

## РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ КАК СЛЕДСТВИЕ ЭЛАСТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ОБМАЗОЧНЫХ МАСС В СОСТОЯНИИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПОРНОГО ПОТОКА

А. Е. МАРЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Обобщены и проанализированы результаты выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона исследований технологических свойств обмазочных масс, ответственных за появление разнотолщинности электродных покрытий. Исследования проведены с применением капиллярного вискозиметра постоянных расходов – реометра с электромеханическим приводом, в котором можно воспроизвести условия экструзионного нанесения обмазок на электродные прутки, характерные для промышленных электрообмазочных прессов. Так, удельное давление на обмазку в состоянии стационарного течения достигает 60-75 МПа, средний градиент скорости сдвига ступенчато регулируется в пределах от 1,0 до  $5,0 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , а для отдельных видов обмазки — до  $65 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Исследовали обмазки для рутиловых, низководородных и целлюлозных электродов, отличающиеся широким диапазоном показателей консистенции. Наряду со сдвиговой и продольной вязкостью оценивали диапазон изменения величины их модуля сдвиговой упругости, периода релаксации, критерия эластической турбулентности Рейнольдса, упругого потенциала и обратимой (упругой) деформации. Полученные результаты проанализированы с позиций существующей феноменологической теории эластической турбулентности полимерных расплавов и растворов высокомолекулярных соединений для решения технологических проблем их экструзионной переработки. Проанализированы варианты эластической турбулентности, выявленные в капиллярной и предкапиллярной зоне. Показана качественная связь этого явления с появлением и характером проявления разнотолщинности покрытия при реальном экструзионном нанесении обмазки на электродные прутки. Библиогр. 24, табл. 4, рис. 9.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, покрытые электроды, разнотолщинность покрытий, обмазочные массы, вязкость, модуль упругости, эластическая турбулентность

**Введение.** Из многих показателей ГОСТ 9466–75, по которым заказчик в первую очередь оценивает качество изготовления электродов, одним из самых важных является соосность оболочки покрытия и стержня [1, 2]. Разнотолщинность покрытия препятствует осуществлению нормального процесса сварки, а также приводит к ухудшению качества и механических свойств сварных швов. Уже при предельно допускаемой стандартом, т. е. не превышающей 5 % диаметра стержня, а тем более при сверхнормативной разнотолщинности покрытия на торце плавящегося электрода образуется односторонний «козырек», из-за чего нарушается газовая и шлаковая защита расплавленного металла от воздуха при сварке, а также формирование металла шва. Это приводит к неблагоприятным изменениям химического состава, ухудшению механических свойств, образованию пор и других дефектов шва [3–5].

Из-за множества факторов, под влиянием которых, как считают, возникает разнотолщинность покрытия (вид, доля и зерновой состав составляющих, технологические характеристики обмазок, качество стержней, состояние оборудования, ква-

лификация и уровень исполнительской дисциплины персонала, изготавливающего электроды [6]) на протяжении многих лет не удавалось выяснить истинные причины и закономерности ее возникновения. И это ограничивало возможности надежного прогнозирования качества электродов по этому показателю.

Обмазка наносится на стальные прутки путем экструзии. Так следует называть этот процесс, поскольку формоизменению с целью превращения обмазки в концентричную кольцевую оболочку вокруг стержня предшествует ее всестороннее сжатие в головке электрообмазочного пресса. Это ключевая операция в технологии производства сварочных электродов, в пределах которой, собственно, и возникает разнотолщинность покрытия.

Опыт, приобретенный в других технологических процессах, экструзионным методом перерабатывающих пастообразные, в том числе и наполненные материалы, по консистенции подобные электродным обмазочным массам, показывает, что нарушение их стабильного и равномерного вытока из формирующего инструмента определяется следующими основными причинами [7]:

- ♦ проскальзыванием потока у стенок формирующего инструмента;
- ♦ разрушением упругих жидкостей под действием огромных напряжений;
- ♦ упругой гидродинамической неустойчивостью, сопровождающейся возникновением нарастающих возмущений (ее называют эластической турбулентностью);
- ♦ структурной неустойчивостью, обусловленной аномалией вязкости (проявляющейся, в частности, в виде ее понижения под влиянием увеличения градиента скорости и температуры).

Исследования реологических свойств электродных обмазочных масс, в течение ряда лет выполнявшиеся в ИЭС им Е. О. Патона, показывают, что главной причиной появления разнотолщинности покрытия следует считать их эластическую турбулентность. Остальные могут усиливать ее, а разрушение потока под влиянием огромных напряжений может встретиться крайне редко.

Упругая гидродинамическая неустойчивость возникает в обмазочных массах, сочетающих в себе вязкие и упругие свойства, соотношение между которыми изменяется в ходе их экструзионной переработки. Избыток упругости может вызвать регулярные (колебательные) или иррегулярные возмущения в потоке. Вязкость выступает в качестве демпфирующей составляющей реологической системы, т. е. подавляет упругую составляющую. При равенстве вязкости и модуля упругости наступает потеря устойчивого течения обмазочной массы. Местом, в котором это происходит, может стать поверхность калибрующей втулки и других участков формирующего инструмента. Время, когда она наступит, зависит от того, когда в результате температурного и/или структурного разрушения коагуляционной структуры вязкость обмазки понижается настолько, что теряет способность погашать пульсации потока, провоцируемые упругими напряжениями. Чем выше упругость по сравнению с вязкостью, тем в большей мере иррегулярное проявление возмущений будет отличаться от регулярной формы. Особенно, если в системе имеется не один, а несколько центров таких возмущений. Цель работы: показать взаимосвязь пластической турбулентности электродных обмазочных масс и разнотолщинности покрытия электродов.

**Реологическая модель вязко-упругих материалов и математические формулы их описания.** Простейшую одномерную реологическую модель вязко-упругой жидкости, которую мы можем использовать при изучении свойств электродных обмазочных масс, предложил Максвелл [8]. Она представляется в виде пружины (упругое тело Гука), последовательно соединенной с

гидравлическим демпфером (вязкая жидкость Ньютона). Модель раскрывает причину появления и позволяет объяснить процесс релаксации напряжений в вязкоупругом материале при постоянной деформации или напряжении. Подвергнутая деформации, вызванной приложенным к ней постоянным усилием, вязко-упругая жидкость по модели Максвелла должна скачкообразно сформироваться на величину сжатия (растяжения) упругого элемента, а дальше продолжать деформироваться с постоянной скоростью, соответствующей приложенному усилию. Если же эту модель быстро сформировать на заданную величину  $\gamma$  и после фиксации ее на этом уровне наблюдать за изменением силы (или напряжения), пропорциональных заданной деформации, то они будут постепенно уменьшаться (релаксировать) во времени за счет смещения поршня демпфера. Математический закон, описывающий реологическое поведение такой модели имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta} + \frac{1}{G} \dot{\tau}, \quad (1)$$

а процесса релаксации напряжений при постоянной деформации:

$$\tau = \tau_0 e^{-(G/\eta)t}. \quad (2)$$

Поскольку,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tau = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(G/\eta)t} = 0$ , то при постоянной деформации напряжение  $\tau$  с течением времени экспоненциально стремится к нулю.

Отношение динамической вязкости  $\eta$  к модулю упругости  $G$  имеет размерность времени и называется периодом релаксации,  $\tau_1 = \theta$ . С учетом этого

$$t_1 = \frac{\eta}{G}; \quad \frac{\tau_1}{\tau_0} = e^{-(G/\eta)t} = e^{-1} \approx 0,37, \quad (3)$$

а  $\tau_1 = 0,37\tau_0$ .

Значит, за время  $\theta$  начальное напряжение уменьшается на 67 %.

Сопоставляя период релаксации  $\theta$  с продолжительностью  $t_h$  внешнего воздействия на материал, можно оценить, как он поведет себя при изменении скорости деформирования.

Чтобы оценить реологическое поведение обмазочной массы при ее напорном течении [9], прежде всего определяют  $\tau$ ,  $\eta$ . Затем, пользуясь формулами, предложенными и апробированными в технологии экструзионной переработки полимерных материалов, рассчитываются такие показатели, как  $G$ ,  $\theta$  и упругий потенциал  $W$ , которые в совокупности полностью и объективно характеризуют вязко-упругие показатели обмазок.

Имеется 3 метода вычленения падения давления на длине капилляра  $\Delta P$ , необходимого для вычисления  $\tau$  и  $\eta$ , из общего сопротивления измерительной ячейки в составе капилляра и предкапиллярной (заходной) зоны. Это — методы Куэтта, Бэгли и запорного диска.

В методе Куэтта, полагая, что сопротивление капилляра течению возрастает пропорционально его длине, для вычисления напряжения сдвига на стенке капилляра используют разницу давлений, зарегистрированных при использовании длинного и короткого капилляров одного и того же диаметра ( $\Delta P = P_{\text{дл}} - P_{\text{кор}}$ ).

