

ВЛИЯНИЕ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ШИХТЫ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРУ НАПОРНОГО ПОТОКА ОБМАЗОЧНЫХ МАСС ДЛЯ НИЗКОВОДОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

А. Е. МАРЧЕНКО

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

В ходе исследований обмазочной массы низководородных электродов УОНИ-13/55, выполненных с помощью капиллярного вискозиметра, установлено, что их реологические показатели и структура в состоянии напорных потоков существенно зависят от зернового состава материалов покрытия. С точки зрения минимизации энергетических затрат, необходимых для экструзионного нанесения обмазок на стержни, в шихте должно содержаться 50 % мелкой фракции. Отклонение ее доли в большую или меньшую сторону от указанного оптимума существенно повышает энергетические затраты на опрессовку электродов. Обмазки с крупно- и мелкозернистым наполнителем не идентичны друг другу по структуре. Это подтверждает характер изменения степени диссипативного разогрева обмазки, величины естественного конвергентного угла в заходной зоне, а также форма деформационных (экструзионных) кривых при увеличении скорости течения. Профиль потока обмазок с крупнозернистым наполнителем с повышением скорости напорной струи расширяется. У потока обмазок с мелкозернистым наполнителем он остается почти таким же узким, как и при скоростях течения ползучести. Результаты анализа формы экструзионных кривых $P = f(t)$ свидетельствуют о том, что напорное течение обмазки с крупнозернистым наполнителем осуществляется по вязкостному механизму. Обмазки с избытком мелкозернистого наполнителя более структурированы, поскольку в этих случаях наряду с заполнением междузерновых пустот жидкостекольное связующее должно покрыть значительно более развитую поверхность зерен. Возрастает их молекулярное взаимодействие и прочность образованной ими структуры, которая разрушается при деформации, сопровождаясь специфическими эффектами нестационарности потока. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: сварочные электроды низководородного типа, разнотолщинность покрытия, реология обмазочных масс, вязкость и показатели упругости обмазочных масс

Введение. Зерновой состав материалов покрытия существенно влияет на консистенцию и технологические свойства электродных обмазочных масс. Это подтверждают и опубликованные нами в [1, 2] результаты исследований вязкости обмазочной массы УОНИ-13/55. Ее оценивали как потери напора при нагнетании обмазки из расходного цилиндра вискозиметра в круглый насадок диаметром 5 и длиной 50 мм при постоянном расходе $Q = 5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (средний градиент скорости сдвига 100 с^{-1}). Порошки для сухой шихты составляли из предварительно высеянных фракций материалов так, чтобы получить для каждого из них непрерывные укладки частиц с двумя заранее выбранными показателями дисперсности и полидисперсности. Затем набирали подготовленные таким образом порошки в соотношениях, предусмотренных математическим планом эксперимента так, чтобы зерновой состав шихты изменялся в пределах, которые могут встретиться в практике электродного производства: объемную долю частиц в шихте, мельче 0,063 мм, варьировали в пределах от 5 до 95 об. %, при этом ее удельная поверхность изменялась от 3000 до 12000 см^{-1} .

В результате зерновые составы одной части образцов шихты получились с непрерывной, а другой — с выборочной укладкой частиц. По этой причине выявлено множество зерновых составов, обеспечивающих минимальную для данной серии опытов потерю напора, значение которой изменяется при переходе от одной серии составов к другой. В то же время даже небольшие отклонения зернового состава смеси влево или вправо от каждого оптимального зернового состава сопровождаются резким, как правило, почти симметричным возрастанием вязкости обмазки. И только у серий, относящихся к области крупно- и мелкозернистых композиций, отклонение зернового состава от оптимума сопровождается несимметричным повышением вязкости обмазки. Другими словами, одинаковое повышение доли мелкозернистой фракции в шихте по сравнению с оптимумом в первом случае сопровождается намного меньшим увеличением вязкости обмазки, чем во втором [2]. Причина этого явления не установлена.

В работе [3] исследованы жидкостекольные композиции порошков мрамора с аналогичным по ширине диапазоном зерновых составов (про-

ход через сетку 0063 изменялся в пределах 0 до 94 мас. %, а удельная поверхность — от 1500 до 11500 см⁻¹). В этой серии опытов зерновые составы порошков характеризовались тремя уровнями крупности и ширины распределения частиц по размерам, и все укладки частиц были непрерывными. При содержании 30 % жидкого стекла с модулем (М) 3,2 и вязкостью 670 мПа·с композиции по консистенции соответствовали реальным обмазочным массам. В качестве измерительного инструмента использованы круглые насадки с диаметром/длиной 4/20 мм при $Q = 1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ или 8/60 мм при $Q = 5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (средний градиент скорости сдвига 40 и 25 с⁻¹ соответственно).

В этой серии опытов выявлен один относительно широкий минимум вязкости, который приходится на 30...60 % подситовой фракции в шихте. В изученном диапазоне скоростей потока положение минимума неизменно. Однако скорость течения заметно влияет на вязкость крайних (наиболее крупно- и мелкозернистых) образцов мрамора. При этом одно и то же уменьшение градиента скорости сдвига с 40 до 25 с⁻¹ сопровождается повышением вязкости суспензий с крупнозернистым наполнителем и понижением ее у суспензий с мелкозернистым наполнителем. Можно предположить, что такие суспензии, характеризующиеся примерно одинаковой порозностью (свободным межзерненным пространством) наполнителя, обладают в то же время разной структурой.

В общем полученные в указанных выше работах результаты достаточно хорошо объясняются с позиций гидродинамической теории вязкости, основанной на сопоставлении фактической плотности упаковки частиц наполнителя Φ , с предельно допустимой их концентрацией Φ_m , при достижении которой суспензия теряет способность к течению. Вследствие понижения порозности, свойственной монодисперсному наполнителю, благодаря заполнению пустот более мелкими частицами, значительная доля связующего становится кинетически свободной жидкостью. За счет этого облегчается сдвиговое перемещение зерен друг относительно друга, т. е. понижается вязкость суспензии.

