and K-glasses depending on temperature, as well as viscosity of pure liquid Na, K- and NaK-glasses depending on excess pressure and temperature was studied. Each of them represents a consistent medium of real electrode coating masses. Using the obtained results, by mathematical methods the functioning of the model of the joint effect of overpressure and dissipative heating on viscosity, velocity profile and stability of pressure flow of electrode coatings in the step channel under the conditions of coating formation by extrusion deposition on steel bars was verified. Although two competing sources of change in shear viscosity of the coating mass (temperature and pressure) are available, the calculations did not reveal situations with unstable (pulsating) flow modes through a suddenly narrowing channel, which could cause instability of the coating mass flow, and therefore electrode coatings with a thickness variation. At least, they were revealed in the studied range of capillary $L/R_k < 10$ sizes and pressures, at which the electrodes are actually pressed. 10 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: arc welding, coated electrodes, production technology, coating thickness variation, rheology, viscoelasticity of coating masses

Поступила в редакцію 22.03.2021