В методе Бэгли [10] зависимость перепада давления от относительной длины канала  $L/R$  при фиксированной скорости сдвига тоже принимается линейной, а величина  $\Delta P_0$  находится путем экстраполяции зависимости  $\Delta P = f(L/R)$  к нулевому значению  $L/R$ . Экстраполяция той же зависимости на нулевое значение давления дает величину фиктивного удлинения канала  $n_B$ , эквивалентного по сопротивлению входным потерям давления. Его называют поправкой Бэгли.

Методы Куэтта и Бэгли не всегда могут быть использованы при реологическом тестировании электродных обмазочных масс, поскольку потери напора при их течении через капилляры не всегда пропорциональны их приведенной длине  $L/d_k$ .

С одной стороны, это вызвано накоплением упругих напряжений на начальных участках коротких капилляров, а с другой — чрезмерным диссипативным разогревом струи обмазки в пристенном слое при использовании капилляров слишком большой длины. И то и другое не дает возможности определить наклон прямой  $\Delta P = f(L/d_k)$  с точностью, необходимой для вычисления  $\tau$ . По этой причине, для определения  $P_0$ , мы пользовались запорным диском, а  $\Delta P$  находили как разность ( $P_L - P_0$ ) при  $L = 10d_k = 20R$ . Такая методика дала в нашем случае самую высокую точность результатов тестирования.

Вместе с тем, по примеру других авторов, мы использовали подходы Бэгли, чтобы раскрыть реологическую сущность поправки,  $n_B$ , а также выделить из нее упругую составляющую, необходимую для расчетов  $G$ .

Реологический смысл поправки Бэгли находится путем следующих математических преобразований.

Напряжение сдвига на стенке капилляра по методу Куэтта с учетом принятых нами обозначений (см. примечание к табл. 1) вычисляется по формуле

$$\tau = \frac{PR}{2L} = \frac{P}{2(L/R)} = \frac{P}{2n_C}. \quad (4)$$

С учетом поправки Бэгли выражение для расчета  $\tau$  из (4) преобразуется к виду

$$\tau = \frac{P}{2(n_C + n_B)}; \quad 2\tau(n_C + n_B) = P; \quad n_B = \frac{P - 2\tau n_C}{2\tau} = \frac{P}{2\tau} - n_C. \quad (5)$$

Когда  $L = 0$  (как в случае, когда сопротивление входа находят методом запорного диска),  $n_C = 0$ ,  $P = P_0$ ,  $n_B = P_0/2\tau$ . Следовательно, поправка Бэгли

представляет собой величину входных сопротивлений, нормированных по напряжению сдвига на стенке капилляра.

В таком виде поправка Бэгли использовалась как база для оценки величины естественного конвективного угла, который образуется в предкапиллярной зоне при экструзионной переработке вязко-упругих материалов [11–13].

Можно показать, что в этом смысле поправка  $n_B$  эквивалентна критерию эластической турбулентности Рейнольдса,  $Re_e$ , или, как назвал ее раньше Рейнер, — числу Деборы (имя древней прорицательницы) [14, 15].

В общем — это обратимая упругая деформация вязко-упругого материала  $\gamma$ , которую материал претерпевает, находясь под действием деформирующей нагрузки. Выше упоминалось, что ее оценивают как отношение периода релаксации к характерному времени,  $\theta/t_h$ . Для капиллярного вискозиметра  $t_h$  равно величине, обратной градиенту скорости сдвига [14, 15], и, следовательно,  $Re_e = \theta \dot{\gamma}$ .

Критерий Рейнольда преобразуется к этому же виду следующим образом

$$Re_e = \frac{\theta R}{UT^2} = \frac{\theta}{(UT^2/R)} = \frac{\theta}{\dot{\gamma} T^2} = \theta \dot{\gamma}. \quad (6)$$

С другой стороны, учитывая, что  $\theta = \eta/G$ ,  $G = \tau^2/P_0$ , уравнение (6) можно привести к выражению  $P_0/\tau$ , подтверждая таким образом, что входная поправка Бэгли представляет собой критерий эластической турбулентности Рейнольдса.

Если учесть, как это предложено в работе [16], что  $n_B$  в формуле (5) наряду с куэттовской поправкой содержит еще и упругую деформацию  $S_R$ , которая входит в формулу закона Гука  $\tau = GS_R$ , то  $n_B = n_C + (S_R/2) = n_C + (1/2G)\tau$ . Отсюда следует, что по величине  $\tau$  и  $P_0$ , найденных путем капиллярных измерений, можно рассчитать модуль упругости сдвига  $G$  электродных обмазочных масс.

Действительно, при  $n_C = 0$

$$G = \tau/2(n_B) = \tau^2/P_0. \quad (7)$$

По входным сопротивлениям вычисляется упругий потенциал  $W$  — отнесенная к секундному расходу упругая энергия, запасаемая обмазочной массой в процессе течения через капилляр:  $W = P_0/12$ . На выходе из капилляра она высвобождается в виде свободного упругого восстановления струи, которое сопровождается деформацией — увеличением ее диаметра в  $\beta$  раз и длины в  $\beta^2$  раз. Баланс накопленной и высвободившейся энергии описывается соотношением [8]

$$W = \frac{G}{2}(\beta^4 + 2\beta^2 - 3), \quad (8)$$

а величина деформации, вызванной разбуханием струи, — соотношением

$$\gamma = \sqrt{3(\beta^4 + 2\beta^2 - 3)}. \quad (9)$$

**Таблица 1.** Сводная таблица формул, использованных для вычисления реологических показателей обмазочных масс в состоянии напорного течения через капилляр вискозиметра

Показатель вязко упругого материала	Формула
Сдвиговая вязкость, МПа·с	$\eta = \tau / \dot{\gamma}$
Продольная вязкость, МПа·с	$\lambda = \frac{9(n_0 + 1)^2}{32\eta} \left( \frac{P_0}{\dot{\gamma}} \right)^2$
Модуль сдвиговой упругости, МПа	$G = \eta / \theta = P_0 / t^2$
Угол естественной конвергенции, град	$\text{tg } \alpha_0 = \sqrt{2\eta / \lambda}$
Характеристическое соотношение Максвелла. Безразмерное время релаксации	$n_B = \theta / t_h = \theta \dot{\gamma} = P_0 / 2\tau = \text{Re}_e$
Упругий потенциал, МПа	$W = \tau^2 / 6G = P_0 / 12$
Обратимая (упругая) деформация	$\gamma = \tau / G = \sqrt{3(\beta^4 + 2\beta^2 - 3)}$

*Примечание.*  $\tau$  — напряжение на стенке капилляра, МПа;  $\dot{\gamma}$  — средний градиент скорости сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;  $n_0$  — индекс течения, равен  $\lg \tau / \lg \dot{\gamma}$ ;  $P_0$  — потери напора в заходной зоне, МПа;  $G$  — модуль упругости сдвига, МПа;  $\theta$  — период релаксации, с;  $\alpha_0$  — угол естественной конвергенции, град;  $\gamma$  — обратимая упругая деформация струи;  $t_h$  — характеристическое время наблюдения, в капиллярной вискозиметрии  $t_h = 1 / \dot{\gamma}$ ;  $W$  — упругий потенциал, удельная упругая энергия, запасаемая обмазкой при течении через капилляр, в расчете на единицу ее объема (секундный расход,  $Q$ );  $\beta, \beta^2$  — степень расширения струи обмазки при выходе из капилляра по диаметру и длине, соответственно, отн. ед.

Для удобства использования полученные формулы сведены в табл. 1.

**Электродные обмазочные массы как пастообразные композиции, обладающие вязкоупругими свойствами.** Имеется достаточное количество публикаций, свидетельствующих в пользу того, что электродные обмазочные массы наряду с вязкостью действительно должны обладать упругими свойствами.

Так, автор работы [17] характеризует пластичность обмазочной массы такими реологическими коэффициентами, как упругость сдвига и вязкость, а кривую ее течения представляет в переменных «давление,  $P$  — секундный расход,  $Q$ ». От классической реограммы Бингама, описывающей пластично-вязкое тело, впоследствии названное его именем, она при низких расходах от-

личается мощным всплеском давления, который при  $Q_{\text{крит}} \approx 1 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  плавно переходит в прямую, слегка наклоненную к оси расходов. Причину появления максимума не были объяснены. Мы предположили, что это — результат релаксации накопленных упругих напряжений.

В диссертационной работе [18] описана методика определения упомянутых выше показателей упругости и вязкости электродных обмазочных масс. Для этого обмазку медленно продавливали плунжером сквозь секционированный по длине капилляр. Дважды (в момент остановки плунжера и после отключения при неподвижном плунжере крайней секции капилляра) регистрировали давление истечения и объем обмазки, вышедшей из капилляра под действием упругих сил. Вычисленные с использованием полученных данных показатели упругости сдвига и вязкости, приведены в табл. 2.