Целью настоящей работы является исследование влияния зернового состава шихты на реологические характеристики и структуру напорного потока обмазочных масс для низководородных электродов при скоростях течения, соответствующих реальным условиям опрессовки электродов на производственных электрообмазочных прессах.

Методика исследований. Исследовали реологические характеристики опытной обмазки со

Таблица 1. Характеристики шихты и обмазочной массы

Обозначение обмазочной массы	Доля мелкой фракции, %	Удельная поверхность шихты, см ⁻¹	Предельно допустимая концентрация Φ_m	Пластическая прочность P_m , МПа
ГС-1	26,0	2250	0,720	0,13
ГС-2	36,0	3900	0,800	0,10
ГС-3	43,0	4900	0,815	0,12
ГС-4	47,0	5850	0,815	0,13
ГС-5	56,0	8100	0,750	0,22
ГС-6	65,0	9250	0,705	0,28

следующим вещественным составом сухой шихты (мас. %): 51,0 мрамора, 18,0 плавиковошпатового концентрата, 5,0 кварцевого песка, 3,0 синтетической слюды, 2,0 ферромарганца, 13,0 гранулированного ферросилиция (15 % Si) и 8,0 ферротитана. Зерновой состав шихты регулировали, изменяя соотношения массовых долей предварительно высеянных фракций порошков мрамора, плавикового шпата и кварцевого песка. Порошки ферросплавов и синтетической слюды АНС-1 использовали с постоянным зерновым составом. Общую долю мелкой фракции в шихте изменяли в пределах от 25 до 65 мас. %, при этом соотношение фракций менялось так, как показано на рис. 1. Зерновой состав смеси с наиболее плотной упаковкой зерен, который соответствует правилу Фурнаса, находится в промежутке между кривыми ГС-4 и ГС-5. Фактические показатели удельной поверхности шихты и плотности их случайных упаковок, а также пластической прочности образцов приведены в табл. 1.

Обмазочные массы готовили в интенсивном противоточном смесителе. Использовали Na-K жидкое стекло с модулем 2,9, плотностью 1495 кг/м³ и вязкостью 1000 мПа·с. Массовая доля жидкого стекла в обмазке составляет 25 %.

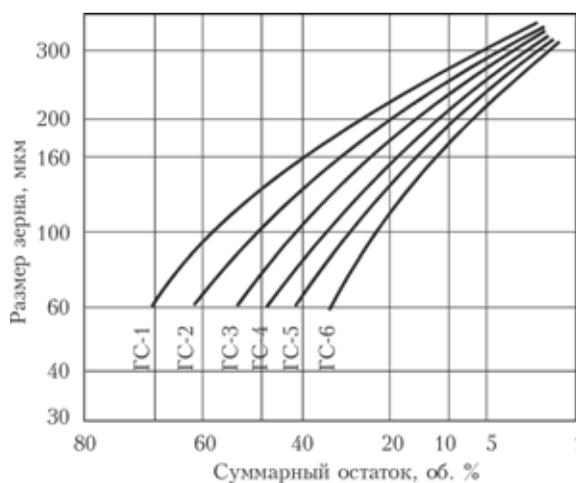


Рис. 1. Зерновые составы сухих шихтовых смесей, использованных для приготовления электродных обмазочных масс

Исследования выполнены на капиллярном вискозиметре модели ОБ 1435, представляющем собой плунжерный экструдер [2, 4] с электромеханическим приводом и диаметром рабочего цилиндра 30 мм. Изменяя ступенчато маршевую скорость штока, секундный расход обмачочных масс Q регулировали в пределах от 1 до 25 см³·с⁻¹.

Использование при таких расходах круглых насадок («капилляры») с плоским входом и диаметром d_k от 1 до 6 мм позволяло регулировать средний градиент скорости сдвига на гладкой стенке канала в пределах от 10 до 65000 с⁻¹.

Напряжение сдвига на стенке канала τ рассчитывали по формуле $Pd_k/4L$, где $L = 10d_k$ — длина канала; $P = (P_c - P_0)$ — перепад давления на этой длине; P_0 — потери напора на входе в насадок (определяли, пропуская обмазку через круглое отверстие диаметром d_k в центре стального диска толщиной 1 мм); P_c — общие потери напора перед входом в насадок и на его длине.

Постоянством соотношения L/d_k поддерживалась одинаковая степень тиксотропного разрушения (восстановления) коагуляционной структуры обмачочных масс при всех диаметрах насадков. Продолжительность экструдирования обмазки колебалась в зависимости от скорости потока в пределах 5...15 с, а величины P_c и P_0 регистрировали в момент остановки штока. Капилляры не термостатированы. Выборочно контролировалась температура поверхности струи термопарой, зачеканенной в корпус капилляра диаметром 4 мм и

длиной 56 мм, при $Q = 1$ см³·с⁻¹. ТермоЭДС регистрировали потенциометром КСП-4. Эксперименты выполнены с участием канд. техн. наук М. Ф. Гнатенко и инженера В. С. Ворошило.

Эффективную сдвиговую вязкость обмачочной массы в состоянии напорного потока рассчитывали по формуле $\eta = \tau/\dot{\gamma}$, а продольную вязкость λ — по формуле из работ [5, 6]

$$\lambda = \frac{9(n_0 + 1)^2}{32\eta} \left(\frac{P_0}{\dot{\gamma}} \right)^2, \quad (1)$$

где $n_0 = d(\lg P_0)/d(\lg \dot{\gamma})$ — индекс течения обмачочной массы в конвергентной зоне, который находили по углу наклона реограмм $P_0 = f(\dot{\gamma})$, представленных в логарифмических координатах, к оси градиентов скорости сдвига. Использовали также аналогичный по смыслу индекс сдвигового течения обмачочной массы сквозь цилиндрический канал $n_k = d(\lg \tau)/d(\lg \dot{\gamma})$. Оба индекса характеризуют отношение энергий активации вязкого течения материала соответственно при $\dot{\gamma} = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$. Как правило, $n_k < n_0$.

О структуре потока обмачочной массы судили по значению угла естественной конвергенции α_0 , который соответствует равенству сдвигающей и растягивающей компонент усилия, преодолевающего сопротивление указанной зоны [6].

Для тех материалов, у которых продольная вязкость понижается интенсивнее, чем сдвиговая, угол α_0 уменьшается по мере увеличения скоро-

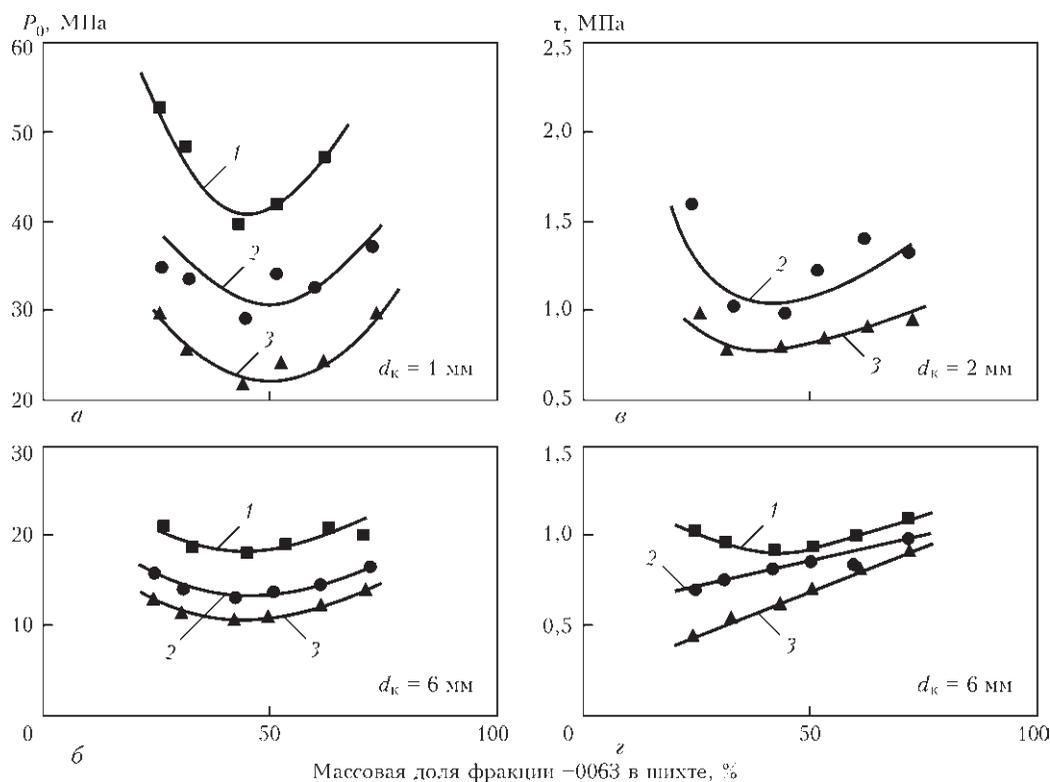


Рис. 2. Влияние доли мелкой фракции в шихте на потери давления на входе (а, б) и напряжение сдвига на стенке капилляра (в, з): 1 — $Q = 25,5$ см³·с⁻¹; 2 — 5,3; 3 — 1,0