Наши исследования обмазочной массы АНО-4, запрессованной между двумя рифлеными пластинками, тоже проведенные в режимах течения ползучести, показали, что под влиянием сдвиговых напряжений, величиной порядка 0,01 МПа, она, как и другие виды концентрированных дисперсий частиц с кристаллической структурой, существенно упрочняется. При повторном нагружении начальная деформационная способность обмазки воспроизводится только после 4-х часового «отдыха», когда релаксируют напряжения, накопленные в результате упрочнения образцов [19].

Результаты испытания таких же по консистенции обмазок с помощью конического пластометра показали, что накопленные ими упругие напряжения понижаются (вслед за прекращением внедрения в них конуса) с периодом релаксации, равным 100...150 с [20]. На полную релаксацию упругих напряжений требуется время, значительно превышающее длительность испытания.

Таким образом, можно считать, что полученные показатели обмазочных масс, даже испытанные в свободном состоянии, содержат в себе значительную долю упругой составляющей.

В прессовой камере капиллярного пластометра ОБ 1435 [9] обмазки в ходе тестирования реологических свойств пребывают в условиях всестороннего сжатия, такого же по величине, как и в прессовой камере промышленного электрообмазочного агрегата. Приведенные на рис. 1 экструзионные кривые от-

**Таблица 2.** Технологические свойства обмазочных масс ЦМ-7 и УОНИ 13/55 в режиме напорного течения ползучести [18]

Жидкое стекло			Доза $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , %	$P$ , МПа	$G$ , МПа	$\eta \cdot 10^{-6}$ , МПа·с
Модуль	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Доза, масс. %				
Обмазка электродов ЦМ-7						
$\text{Na}_2\text{O}_2, 8\text{SiO}_2$	1450	23,0	-	88,0	0,300	6,1
			2	50,0	0,225	3,1
Обмазка электродов УОНИ-13/55						
$\text{Na}_2\text{O}_2, 8\text{SiO}_2$	1430	23,0	-	40,0	0,080	-
			2	34,0	0,030	5,0

ражают изменение давления в ходе выпрессовки обмазки из камеры пластометра через запорный диск 1 или капилляр 2. Видно, что в ходе капиллярного тестирования она проходит несколько стадий:

- ♦ стадия доведения обмазки до всестороннего сжатия в течение времени от начала движения штока до момента, когда давление достигает максимума ( $P_{max}$ );
- ♦ предстационарная (структурная) стадия, сопровождающаяся понижением давления (от  $P_{max}$  до  $P_c$ );
- ♦ установление давления стационарного (условно равновесного) капиллярного течения,  $P_c$ , по величине которого обычно вычисляют  $\tau$  и  $\theta$ ;
- ♦ сброс давления в момент безынерционной остановки штока, вызванный свободным упругим восстановлением струи, сопровождающимся достаточно быстрой релаксацией накопленных упругих напряжений ( $\Delta P_c = P_c - P_{ск}$ ).

На протяжении первой стадии исходная структура материала деформируется, а элементы ее ориентируются и уплотняются настолько, что в результате образуется так называемая структура с ограниченным объемом [21]. Если учесть, что это происходит в условиях почти нулевых скоростей деформаций, то на образование такой структуры тратится огромная энергия. Значительная ее часть аккумулируется в виде упругой составляющей. В условиях всестороннего сжатия материал становится упругим телом, не зависимо от того, был он перед этим твердым телом или жидкостью [14].

Причины следующего за максимумом спада напряжения кроются в нарастающем механическом и температурном разрушении структуры обмазки, сформировавшейся в ходе предыдущей стадии. Очаг разрушения структуры возникает перед входом в капилляр под влиянием градиента давления и вызванной ним асимметрии потенциала молекулярного взаимодействия между зернами наполнителя. Он облегчает перемещение зерен наполнителя по сдвиговому механизму [21]. С определенного момента деформационные процессы, ответственные за разрушение структуры, сосредотачиваются преимущественно в пределах образующейся естественной конвергентной зоны течения. Спусковым крючком такой энергетической перестройки структуры и перевода обмазок в напорное течение становится упругий потенциал, накопленный ею на протяжении первой (нарастающей) ветви предстационарного процесса. Разрушение структуры сопровождается изменением релаксационных свойств обмазки (уменьшается  $\theta$ ).

В ходе равновесного капиллярного течения скорости разрушения и восстановления структуры выравниваются по величине. Однако систе-

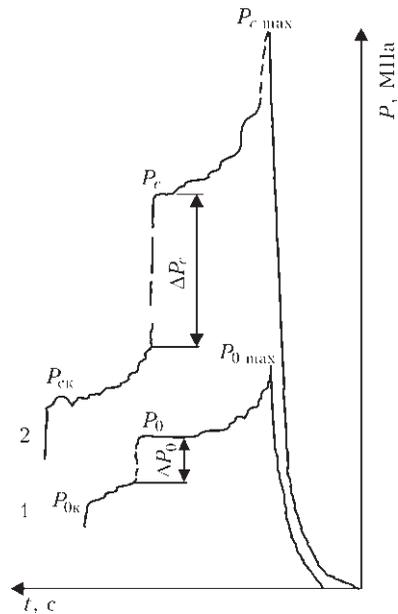


Рис. 1. Вид экструзионных кривых  $P = f(t)$  обмазочной массы АНО-4, полученных при ее тестировании капиллярным пластометром ОБ 1435. Секундный расход  $5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , диаметр капилляра 0,4 см, длина 0 (1) и 4 см (2)

ма сохраняет в себе значительно больший запас упругого потенциала, чем в рассмотренных выше испытаниях открытых образцов, и он «разряжается» только после остановки штока. Мгновенный сброс давления, как правило, сопровождается выходом из формующей головки какого-то количества обмазки.

Поскольку экструзия проходит в неизотермических условиях (изотермические при реальной скорости истечения обмазки, в принципе, не могут быть созданы), на величину сброса давления, наряду с консистенцией обмазки, несомненно, должен влиять вязкостный нагрев, которому обмазка подвергается, начиная со структурной ее фазы. Следует также учитывать, что жидкое стекло является пьезочувствительной жидкостью [22]. Понижение его вязкости, вызванное избыточным давлением, влияет на структуру обмазки аналогично вязкостному разогреву. При очень высокой степени сжатия их свойства могут под влиянием температуры и давления изменяться в противоположных направлениях. Таким образом, трудно предсказать, каким будет окончательный результат.

**Результаты экспериментальной оценки вязкоупругих характеристик обмазочных масс в состоянии напорного течения.** О величине запасенной упругой энергии можно судить по значению  $\Delta P_0$ , если используется запорный диск, как в случае определения входовых сопротивлений, или  $\Delta P_c$ , если используется капилляр. Результаты оценок сопоставляются по абсолютной шкале ( $\Delta P_0$  и  $\Delta P_c$ ), а также по соотношениям ( $\Delta P_0/P_0$  и  $\Delta P_c/P_c$ ),  $(P_0 - \Delta P_0)/(P_0)$  или  $(P_c - \Delta P_c)/(P_c)$ .

Таблица 3. Характеристика шихт, жидких стекол и обмазочных масс, использованных в работе

Обмазка	Индекс	$S_{уд}^1$ , см <sup>3</sup>	Показатели и доза жидкого стекла				$P_m$ , МПа
			Модуль	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , мПа·с	Доза, %	
АНО-4	A2	8300	2,9	1465	800	29,6	0,30
	A1					29,8	0,75
	A4					29,8	1,30
УОНИ-13/55 (СТ)	ГС-1	2250	2,9	1495	1000	25,0	0,15
	ГС-4	3900					0,13
	ГС-6	4900					0,28
УОНИ-13/55 (НТ)	ГС-1	2250	3,2	1334	50	22,0	0,45
	ГС-4	3900					0,30
	ГС-6	4900					0,80
ВСЦ-4	Ц	-	2,9*	1407	100	51,5	-

Примечание. Натриевое стекло, остальные стекла — натрово-калиевые.

Для оценки вязкоупругих показателей нами были использованы результаты тестирования обмазочных масс рутилового, низководородного и целлюлозного типа, которые были выполнены в разное время в ИЭС им Е. О. Патона с применением капиллярного пластометра ОБ-1435. Характеристика обмазок представлена в табл. 3. Консистенция обмазок регулировалась за счет изменения состава наполнителя, зернового его состава, а также характеристик жидкого стекла. Пластическая прочность обмазок изменялась при этом в пределах от 0,13 МПа (очень слабая консистенция) до 1,40 МПа (структурированная композиция).