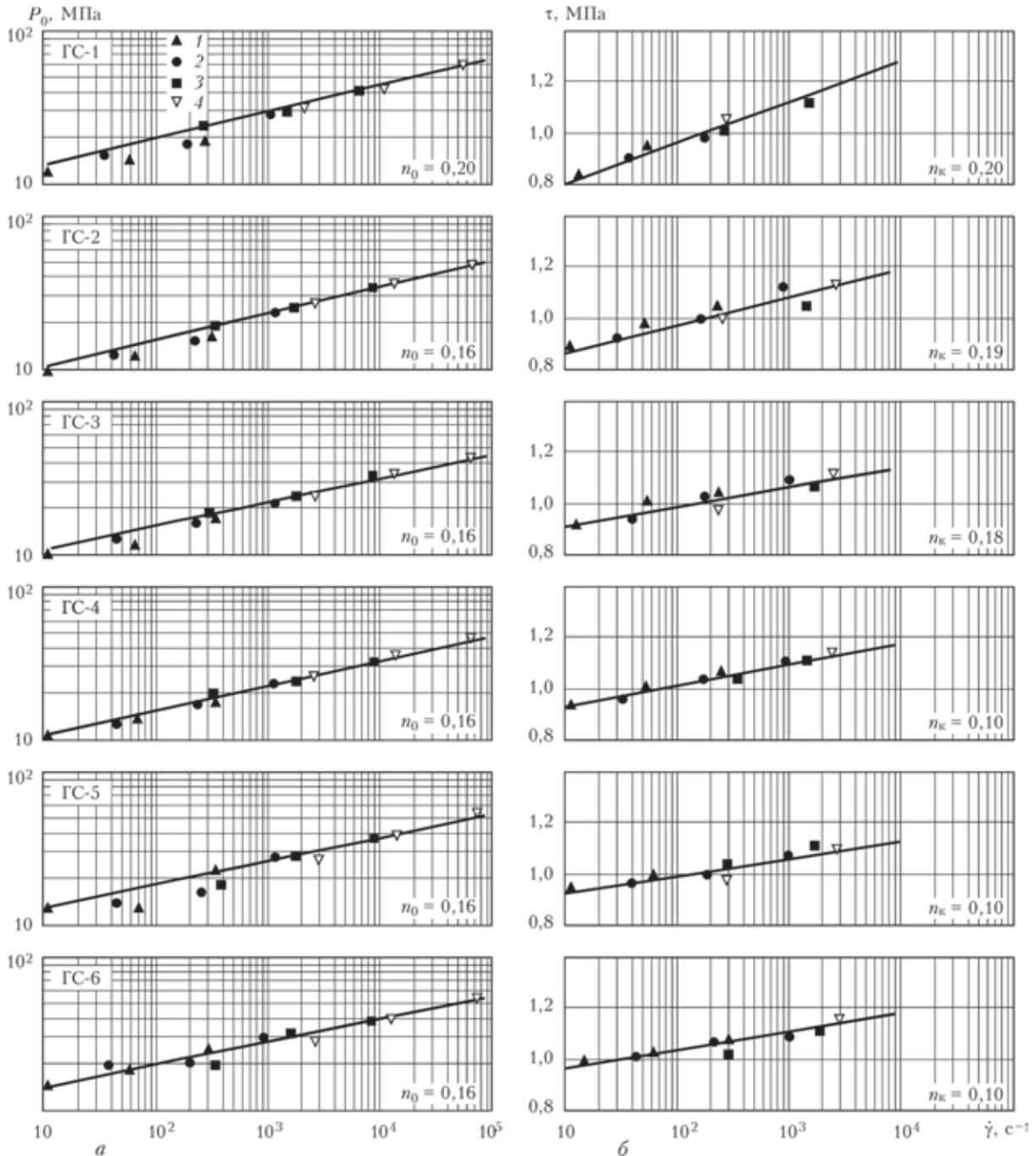


Рис. 3. Зависимость градиента скорости сдвига на сопротивление входа (а) и напряжение сдвига на стенке капилляра (б) от доли мелкой фракции в обмазочной массе: 1 — $d_k = 6$ мм; 2 — 4; 3 — 2; 4 — 1

сти течения. Конвергентная зона таких материалов приобретает лейкообразную форму [1, 2, 4, 5].

Для определения среднего напряжения растяжения обмазочной массы использовали формулу

$$(\sigma_E)_{cp} = \frac{3}{8}(n_0 + 1)P_0, \quad (2)$$

а градиент скорости растяжения вычисляли по формуле

$$\dot{\epsilon} = \frac{(\sigma_E)_{cp}}{\lambda}. \quad (3)$$

Угол естественной конвергенции при входе обмазочной массы в формирующий цилиндрический насадок рассчитывали по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \left(\frac{2\eta}{\lambda} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Выявленные в ходе проведенных экспериментов зависимости входных сопротивлений P_0 и напряжений сдвига на стенке цилиндрического насадка τ , полученные при использовании насадков с крайними сечениями каналов, от доли мелкой фракции в шихте, а также зависимость их от градиента скорости сдвига на стенке канала показаны на рис. 2, 3. Видно, что зерновой состав шихты, изменяясь даже в пределах столь узких границ, существенно влияет на реологические характери-

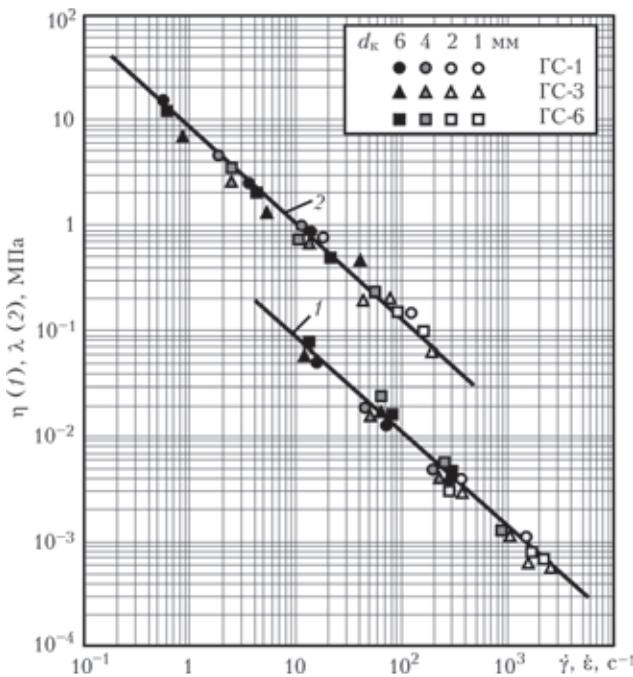


Рис. 4. Зависимость сдвиговой (1) и продольной (2) вязкости электродных обмазочных масс с разным зерновым составом шихты от среднего градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и растяжения $\dot{\epsilon}$

стики обмазочных масс. Особенно, если речь идет о сопротивлениях потоку обмазки в конвергентной зоне. Как и ожидалось, величина P_0 изменяется в зависимости от доли мелкой фракции в шихте по экстремальному закону, существенно возрастая по мере ее отклонения в большую и в меньшую сторону от 50 % как от оптимального значения. Чем меньше сечение выпускного отверстия и чем больше объемный расход обмазочной массы, тем сильнее реагирует обмазка на изменение зернового состава шихты, преодолевая сопротивление входа в формирующий цилиндрический канал. Тем не менее лишь самая мелкозернистая из них (65 % мелкой фракции в шихте) не прошла сквозь диафрагму диаметром 1 мм при $Q = 25,5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Остальные обмазки прошли сквозь эту и другие диафрагмы при всех объемных скоростях истечения.

Значительно сложнее ведут себя обмазки в цилиндрических насадках. Во-первых, при $Q = 25,5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ни одна из обмазок не преодолела сопротивление насадков с диаметрами канала 1 и 2 мм. Часть обмазок прошла сквозь насадки диаметром 2 мм, если расход не превышал $5,1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Насадок с диаметром канала 6 мм прошел сквозь все обмазки при всех расходах и зерновых составах шихты. Во-вторых, экстремальное изменение напряжения сдвига на стенке насадка в зависимости от доли мелкой фракции в шихте выражено в меньшей мере, чем у сопротивлений входа. При использовании же насадков с диаметром каналов 4 и 6 мм экстремальная зависимость τ от доли мелкой фракции в шихте вырождается в режимах

течения с расходами 1 и $5,1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ в монотонно возрастающую. Исходя только из положений гидродинамической теории вязкости, эти особенности не могут быть объяснены.