Предварительной оценкой величины сброса давления  $\Delta P_0$  и  $\Delta P_c$  в момент остановки плунжера выявлено, что обмазки существенно отличаются между собой по упругим свойствам. Доля упругой составляющей в результатах их тестирования в зависимости от скорости течения и способа ее регулирования ( $Q = \text{const}$  или  $d_k = \text{const}$ ) изменялась пропорционально величине  $P_0$  и  $P_c$  в пределах от 0 до 60 %. На нее влияли многие сопутствующие факторы.

Например, заметный диссипативный разогрев струи особенно сильно проявлялся при испытаниях обмазок АНО-4, обладающих низкой теплопроводностью наполнителя, и обмазок УОНИ-13/55 (СТ), изготовленных на вязком стекле, которые существенно «разжижались» под влиянием даже умеренного вязкостного разогрева. И в том и другом случае влияние диссипативного фактора доминировало в режиме течения  $Q = \text{const}$ , из-за чего доля высвобождающейся упругой энергии завывшалась. Напротив, у обмазок УОНИ-13/55 (НТ), изготовленных на низковязких жидких стеклах, результаты вязкостного нагрева вуалировались расходом тепла на разрушение их коагуляционной структуры. В этом случае результаты испытаний получались заниженными.

В целом получена интересная информация о многих свойствах сравниваемых обмазоч-

ных масс, однако по ним нельзя однозначно судить об упругих характеристиках.

Результаты оценок вязких и упругих свойств обмазок, выполненных с использованием расчетных формул, приведенных в табл. 1, обобщены в табл. 4.

Величина градиентов скорости, а, следовательно, и напряжения сдвига, которые использовались в ходе исследований, ограничены пределами, в которых исследуемые обмазки могли экструдироваться сквозь насадки

используемых сечений (секундные расходы изменяли в пределах от 1 до 25,5 см<sup>3</sup>, а  $d_k$  — от 1 до 6 мм). С превышением определенной скорости сдвига некоторые обмазки запирали каналы, особенно малых диаметров. Сдвиговая (так же, как продольная вязкости) уменьшалась с увеличением скорости деформации, и это подтверждает тиксотропное разрушение обмазок, форсированное их вязкостным разогревом в той степени, в какой они ему подвержены. Продольная вязкость на два порядка больше сдвиговой, а соотношение между ними  $\lambda/\eta$  либо возрастает по мере увеличения скорости сдвига, в результате чего угол естественной конвергенции уменьшается [23], либо уменьшается, но при этом возрастает  $\alpha_0$ . Малая величина  $\alpha_0$  косвенно свидетельствует о том, что струя обмазки в предкапиллярной зоне преодолевает сопротивление материала с высокой упругостью. Модуль упругости в этих условиях тоже изменяется неоднозначно.

У всех обмазок АНО-4 его величина не зависит от их консистенции и от скорости сдвига.

Для обмазок УОНИ-13/55 (СТ) модуль упругости, изначально наименьший по величине у варианта ГС-1 с самым крупнозернистым наполнителем, существенно возрастает по мере увеличения скорости сдвига. Чем мелкозернистее наполнитель, тем выше модуль упругости этого типа обмазок при малых скоростях сдвига, и ниже — при высоких скоростях сдвига. Самую слабую реакцию на скорость деформации наблюдали у обмазки ГС-6 с наиболее ярко выраженной структурированностью. Аналогично влияет зерновой состав наполнителя и на модуль упругости обмазочных масс УОНИ-13/55 (НТ) с низковязким жидким стеклом. Однако величина их модуля упругости, изначально меньшая по величине, чем у обмазок СТ, слабее откликается на скорость деформации. А у обмазки со средней зернистостью наполнителя зафиксирован очень большой разброс результатов. Причина этого не выяснена.

У обмазки ВСЦ-4 модуль упругости уменьшается с увеличением градиента скорости сдвига.

В общем, следует отметить, что, несмотря на широкий диапазон изменения консистенции сравниваемых обмазочных масс, средняя величина их модуля упругости изменялась в достаточно узких пределах.

Осваивая методику оценки упругости обмазочных масс, мы не имели никакой информации, кроме данных В. И. Клементова, полученных в режиме течения ползучести, о фактической величине их модуля упругости. В связи с этим ожидаемый порядок величины этого показателя рассчитали следующим образом.

Как известно, одним из эффектов, сопровождающих свободное восстановление струи вязкоупругих композиций, является ее разбухание при выходе из капилляра (Баррус-эффект). В технологии переработки полимеров, характеризующихся ярко выраженными неньютоновскими свойствами, соотношение диаметров струи и фильеры может достигать четырехкратной величины. Введением в полимеры наполнителей наряду с удешевлением продукции достигается подавление этого нежелательного явления. Электродные обмазочные массы — тоже наполненные композиции с жидкостекольной матрицей, обладающей слабо выраженными неньютоновскими свойствами. По этой причине разбухание струи у таких композиций не должно бы иметь места. В пользу этого говорит хорошее совпадение диаметров

покрытия (струи, когда речь идет об экструдировании обмазки при капиллярном тестировании) и фильеры (капилляра).

На самом деле незначительное разбухание струи из обмазки все же имеет место. Как установлено в гидравлике и реологии на выходе из капилляра происходит перестройка профиля скоростей в струе, в результате чего, исходя из закона сохранения количества движения, ее диаметр должен уменьшиться, по крайней мере, на 13 %.

Другими словами, упругое разбухание струи обмазки как бы не выходит за пределы  $\beta = 0,13$ , компенсируя ее сужение, вызванное перестройкой профиля скоростей.

Если подставить  $\beta = 0,13$  в уравнение (9), получим, что вызванная разбуханием деформация составит  $\gamma = 18,5\%$ . С другой стороны, принимали во внимание, что  $\gamma$  и  $G$  связаны друг с другом соотношением  $\gamma = \tau G$  [8].

Обычно у обмазочных масс напряжение сдвига на стенке капилляра колеблется в пределах от 0,5 до 1,5 МПа. Исходя из этого, следует ожидать, что величина модуля упругости электродных обмазочных масс должна находиться в пределах от 0,025 до 0,075 МПа. По порядку величины это согласуется с нашими результатами, приведенными в табл. 4, и с результатами В. И. Климентова (см. табл. 2).

Изменение упругого потенциала и входовых сопротивлений при увеличении скорости сдвига симбатны друг другу. Этим подтверждается, что

Таблица 4. Показатели вязкоупругости электродных обмазочных масс (капиллярная зона)

Обмазка	Индекс	$\gamma, c^{-1}$	Величина показателей вязкоупругости						
			$\tau, \text{МПа}$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$G, \text{МПа}$	$\theta, \text{с}$	$W, \text{МПа}/\text{см}^3$	$\dot{\theta}\gamma$	$P_0, \text{МПа}$
АНО-4	A2	$\frac{11,8}{1445}$	$\frac{0,43}{0,70}$	$\frac{0,000470}{0,039090}$	$\frac{0,018}{0,035}$	$\frac{0,014}{2,110}$	$\frac{0,83}{1,92}$	$\frac{19,4}{33,3}$	$\frac{10,0}{23,0}$
	A1	$\frac{11,8}{1211}$	$\frac{0,61}{1,10}$	$\frac{0,008900}{0,055890}$	$\frac{0,022}{0,034}$	$\frac{0,026}{2,320}$	$\frac{1,23}{2,83}$	$\frac{22,3}{32,6}$	$\frac{15,5}{34,0}$
	A4	$\frac{11,8}{1211}$	$\frac{0,78}{1,19}$	$\frac{0,000860}{0,025785}$	$\frac{0,020}{0,045}$	$\frac{0,040}{2,830}$	$\frac{1,96}{4,10}$	$\frac{11,7}{48,5}$	$\frac{23,5}{49,0}$
УОНИ-13/55 (СТ)	ГС-1	$\frac{11,8}{1650}$	$\frac{0,50}{1,55}$	$\frac{0,000950}{0,041113}$	$\frac{0,017}{0,085}$	$\frac{0,010}{2,450}$	$\frac{1,15}{2,75}$	$\frac{11,8}{31,7}$	$\frac{14,0}{33,0}$
	ГС-4	$\frac{11,8}{1650}$	$\frac{0,70}{1,40}$	$\frac{0,000550}{0,060170}$	$\frac{0,038}{0,065}$	$\frac{0,018}{1,255}$	$\frac{1,15}{2,55}$	$\frac{14,8}{21,3}$	$\frac{10,5}{42,0}$
	ГС-6	$\frac{11,8}{1650}$	$\frac{0,80}{1,25}$	$\frac{0,000080}{0,069500}$	$\frac{0,028}{0,075}$	$\frac{0,008}{1,425}$	$\frac{1,15}{2,50}$	$\frac{16,8}{38,5}$	$\frac{13,8}{90,2}$
УОНИ-13/55 (НТ)	ГС-1	$\frac{11,8}{8120}$	$\frac{0,31}{0,75}$	$\frac{0,000090}{0,026270}$	$\frac{0,005}{0,019}$	$\frac{0,005}{4,370}$	$\frac{1,25}{2,50}$	$\frac{34,8}{61,8}$	$\frac{15,3}{30,0}$
	ГС-4	$\frac{11,8}{64970}$	$\frac{0,25}{0,75}$	$\frac{0,000010}{0,033900}$	$\frac{0,003}{0,023}$	$\frac{0,001}{3,390}$	$\frac{1,28}{2,50}$	$\frac{25,0}{86,0}$	$\frac{15,9}{37,2}$
	ГС-6	$\frac{11,8}{64970}$	$\frac{0,40}{0,95}$	$\frac{0,000015}{0,037290}$	$\frac{0,007}{0,027}$	$\frac{0,001}{3,720}$	$\frac{1,35}{2,25}$	$\frac{26,0}{65,0}$	$\frac{19,8}{33,0}$
ВСЦ-4	Ц	$\frac{150,0}{64970}$	$\frac{0,38}{0,60}$	$\frac{0,000005}{0,003490}$	$\frac{0,005}{0,025}$	$\frac{0,001}{0,140}$	$\frac{0,90}{3,10}$	$\frac{20,9}{65,0}$	$\frac{11,0}{37,0}$

Примечания. 1. В числителе приведены минимальные, а в знаменателе – максимальные значения. 2. Использовалось вязкое (СТ) и низковязкое стекло (НТ).

упругое состояние образков возникает в конвергентной зоне. За ее пределами происходит главным образом его релаксация.

Период релаксации изученных образочных масс на капиллярной стадии в логарифмической интерпретации прямолинейно понижается по мере увеличения скорости деформации. Это свидетельствует о рассасывании упругой энергии, накопленной в предкапиллярной зоне, благодаря механическому и температурному разрушению структуры образков. При малых скоростях сдвига уровень вязкости превышает модуль упругости, а при высоких становится меньше его. Точку перехода через нуль легко определить, полагая, что при  $\theta = 1$  вязкость и модуль упругости сравниваются по величине. В этот момент любое случайное воздействие на систему может вызвать разного рода колебания скорости течения образки под влиянием упругой составляющей напряжений, поскольку вязкость экструдруемого материала уже не способна их гасить. Чаще всего пульсации проявляются на стадии падающей (структурной) ветви экструзионной диаграммы. В качестве примера на рис. 2 показан вид пульсирующей кривой, зарегистрированный при экструдировании образки ГС-6 (НТ) через капилляр диаметром 4 мм при скорости  $\dot{\gamma} = 40 \text{ c}^{-1}$ . Характер пульсации позволяет предположить, что срывы струи происходят на стенке капилляра. У других параллельно тестируемых вариантов образков серии ГС пульсация не наблюдалась. Можно объяснить это двумя причинами. Первая связана со ступенчатым характером изменения режима экструдирования образков в пластометре ОБ 1435, в результате чего только в

опыте с образкой ГС-6 (НТ) условия экструдирования оказались соответствующими критическому периоду релаксации  $\theta = 1$ , при котором может появиться пульсация напорного потока. В остальных опытах замеры не попадали в такую критическую точку. Вторая причина связана с тем, что пульсация потока в капиллярной зоне возникает на поверхности канала. С уменьшением диаметра капилляра скорость потока возрастает, вязкость материала понижается и при относительно стабильной величине модуля упругости, казалось бы, условия для пульсирования улучшаются. На самом деле, уменьшение диаметра канала приводит одновременно к увеличению удельной (в расчете на единицу объема) поверхности насадка и без ее тормозящего действия на струю. Из теории пристенного скольжения известно, что он чаще всего возникает при использовании широких каналов и подавляется при замене их капиллярами малого диаметра.

На рис. 3 приведены диаграммы экструзии этих же образков ГС-1, ГС-4 и ГС-6, изготовленных на низковязких жидких стеклах, сквозь капилляр диаметром 4 мм с подвижной вставкой («флюгером») перед входом в капилляр. Она предназначалась для провоцирования нестационарности потока. Оказалось, что потоки образков с крупнозернистым (ГС-1) и среднезернистым (ГС-4) наполнителями не отреагировали на гибкую вставку перед входом в формующий канал. В случае же образки ГС-6 с мелкозернистым наполнителем указанная вставка спровоцировала достаточно длительную постепенно затухающую пульсацию потока. Этот опыт доказывает, что склонность к нестационарным режимам течения является, прежде всего, свойством образки, а уже потом условий ее напорного течения. Сами же пульсирующие режимы течения образки могут

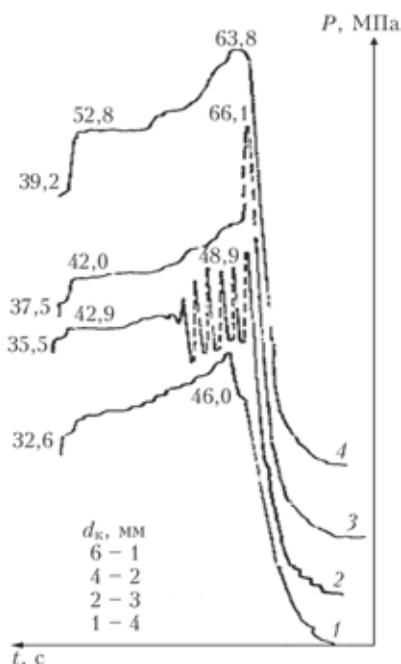


Рис. 2. Кривые экструзии образочных масс ГС-6 при расходе  $Q = 1 \text{ cm}^3 \cdot \text{c}^{-1}$ . Диаметр капилляра: 6 (1), 4 (2), 2 (3) и 1 (4) мм

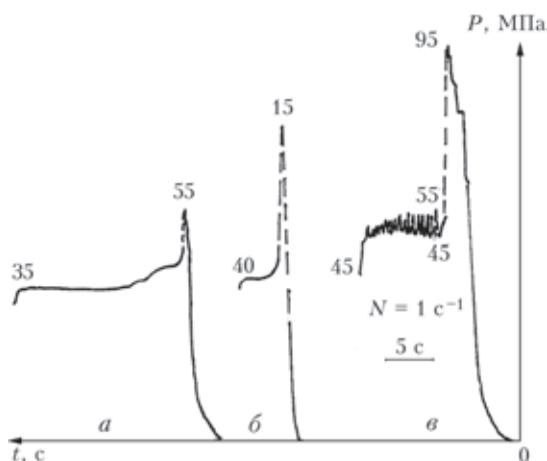


Рис. 3. Диаграммы экструзии образочной массы УОНИ-13/55, изготовленной на высокомодульном жидком стекле с вязкостью  $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , при расходе  $Q = 1 \text{ cm}^3 \cdot \text{c}^{-1}$ . Конический насадок ( $2\alpha = 40^\circ$ , диаметром 4/40 мм), объемная доля мелкой фракции: 20 (а), 40 (б) и 60 % (в)

создавать не только на стенке капилляра, но и в конвергентной зоне. И условия для их проявления в конвергентной зоне значительно благоприятнее, чем на стенке капилляра.

Это подтверждается результатами исследований опытных вариантов обмазочной массы УОНИ-13/55, обозначенной индексом Т-9.

Обмазка изготовлена на трехмодульном жидком стекле с вязкостью 850 мПа·с. Доза жидкого стекла в ней — 26 %.

Отличительная черта наполнителя — его зерновой состав. Он в соответствии с целями эксперимента имел следующее долевое соотношение фракций: суммарный остаток на сетках 250, 160, 100 и 63 мкм составлял соответственно 6, 8, 13 и 37 об. %. Удельная поверхность шихты  $S_{уд} = 10000 \text{ см}^{-1}$ , степень заполнения объема частицами  $\Phi_m = 0,67$ . Консистенция обмазки довольно тугая, так что  $P_m = 0,58 \text{ МПа}$  (0,85 МПа после часовой выдержки). Результаты опытов приведены на рис. 4.