Важно отметить, что все обмазки ведут себя как материалы с ярко выраженными неньютоновскими свойствами. Об этом свидетельствуют значения индексов течения, которые существенно меньше единицы: в конвергентной зоне $n_0 = 0,16$ независимо от зернового состава шихты; в капилляре n_k монотонно понижается от 0,20 до 0,10 по мере возрастания доли мелкой фракции в шихте. Следовательно, неньютоновская природа обмазочных масс проявляется заметнее.

Изменение зернового состава шихты отражается на структуре потока как в заходной зоне, так и в цилиндрическом насадке. Приведенные ниже результаты показывают, что с увеличением доли мелкой фракции в шихте изменяются значения и продольной, и сдвиговой вязкости, а вместе с ними и конвергентный угол в заходной зоне, который, как следует из (4), определяется их соотношением. При этом в насадке должна усилиться тенденция к пробковому характеру течения обмазочной массы (индекс течения уменьшается) из-за чего сдвиг все больше концентрируется в пристеночном слое.

На рис. 4 приведены результаты расчетов сдвиговой и продольной вязкости исследуемых обмазочных масс в зависимости от градиента скорости сдвига и растяжения соответственно. Видно, что η и λ уменьшаются по мере увеличения скоростей деформаций. Этим подтверждается структурированность электродных обмазочных масс и тиксотропное разрушение их коагуляционной структуры при увеличении $\dot{\gamma}$ и $\dot{\epsilon}$. Видно также, что в логарифмической метаморфозе экспериментальные точки хорошо укладываются на прямые линии, обобщающие интересующие нас зависимости. Сами прямые $\eta = f(\dot{\gamma})$ и $\lambda = f(\dot{\epsilon})$ почти взаимно параллельны и лишь смещены друг относительно друга по шкалам соответственно градиентов скорости сдвига и растяжения. Создается впечатление, что зерновой состав шихты мало влияет на соотношение значений сдвиговой и продольной вязкостей (а, значит, на профиль потока обмазки в заходной зоне).

На самом деле, близкий к параллельному друг другу ход реограмм $\eta = f(\dot{\gamma})$ и $\lambda = f(\dot{\epsilon})$ в логарифмических координатах вовсе не означает постоянство соотношения вязкостей λ/η . Это выявлено следующим образом. Сначала в логарифмическом масштабе раскрыли взаимосвязь сдвиговой и продольной вязкости обмазочных масс для каждого зернового состава смеси. Примеры таких зависимостей для трех зерновых составов с крайними и

Таблица 2. Результаты оценки температурной обстановки в зоне течения образков при диаметре насадки 4 мм

Расход образки, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	Градиент скорости сдвига, с^{-1}	Температура струи, $^{\circ}\text{C}$		
		ГС-1	ГС-4	ГС-6
1	11,8	34	37	37
5,1	203,0	58	54	53
25,5	1015,0	76	91	77

средней долей мелкой фракции в шихте показаны на рис. 5. Затем оценили наклон прямых $\lg \lambda / \lg \eta$ к оси абсцисс. С увеличением доли фракции -0063 в шихте он сначала уменьшается, а после достижения минимального значения — возрастает (рис. 6). В связи с этим значение конвергентного угла α_0 неоднозначно реагирует на изменение зернового состава шихты и режимов течения обмазочной массы. Из рис. 7 следует, что при низких и средних градиентах скорости сдвига угол конвергенции тоже изменяется в зависимости от доли мелкой фракции в шихте по экстремальному закону (ход ее антибатен зависимости P_0 от доли тонких фракций в шихте, а максимум приходится на 50 % мелкой фракции).

В этом случае мелко- и крупнозернистый наполнитель провоцирует узкие профили потока образков, следствием чего может быть опережающий выток его внутренних слоев по сравнению с внешними слоями. Обычно узкие профили потока провоцируют пульсирование и закручивание струи, т. е. положение таких потоков в принципе не может быть стабильно ориентировано в пространстве. Использование же шихт с промежуточной зернистостью, обладающих, как правило, и наиболее широким распределением зерен по размерам, способствует образованию при низких скоростях течения более рассредоточенного и, следует полагать, более стабильно ориентированного потока в пространстве.