В процессе экструзионных испытаний было установлено, что давление истечения обмазки через запорные диски с диаметром отверстия 6, 4 и 2 мм составляло 50, 55 и 57 МПа. Цифры сами по себе не высокие. Через отверстие диаметром 6 мм обмазка прошла с весьма небольшими пульсациями. Течение через отверстия с диаметром 4 и 2 мм сопровождалось существенными пульсациями скорости. Первая из них отражает течение при градиенте скорости сдвига  $40 \text{ с}^{-1}$  — точно таком же, как и в опыте с обмазкой ГС-6 в капилляре такого же диаметра. Стало быть, в первом опыте с обмазкой Т-9 тоже воспроизведены критические условия (равенство  $\eta$  и  $G$ ), в которых возникают пульсации скорости потока, на этот раз в заход-

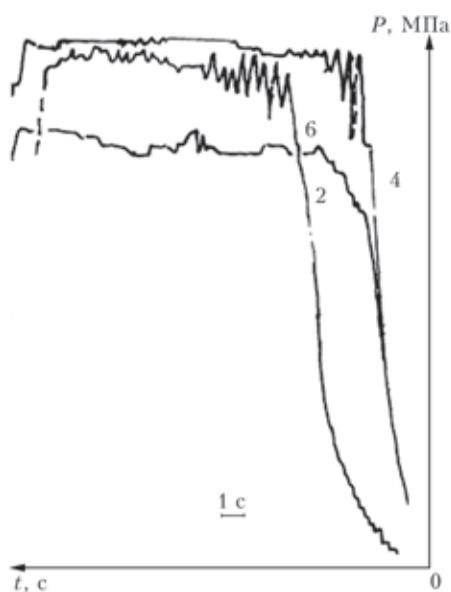


Рис. 4. Сравнение экструзионных кривых  $P_0 = f(t)$  обмазки Т-9, полученных с помощью капиллярного вискозиметра. Цифрами указаны диаметры насадков в миллиметрах

ной зоне. Экструзия обмазки Т-9 через отверстие в диске диаметром 2 мм происходит со скоростью  $318 \text{ с}^{-1}$ , т. е. в 8 раз большей, чем в предыдущем случае. При этом сдвиговая вязкость обмазки должна существенно понизиться, а модуль — возрасти. Условия для пульсирования потока стали еще более благоприятные, и вид экструзионной кривой подтверждает это. Действительно пульсация потока, вызванная избытком упругости обмазки, уже не подавляется ни вязкостью, ни ограничительной поверхностью капилляра, поскольку течение обмазки в конвергентной зоне осуществляется по сдвиговым слоям. Форма пиков более сглаженная в отличие от острых пиков в случае обмазки ГС-6, которая проскальзывала по поверхности капилляра.

Мгновенная релаксация накопленных упругих напряжений в конвергентной зоне часто наблюдается в виде пульсирующих выходов обмазки из формирующих каналов прессовой головки в реальных условиях опрессовки электродов. К примеру, при наличии в прессовой головке двухканальной проводки слишком упругие обмазки могут выбирать поочередно один из каналов для течения, в то время как в параллельном канале точно такого же профиля ее течение на это время прекращается. В следующей фазе процесса картина течения сменяется на противоположную, т. е. обмазка выбирает для прохождения канал, в котором до этого момента была неподвижной. В параллельном канале, поток обмазки на то же о время прекращается.

**Некоторые результаты изучения закономерностей появления разнотолщинности покрытия в реальных условиях опрессовки электродов.** Разнотолщинность покрытия возникает в бикомпонентном потоке из оболочки покрытия на стержне, как результат стохастического по своей природе энергетического взаимодействия компонентов, один из которых, покрытие, характеризуется нелинейными вязкоупругими свойствами, склонными проявиться в виде пульсирующих течений, а другой, стержень, является упругим элементом. Соотношение вязкости и упругости в материале оболочки в большей или меньшей мере изменяется под влиянием диссипативного и режимного факторов течения, и сопровождается нарушениями его устойчивости, в то время как упругие свойства стержня остаются при этом неизменными. Роль эффектов, связанных с эластической турбулентностью, характеризуется критерием  $Re_e = Ut^2/\theta R$ . Эффекты нарушения устойчивости течения, проявляющиеся на участке поворота потока обмазки, в рассекателях, в конических каналах перед заходом в формирующую головку, а также в области гидродинамической стабилизации потока на входе в фильеру, можно

охарактеризовать критерием монохромности  $H_0 = Ut/R$  [15].

Постоянные или затухающие, регулярные или иррегулярные колебания скорости обмазки, сопровождающиеся пульсацией скорости и давления, провоцируют чередующиеся поперечные отклонения стержня от оси калибрующей втулки, в результате чего равномерная по сечению кольцевая форма покрытия существенно искажается. Сочетание поперечных колебаний с продольным перемещением стержня могут привести не только к колеблющемуся, но и винтообразному изменению положения максимальной величины разнотолщинности вдоль электрода.

Эксцентричное расположение поперечного сечения покрытия относительно стержня не изменяет его площадь по сравнению с концентричной его формой. Тем не менее, многие жидкости испытывают меньшее сопротивление при их течении через эксцентричные каналы по сравнению с каналами концентричной формы. В работе [24] это установлено при исследовании напорного течения водных растворов КМЦ, ГЭЦ и МЦ через кольцевые каналы между коаксиальными трубами. Было установлено, что перепады давления, необходимые для осуществления их напорного течения через эксцентричные каналы при фиксированной скорости потока, уменьшаются по мере увеличения эксцентриситета. Жидкости с более ярко выраженными неньютоновскими свойствами показывают более медленную скорость уменьшения падения давления по мере того, как возрастает величина эксцентриситета между внешней и внутренней трубой. Эту картину течения можно распространить и на экструзионное нанесение кольцевой оболочки покрытия на стержни, заменив поверхность внутренней трубы поверхностью стержня, синхронно перемещающимся с обмазкой.

Наблюдение за динамикой изменения разнотолщинности покрытия показывает, что она хорошо отражает влияние на этот показатель выявленных нами особенностей вязкоупругого поведения обмазочных масс.

На рис. 5 приведены результаты испытаний пяти видов обмазки для низководородных электродов, которые отличались между собой технологическими свойствами. В начале, середине и конце каждого электрода, вышедшего из головки пресса, измеряли разнотолщинность покрытия. Опрессовку электродов с диаметром стержня 3 мм проводили на прямоточном прессе EP-120 фирмы Оэрликон. Видно, что в изменении разнотолщинности покрытия в процессе нанесения каждой из испытанных обмазок на стержни можно выделить, прежде всего, более или менее ярко выраженный на-

чальный период, в течение которого обмазка из состояния наибольшего сжатия переходит в состояние относительно стационарного режима течения. В это время большая по величине начальная разнотолщинность покрытия уменьшается и постепенно выходит на уровень, который колеблется относительно какого-то среднего, тоже изменяющегося значения. Волны этих колебаний отличаются по амплитуде и частоте, при этом спад и подъем низкочастотной волны тоже сопровождается более мелкими по амплитуде, но более частыми (даже в пределах одного электрода) колебаниями разнотолщинности. Это свидетельствует о ее случайном характере, отражающем очень сложные изменения в соотношении вязких и упругих характеристик обмазочных масс в состоянии напорного течения со стержнем. В приведенных примерах не наблюдался ни один случай разнотолщинности, причину которого можно было бы трактовать, как попадание в обмазку каких-то случайных включений.

На рис. 6 приведены данные о величине и угле ориентирования (в плоскости, перпендикулярной оси электрода) вектора разнотолщинности покрытия. Их получили, проведя осциллографические измерения ее горизонтальной и вертикальной составляющих в ходе опрессовки электродов УОНИ-13/55 с диаметром стержня 4 мм на горизонтальном угловом прессе фирмы Хейвелок [26].

В течение времени наблюдения из головки пресса вышло 200 электродов, величина вектора

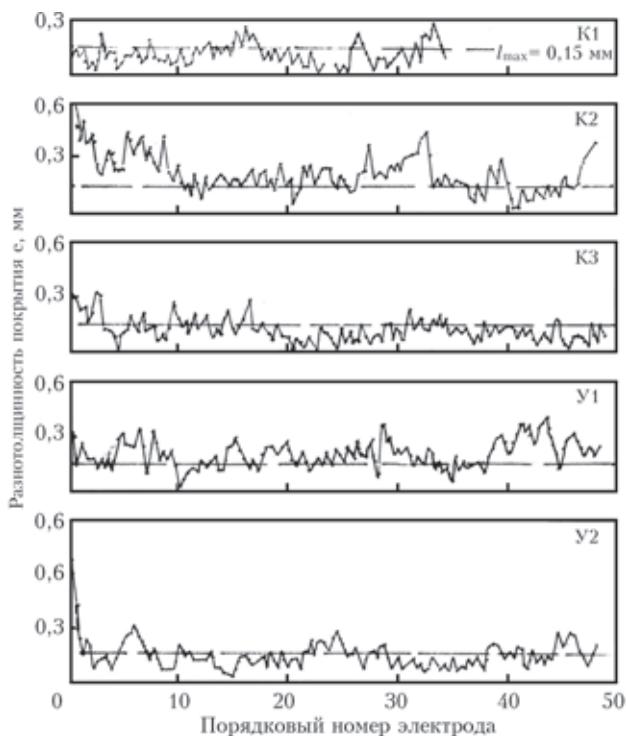


Рис. 5. Динамика изменения разнотолщинности покрытия во время опрессовки опытных низководородных электродов диаметром 3 мм с индексом K1, K2, K3, Y1 и Y2

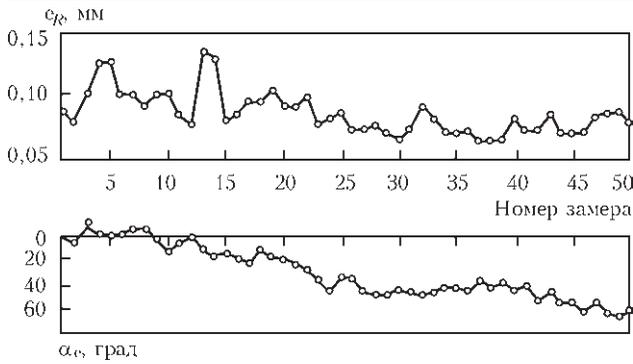


Рис. 6. Изменение величины и угла ориентации вектора разнотолщинности покрытия по данным осциллографирования

разнотолщинности  $e_R$  изменилась от 0,15...0,17 до 0,07...0,10 мм (т. е. почти вдвое), а угол его ориентирования относительно горизонта  $\alpha_e$  увеличился от 0 до 60°. На фоне указанных общих изменений  $e_R$  и  $\alpha_e$  наблюдалась их пульсация. Особенно пульсирует вертикальная составляющая разнотолщинности, и это объясняется расположением по вертикали двух окон диафрагмы-рассекателя, через которые обмазочная масса нагнетается из обмазочного цилиндра в прессовую камеру (зазор между наконечником стержнепровода и калибрующей втулкой). На рис. 7 показана взаимосвязь величины и угла ориентации вектора разнотолщинности покрытия. Чем больше он отклоняется от горизонтали, тем меньше амплитуда его колебаний, хотя его абсолютная величина при этом возрастает. По-видимому, имеют место волнообразные несинхронные колебания  $e_R$  и  $\alpha_e$  (первые опережают во времени вторые), так что образуется своего рода пространственная волна (спираль). В одном направлении  $e_R$  уменьшается с ростом  $\alpha_e$ , а в другом — перпендикулярном первому — растет при тех же самых увеличениях  $e_R$  и  $\alpha_e$ . По-видимому, на пульсацию обмазки через окна

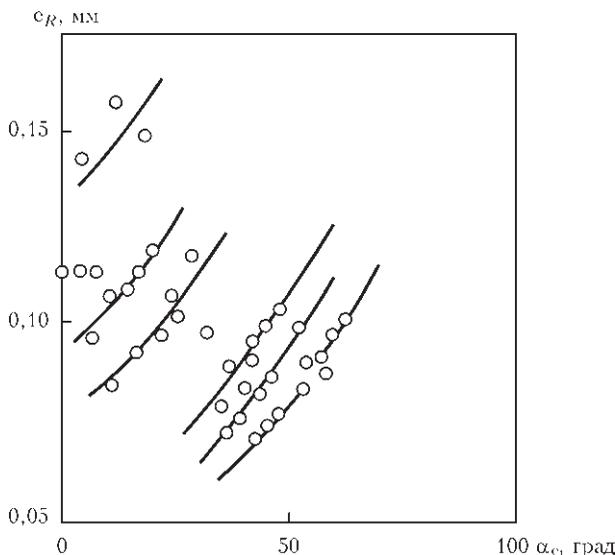


Рис. 7. Связь величины и угла ориентирования вектора разнотолщинности покрытия, выявленные осциллографированием

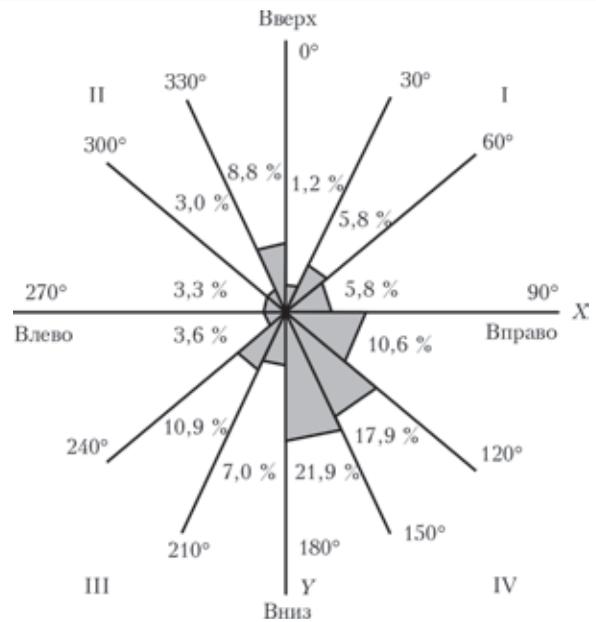


Рис. 8. Статистическое распределение угла ориентирования вектора максимальной разнотолщинности покрытия в плоскости, перпендикулярной оси выходящих электродов. В выборке — 980 электродов

рассекателя накладывается колебания потока, обусловленные его поворотом по горизонтали на 90° при выходе из цилиндра перед рассекателем. Можно предположить, что в этом случае из-за необходимости выполнения на повороте принципа гомохромности (неразрывности) потока обмазки внешняя и внутренняя его поверхности вынуждены перемещаться с разной скоростью. Влияние этого фактора на разнотолщинность проявляется тем в большей степени, чем ближе к горизонту расположен вектор разнотолщинности.

О границах и степени случайности отклонений вектора разнотолщинности покрытия от преимущественной его ориентации можно судить по результатам измерений, выполненных концентратором КРП-12, при опрессовке электродов АНО-4 с диаметром стержня 4 мм на угловом прессе МАОЭ-1.

Пресс вертикальный с углом поворота потока обмазки 90°. В головке пресса «окна» рассекателя потока обмазки ориентированы вертикально. Точкой отсчета угла  $\alpha_e$  служила сплошная линия, нанесенная как образующая в зенитном положении покрытия электродов, выходящих из пресса. В процессе измерений в каждой из 11 контролируемых сечений электрода наносилась вторая контрольная метка, соответствующая положению максимальной разнотолщинности. Угол между этими метками в плоскости, перпендикулярной оси электрода, принимали за угол ориентации  $e_R$ . Частотное распределение результатов замеров по заранее выбранным секторам представлено на рис. 8. По нему можно судить о том, что максимальные значения разнотолщинности покры-

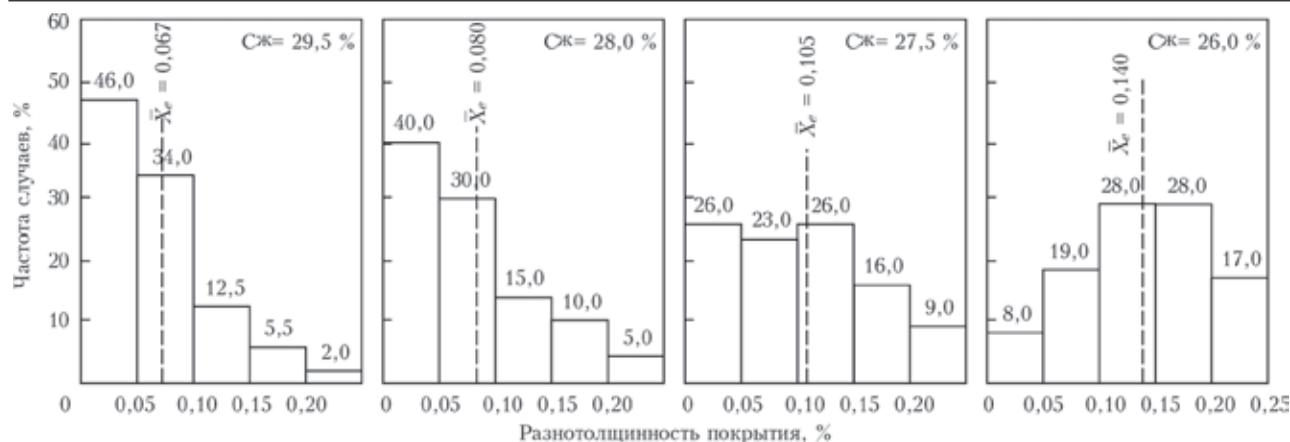


Рис. 9. Влияние дозы жидкого стекла в обмазочной массе на склонность электродов АНО-4 к разнотолщинности покрытия

тия ориентируются преимущественно в секторах между 120 и 180°. Смещение стержня, являющееся причиной разнотолщинности покрытия, осуществляется преимущественно внешней стороной потока обмазки вверх и влево относительно вертикали.

На рис. 9 представлены результаты оценки разнотолщинности покрытия электродов, в покрытии которых изменялась доза жидкого стекла в пределах от 29,5 до 26 мас. %.