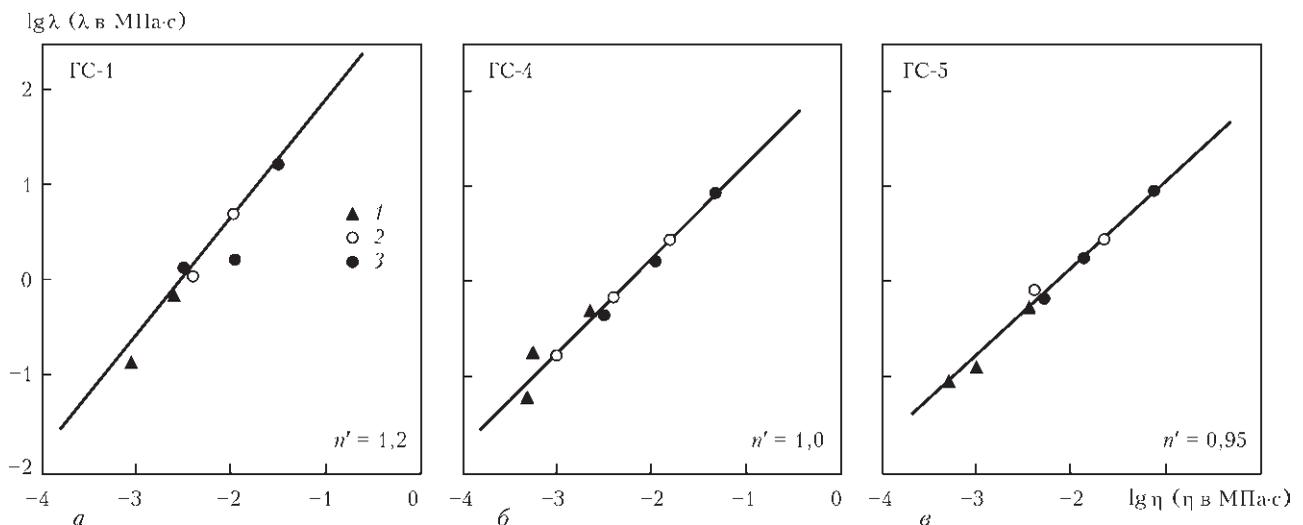


Рис. 5. Взаимосвязь продольной (λ) и сдвиговой (η) вязкости электродных обмазочных масс с разным зерновым составом шихты (а-в): 1 — $d_k = 6$ мм; 2 — 4; 3 — 2

$$n' = \lg(\lambda) / \lg(\eta)$$

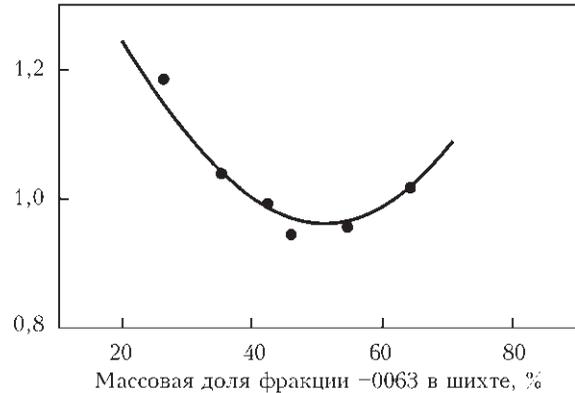


Рис. 6. Влияние зернового состава шихты на соотношение продольной и сдвиговой вязкостей электродных обмазочных масс серии ГС

С увеличением градиента скорости сдвига максимумы на кривых постепенно сглаживаются и при градиентах $(1 \dots 2) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, которые ожидаются при скоростях истечения образки в реальных условиях опрессовки электродов, указанные зависимости становятся монотонными. При этом образки с крупнозернистым наполнителем, у которых доля мелкой фракции составляет 20...25 мас. %, образуют более широкие профили потока. Поток с таким профилем должен стабильнее ориентироваться в пространстве. В нем опережающее истечение материала в ядре, а следовательно, возникновение периферийных застойных зон менее вероятно.

Образки со средне- и особенно мелкозернистым наполнителем (у которых доля фракции -0063 составляет 40 и 60...65 мас. % соответственно) при этих режимах течения почти сохраняют начальный профиль напорных потоков. Причины таких изменений могут быть связаны как с неизотермическими условиями течения, так и с различной структурой сравниваемых обмазочных масс.

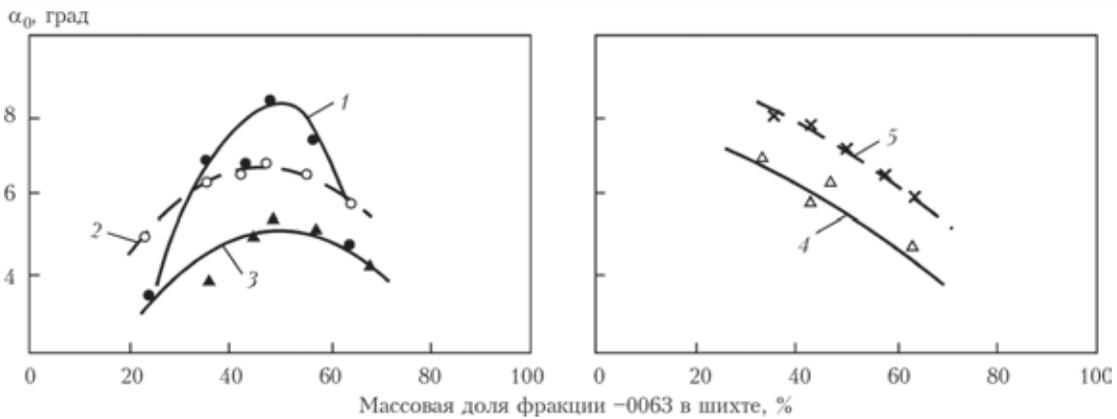


Рис. 7. Влияние зернового состава шихты и скорости течения обмазочной массы на значение естественного конвергентного угла ее напорного потока в предкапиллярной зоне: 1 — $\dot{\gamma} = 118 \text{ c}^{-1}$; 2 — 203; 3 — 318; 4 — 1015; 5 — 2550

Из табл. 2 видно, что диссипативный разогрев их в режиме течения ползучести ($Q = 1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) незначителен (до 34...37 °С) и одинаков для всех. Он вряд ли может повлиять на вязкостные характеристики обмазок и не позволяет судить об их структурных особенностях. С увеличением градиента скорости сдвига обмазки разогреваются до более высокой температуры, наиболее интенсивно обмазка ГС-4. Поскольку доля кинетически свободного жидкого стекла в межзеренном пространстве у этой обмазки наибольшая, она менее структурирована, чем обмазки ГС-1 и ГС-6. Диссипативный разогрев ее не вуалируется энергетическими затратами на разрушение структуры, и это является причиной столь резкого повышения температуры. Следующая по степени структурированности обмазка ГС-1 с крупнозернистым наполнителем. Она разогревается до температуры 76 °С, но с несколько более высоким промежуточным темпом по сравнению с обмазкой ГС-4. Обмазка ГС-6 выходит на тот же уровень температуры с наименьшей промежуточной скоростью. Следовательно, у нее следует ожидать наибольший уровень структурированности.

Выше показано, что изменение функции $\alpha_0 = f(-0063)$ этих же обмазок также демонстрирует неоднозначную реакцию на увеличение скорости сдвига, что говорит в пользу высказанного ранее предположения о том, что мы имеем дело с материалами с разными реологическими структурами.