По мере того, как консистенция обмазки становилась все более упругой, доля электродов со сверхнормативной разнотолщинностью покрытия возрастала от 2 до 17 %. Под влиянием повышения доли упругой составляющей возрастала средняя величина разнотолщинности от 0,067 до 0,140 мм и изменялась форма и ширина статистического рассеяния этого показателя (от одностороннего до гауссовского).

## Выводы

1. Разнотолщинность покрытия возникает в бicomпонентном потоке, в котором оболочка из обмазочной массы характеризуется нелинейными вязкоупругими свойствами, а стержень является компонентом с постоянным модулем упругости. Соотношение вязкости и упругости в материале оболочки уменьшается под влиянием разрушения структуры и диссипативного разогрева, и это, в конце концов, провоцирует неустойчивость режимов сдвиговых деформаций, а значит, может стать причиной нарушения равномерного нанесения покрытия на стержни.

2. Установлено, что математический аппарат, разработанный в реологии полимеров, можно использовать для вычисления таких вязкоупругих характеристик электродных обмазочных масс в состоянии капиллярного течения, как период релаксации, модуль упругости, упругий потенциал и критерий эластической турбулентности Рейнольдса.

3. С применением указанного аппарата вычислены перечисленные показатели вязкоупругости электродных обмазочных масс для рутиловых, низководородных и целлюлозных электродов, консистенцию которых регулировали в достаточно широких пределах, изменяя зерновые составы шихты, характеристики жидкого стекла и долю его в обмазочной массе. С другой стороны, изменяя режимы капиллярного тестирования указанных обмазочных масс, выяснили, как они влияют на их реологические показатели.

4. Установлено, что режимы напорного течения обмазочных масс в наибольшей мере влияют на сдвиговую вязкость и период релаксации обмазочных масс и в значительно меньшей степени — а их модуль упругости. Так, при увеличении градиента скорости сдвига на 4-5 порядков вязкость и период релаксации обмазок уменьшается на 4 порядка. Это вызвано механическим и диссипативным разрушением коагуляционной структуры обмазочных масс. Модуль упругости в тех же самых условиях тестирования для многих обмазок остается постоянным (все виды рутиловых и низководородные обмазки с мелкозернистым наполнителем), возрастает не более чем на порядок (низководородные обмазки с крупнозернистым наполнителем, изготовленные на вязком жидком стекле) или незначительной степени понижается (целлюлозные обмазки).

5. Антибатный характер изменения вязкости и периода релаксации, с одной стороны, и модуля упругости, с другой стороны, означает, что при определенной скорости течения вязкость и модуль упругости выравниваются по величине, а период релаксации, который представляет собой отношение вязкости и модуля упругости, становится равным единице. С этого момента вязкость теряет способность демпфировать колебания упругости обмазок, которые могут быть спровоцированы любыми случайными причинами, а система переходит в режим неустойчивого течения, выраженный с разной степенью регулярности.

6. В работе демонстрируются 2 вида неустойчивого течения: в капиллярной и в заходной (предкапиллярной) зоне. В первом случае оно имеет признаки срыва струи на стенке капилляра и его удается погасить при использовании капилляров меньших сечений, что характерно для явления пристенного скольжения. Во втором случае при переходе на запорный диск с отверстием меньшего сечения нерегулярный режим течения не исчезает. Следовательно, при повышении скорости сдвига неблагоприятное соотношение вязкости и упругости в этом случае сохраняется. Включение в поток мягких элементов, способных спровоцировать нестабильное течение, срабатывает только с теми обмазками, которые пульсировали и без гибкой вставки. Таким образом, склонность к неустойчивым режимам течения, способным привести к разнотолщинности покрытия, является свойством обмазки, а внешние возмущающие факторы только раскрывают эту способность.

7. Показана качественная связь явления эластической турбулентности электродных обмазочных масс с появлением и характером проявления разнотолщинности покрытия при реальном экструзионном нанесении обмазки на электродные прутки.

1. *Марченко А. Е.* Разнотолщинность покрытия как индикатор состояния процесса и качества изготовления сварочных электродов // Электродное производство на пороге нового тысячелетия: Материалы науч.-техн. семинара (С.-Петербург, 22–26 мая 2000 г). – Череповец: Ассоциация «Электрод», 2000. – С. 124–125.
2. *Ворновицкий И. Н.* Разнотолщинность покрытия – основной показатель качества электродов // Свароч. пр-во. – 1989. – № 4. – С. 7–19.
3. *Majasaka K., Oshiba F., Akamatsu T.* Effect Eccentricity of the coating upon the Deposition of Weld Metal // J. Japan Welding Soc. – 1982. – № 7. – P. 47–55.
4. *Овчинников В. А., Баженов В. В.* Влияние геометрии электродных покрытий и наличия дефектов в нем на надежность защиты плавящегося металла от воздействия воздуха // Свароч. пр-во. – 1978. – № 5. – С. 39–40.
5. *Походня И. К., Макаренко В. Д., Миличенко С. С.* Влияние эксцентрисности покрытия на сварочно-технологические свойства электродов и качество наплавленного металла // Автомат. сварка. – 1985. – № 11. – С. 20–22.
6. *Степаносов А. Р.* Экспертная оценка причин разнотолщинности покрытия сварочных электродов // Свароч. пр-во. – 1989. – № 4. – С. 7–9.
7. *Белкин И. М., Виноградов Г. В., Леонов А. И.* Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.
8. *Виноградов Г. В., Малкин А. Я.* Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
9. *Марченко А. Е., Гнатенко М. Ф.* Особенности течения электродных обмазочных масс, обнаруженные капиллярным пластометром / Информ. материалы СЭВ. Координац. центр по пробл. «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создания эффективных сварочных материалов и оборудования». – Киев, 1980. – Вып. 1. – С. 106–117.
10. *Bagley E. B.* End Correction in the Capillary Flow of Polyethylene // J. Appl. Phys. – 1957. – 28, № 5. – P. 624–627.
11. *Cogswell F. N.* Converging flow of polymer melts in extrusion dies // Polym. Eng. and Sci. 1972. – 12, № 2. – P. 64–68.
12. *Марченко А. Е.* О реологических свойствах электродных обмазочных масс в конвергентной зоне при опрессовке электродов // Сб. докл. IV Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ: «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество. Конкурентоспособность». – Краснодар, 2011. – С. 223–232.
13. *Shoff R. N., Cancio L.V., Chida M.* Extrusial flow of polimer melts // Trans. Soc. Rheol. – 1977. – 21, № 3. – P. 429–434.
14. *Хан Ч. Д.* Реология в процессах переработки полимеров. – М.: Химия, 1979. – 368 с.
15. *Малкин А. Я., Леонов А. И.* О критериях неустойчивости режимов сдвиговых деформаций упруго-вязких полимерных систем // Докл. АН СССР. – 1963. – 151, № 2. – С. 380–383.
16. *Philippoff W., Gaskins F. H.* The capillary experiment in rheology // Trans. Soc. Rheol. – 1958. – P. 263–284.
17. *Соколов Е. В.* Электроды с качественным покрытием и их производство // Автоген. дело. – 1950. – № 11. – С. 26–29.
18. *Клементов В. И.* Жидкое стекло, как материал электродных покрытий для электродуговой сварки: Дис. ... канд. – М., 1953. – 186 с.
19. *Состояние и перспективы совершенствования технологии и оборудования для производства сварочных электродов / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина и др.* // Сб. докл. Весенний конф. по сварочным материалам в 2-х частях (Киев, 31 окт.–3 нояб.). – Ч. 2-я. – С. 210–250.
20. *Марченко А. Е., Шкурко С. А.* Контроль электродных обмазочных масс коническим пластометром // Электроды и флюсы для электродуговой сварки: Материалы к краткосрочному семинару 12–14 марта 1973 г. – Ленинград: ЛДНИ, 1973. – С. 22–32.
21. *Бибиб Е. Е.* Реология дисперсных систем. – Л.: Изд-во: ЛГУ, 1981. – 172 с.
22. *Исследование вязкости жидких стекол при давлении опрессовки электродов / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина, З. А. Сидлин, В. П. Костюченко* // Новые сварочные и наплавочные материалы и их применение в промышленности: Материалы науч.-техн. семинара, посвященного 100-летию со дня рождения К. В. Петраня (С.-Петербург, 19–20 мая 1992). – С.-Петербург, 1992. – С. 43–49.
23. *Mitsubishi N., Aoyagi Y.* Non-newtonian fluid flow in an eccentric annulus // J. Chem. Eng. of Japan. – 1973. – 6, № 5 – P. 402–408.
24. *Марченко А. Е., Гнатенко М. Ф.* Особенности формирования разнотолщинности покрытия, обнаруженные осциллографированием // Междунар. науч.-техн. конф. «Металлургия сварки и сварочные материалы (С.-Петербург, 1–2 июня 1992 г.): Тез. докл. – С.-Петербург, 1993. – С. 98–100.

Поступила в редакцию 22.04.2014