В этом также можно убедиться, сравнив конфигурацию приведенных на рис. 8 экструзионных (деформационных) $P = f(t)$ кривых, полученных при исследовании различных обмазочных масс. Указанные кривые описывают изменение давления с момента пуска вискозиметра, включая выход на максимум, последующий спад, вызванный истечением обмазки, разрушением ее структуры и релаксацией накопленных напряжений, вплоть до установления давления, соответствующего стационарному истечению обмазки.

При этом следует учитывать, что при постоянном секундном расходе обмазки Q скорость ее деформации в ходе экструзии возрастет по мере уменьшения диаметра капилляра. Конфигурация указанных кривых свидетельствует о том, что сопоставляемые друг с другом обмазки должны отличаться между собой соотношением вязкости и упругости, накопленной в процессе экструдирования [7].

Как следует из рис. 8, б, обмазка ГС-4 характеризуется постоянной крутизной фронта нарастания давления во времени, независимо от скорости деформации. Она, единственная из трех, оказалась способной преодолеть сопротивление капилляра диаметром 1 мм при $Q = 25,5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Исходя из положений теории вязкоупругости, это свидетельствует о низкой способности материала накапливать упругие напряжения в ходе предстационарной стадии напорного течения.

У обмазок ГС-1 и ГС-6 с избытком крупно- и мелкозернистого наполнителя фронт нарастания давления после начала деформирования тем круче, чем выше скорость экструзии. Следовательно, с возрастанием скорости экструзии они интенсивнее накапливают упругие напряжения и уменьшают долю полезной энергии, которая расходуется на экструдирование обмазки.

Течению обмазок сопутствует релаксация напряжений. Чем выше заданная скорость деформации, тем в большей степени, после начала деформирования, нарастает давление, обгоняя скорость релаксации напряжений. Именно это усиливает накопление упругих деформаций. У обмазки ГС-6 с мелкозернистым наполнителем этот процесс выражен в большей мере, о чем свидетельствует почти прямолинейный фронт нарастания давления, с одной стороны, и острая форма пика давления в максимуме, с другой. Обмазка ГС-1 менее структурирована, поэтому на подходе к пику восходящая ветвь экструзионной кривой заметно отклоняется.

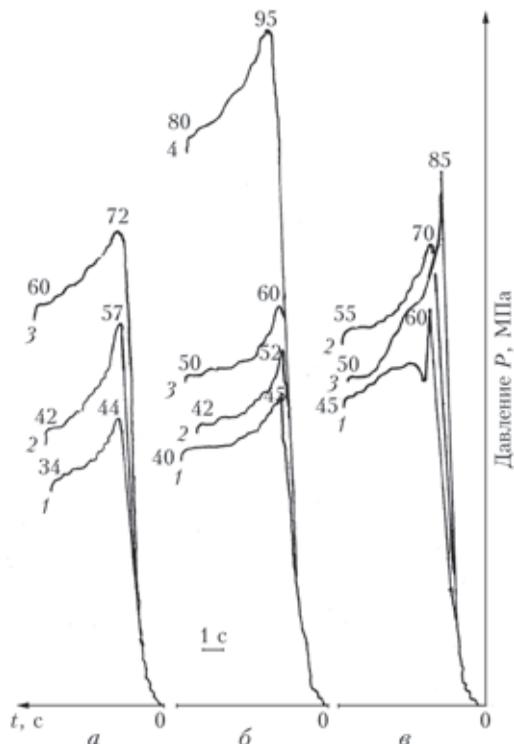


Рис 8. Кривые экструзии обмачочных масс ГС-1 (а), ГС-4 (б), ГС-6 (в) с разным количеством мелкой фракции в шихте, проходящей сквозь капилляры диаметром 6 (1), 4 (2), 2 (3) и 1 (4) мм при $Q = 1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$

няется от прямой линии, что вызвано накладкой вязкого течения на упругое деформирование.

После прохождения максимума релаксация накопленных напряжений у сравниваемых образцов происходит по-разному. У образки ГС-6, экструдированной на малых скоростях (рис. 8, в, кривая 1), релаксация мгновенных упругих напряжений провоцирует короткий, но резкий провал давления. После провала оно частично восстанавливается, а затем продолжает плавно понижаться вплоть до наступления стационарного течения. При средней скорости экструзии (рис. 8, в, кривая 2) давление в максимуме сглажено, структурная ветвь понижается без промежуточного спада. Уровень давления в состоянии стационарного течения выше, чем на предыдущей кривой. При наибольшей скорости течения (рис. 8, в, кривая 3) структурная ветвь кривой вслед за острым максимумом понижается столь интенсивно, что опускается ниже, чем у аналогичной кривой, зарегистрированной при промежуточной скорости экструзии. Именно такую аномалию деформационных кривых обычно связывают с высокой структурированностью коагуляционных дисперсий. У образков ГС-1 и ГС-4 такой аномалии не наблюдалось.

Большая степень структурированности образки ГС-6 по сравнению с образкой ГС-1 объясняется следующим образом. При увеличении доли мелкой фракции в шихте сверх оптимального значения возрастает не только доля межзеренных пу-

стот (а следовательно, уменьшается количество кинетически свободной связки из жидкого стекла), но и удельная поверхность частиц, которую должно покрыть связующее. Тем самым система как бы переводится в состояние с большим объемным наполнением, т. е. с более высокой концентрацией контактирующих друг с другом твердых частиц. Вследствие указанных факторов толщина межзеренной пленки уменьшится, а молекулярное взаимодействие частиц наполнителя, наиболее интенсивное в точках их соприкосновения, существенно возрастет. Это подтверждается повышением прочности коагуляционной структуры P_m (см. табл. 1).

Результаты наших экспериментов согласуются с выполненными в работе [8] расчетами, которые показывают, что положение минимума вязкости суспензий с мультимодальным наполнителем все больше отклоняется в сторону меньшей концентрации крупных фракций в наполнителе по сравнению с той, которой обеспечивается самой плотной для данного зернового состава упаковки частиц.

Подобного эффекта можно достигнуть, если вязкое жидкое стекло заменить низковязким, уменьшив при этом в разумных пределах его долю в обмачочной массе. В этом случае релаксация упругости образки ГС-6 не компенсируется демпфирующей способностью низковязкого жидкого стекла и может спровоцировать пульсацию ее потока в режиме течения ползучести или разного рода иррегулярные эффекты при режимах течения, превышающих по скорости деформацию ползучести. И то и другое может, в частности, стать причиной разнотолщинности покрытия.

Пульсирование потоков образков ГС-1 и ГС-4, в наполнителе которых имеется меньше мелких фракций, в этом случае не наблюдалось.

Выводы

1. Исследованы реологические характеристики электродных обмачочных масс в зависимости от зернового состава шихты. Долю мелкой фракции в шихте изменяли в пределах, близких к предписанным в технологической документации границам (40...60 % частиц мельче 0,063 мм). Выявлено, что с точки зрения минимизации энергетических затрат, необходимых для экструзионного нанесения образков на стержни, в шихте должно содержаться 50 % мелкой фракции. Отклонение ее доли в большую или меньшую сторону от указанного оптимума, даже в столь узких пределах, существенно повышает энергетические затраты на опрессовку электродов, особенно на скоростях, которые используют в реальных условиях их изготовления.

2. С позиций гидродинамической теории такая зависимость объясняется повышением вязкости обмазочных масс, вызванным увеличением свободного объема пустот между зернами наполнителя, который с определенным избытком должен быть заполнен жидким стеклом, прежде чем обмазка приобретает способность к напорному течению. Заполнение мелкими частицами пустот между крупными зернами наполнителя вытесняет из них жидкое стекло, превращая его в кинетически свободную жидкость. Это и приводит к уменьшению вязкости обмазки.

3. Обмазки, содержащие в избытке крупные или мелкие фракции по сравнению с установленным оптимумом, не идентичны друг другу по структуре. Об этом свидетельствуют характер изменения температуры обмазки, величины конвергентного угла, который образуется в заходной зоне, а также формы экструзионных кривых при увеличении скорости деформации. Профиль потока обмазок с крупнозернистым наполнителем с увеличением скорости напорной струи расширяется, и это способствует его стабилизации в пространстве и времени. У потока обмазок с мелкозернистым наполнителем он остается почти таким же узким, как и при скоростях течения ползучести, что с технологической точки зрения является неблагоприятным моментом.

4. Результаты анализа формы экструзионных кривых $P = f(t)$ свидетельствуют о том, что напорное течение обмазки с равными долями крупно- и мелкозернистого наполнителя осуществляется по вязкостному механизму с наименьшими энергетическими затратами. Течение обмазки с избытком крупнозернистого наполнителя тоже осуществляется по вязкостному механизму, но с большей вязкостью, так как часто стекло идет на заполнение пустот. Их вязкость выше, чем обмазок с равными долями крупно- и мелкозернистого наполнителя, поскольку часть жидкого стекла расходуется на заполнение межзеренных пустот наполнителя, объем которых в этом случае больше, так как нет необходимого количества мелких частиц для их заполнения. Обмазки с избытком мелкозернистого наполнителя более структурированы, поскольку наряду с заполнением межзеренных пустот жидкостекольное связующее должно покрыть значи-

тельно более развитую поверхность мелких зерен. Возрастает молекулярное взаимодействие зерен наполнителя и прочность образованной ими структуры, которая легко разрушается при сдвиговой деформации, сопровождаемая специфическими эффектами нестационарности потока.

5. При рассмотрении особенностей напорных течений электродных обмазочных масс на высоких скоростях деформирования наряду с положениями гидродинамической теории вязкости высококонцентрированных дисперсных систем следует учитывать особенности образованных ими коагуляционных структур и их реакции на изменение скорости деформирования.

1. *Разработка технологии производства низководородных электродов / А. Е. Марченко, И. К. Походня, Н. В. Скорина и др. // Свароч. пр-во. – 1994. – № 5. – С. 14–18.*
2. *Марченко А. Е. О реологических методах оценки технологических свойств электродных обмазочных масс // Информ. материалы СЭВ. Координац. центр по пробл. «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки различных материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создания эффективных сварочных материалов и оборудования...»». – Киев: Наук. думка, 1978. – Вып. 1. – С. 121–128.*
3. *Марченко А. Е. Исследование концентрированных суспензий мрамора в жидком стекле как реологической модели электродных обмазочных масс // Сб. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. «Сварочные материалы. Дуговая сварка. Материалы и качество», г. Краснодар, пос. Агой, 17–21 июня 2013. – Краснодар, 2013. – С. 98–115.*
4. *Марченко А. Е., Гнатенко М. Ф. Особенности течения электродных обмазочных масс, обнаруженных капиллярным пластометром // Информ. материалы СЭВ. Координац. центр по пробл. «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки различных материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создания эффективных сварочных материалов и оборудования...»». – Киев: Наук. думка, 1980. – Вып. 1. – С. 106–117.*
5. *Марченко А. Е. О реологических свойствах электродных обмазочных масс в конвергентной зоне при опрессовке электродов // Сб. докл. VI Междунар. конф. по свароч. материалам «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество. Конкурентоспособность», Краснодар, 6–9 июня 2011 г. – Краснодар, 2011. – С. 223–232.*
6. *Cogswell F. N. Converging flow of polymer melts in extrusion dies // Polym. Eng. and Sci. – 1972. – 12, № 2. – P. 64–70.*
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. *Мошев В. В. Вязкостные закономерности высоконаполненных полимеров // Реология (полимеры и нефть): Труды Всесоюз. школы по реологии, 1977. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1977. – С. 53–64.*

Поступила в редакцию 23.04.2014