

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ОПРЕССОВКЕ*

А. Е. МАРЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С применением осциллографических и математико-статистических методов изучены закономерности образования разнотолщинности покрытия экспериментальных электродов УОНИ 13/55 с диаметром стержня 4 мм при их изготовлении на угловом гидравлическом прессе в условиях, максимально приближенных к производственным. Выявлено, что изменение разнотолщинности покрытия это непрерывный, многостадийный, немонотонный (волнообразный) и гармонический процесс, в котором возмущения, возникшие на стартовой стадии, могут ощущаться на последующих стадиях опрессовки электродов. Разнотолщинность покрытия вызывается, прежде всего, нарушением баланса упругости и вязкости, который зависит от консистенции электродных обмазочных масс. Вместе с тем на вероятность образования разнотолщинности покрытия существенно влияют конструктивные особенности формующего тракта электрообмазочного пресса. Библиогр. 15, рис. 7.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, опрессовка, разнотолщинность покрытия, осциллографирование, математическая статистика

Вязкоупругость электродных обмазочных масс следует считать главной причиной разнотолщинности покрытия. С точки зрения качества сварных швов — это опаснейший дефект, возникающий, прежде всего, по причине быстрой разрядки упругих напряжений, накапливаемых обмазкой в ходе ее нанесения на стержни [1–5]. Множество из предполагаемых причин разнотолщинности покрытия, прежде наиболее часто обсуждавшихся в публикациях, например [1, 6, 7], не всегда являются основными. Тем не менее, многие из них в определенной степени могут облегчить проявление разнотолщинности покрытия, вызванной указанной эластической турбулентностью обмазок.

Другой важной причиной разнотолщинности покрытия следует рассматривать естественное стремление обмазки в ходе взаимодействия в прессовой камере с упругим стержнем найти конфигурацию поперечного сечения оболочки, обеспечивающую минимально возможные затраты энергии на течение. Оно, по-видимому, осуществляется по гидродинамическому, т. е. более сложному механизму, чем традиционная (как, например, в работе [1]) схема упругой деформации консольной части стержня под напором обмазки, нагнетаемой в прессовую камеру. Иначе трудно объяснить, почему разнотолщинность покрытия

возникает при изготовлении электродов на прямо-точных прессах.

В самых неблагоприятных случаях накопление и разрядка упругих напряжений идут непрерывно, протекают очень быстро и непредсказуемо. Так же быстро изменяется и разнотолщинность покрытия. Разобраться в этом стохастическом процессе должно помочь применение равноценных по быстрдействию методов ее исследования. К числу таких методов относится осциллографирование, сочетающееся с математико-статистической обработкой зарегистрированных результатов.

В ИЭС им. Е. О. Патона осциллографические исследования разнотолщинности начаты давно [8]. Однако многие из полученных результатов стало возможным проанализировать и объяснить с позиций избытка упругости над вязкостью лишь сейчас, когда вязкоупругую природу обмазок можно считать вполне доказанной реологическими исследованиями [2–5].

Объект и метод исследования. Исследования проведены при изготовлении экспериментальных электродов УОНИ 13/55 с участием персонала Экспериментального производства ИЭС им. Е. О. Патона на промышленном технологическом оборудовании, которым оно экипировано.

Вещественный состав шихты для покрытия электродов (мас. %): мрамор — 51,5; флюоритовый концентрат — 19; кварцевый песок — 6; ферромарганец среднеуглеродистый — 6,5; ферросилиций ФС-45 — 7; ферротитан — 7; слюда-мусковит — 3 и очищенная Na-КМЦ — 1 (сверх 100).

*По материалам доклада, представленного на IX международной конференции «Дуговая сварка. Материалы и качество» (31 мая–03 июня 2016 г., г. Волгоград, РФ).

При подготовке оборудования, наладке процесса изготовления электродов, методики осциллографирования разнотолщинности, оцифровки осциллограмм и статистической обработки результатов использовали следующий фракционный состав смеси, выраженный как суммарные массовые остатки на сетках 0315, 02, 016, 01 и 0063 по ГОСТ 6613–86: 2, 10, 15, 25 и 35 мас. %, соответственно. Проход через сетку 0063 – 65 %. Обмазку готовили на NaK жидком стекле с модулем 3,05, плотностью 1,435 г·см⁻³ и вязкостью 900 мПа·с, доза стекла — 30 мас. %.

Сухую смесь для обмазки готовили в цилиндрическом плужном смесителе интенсивного типа, а обмазочную массу в однокатковом смесителе.

Электроды изготавливали на гидравлическом электрообмазочном прессе фирмы «Хейвелок Инжиниринг» с угловой подачей обмазочной массы (90°). Диаметр стержня электродов 4 мм, толщина покрытия 1,1...1,2 мм. Скорость опрессовки 420 электродов в минуту.

Проволока и материалы покрытия отвечали требованиям соответствующих ГОСТов, а допуски на отклонения размеров формирующего инструмента – требованиям действующей нормативной документации. Фильтры, наконечники стержнепроводки и стержнеподающие ролики в других целях, кроме экспериментов, выполняемых в настоящей работе, не использовались.

Поток обмазочной массы, предварительно повернутый вдоль направляющей стержней, в прессе «Хейвелок Инжиниринг» редуцируется трижды:

- в двуканальной щелевой массопроводке, фиксирующей направляющую стержней;
- в прессовой камере, расположенной между торцом наконечника направляющей стержней и конусом калибрующей втулки;
- в канале калибрующей втулки.

Поворот потока обмазки и каждое из названных ее редуцирований осуществляются в переходном режиме течения, поэтому являются источником гидродинамических возмущений в нем. Средний градиент скорости сдвига, которым определяется сопротивление, преодолеваемое обмазкой во время редуцирования, пропорционален степени обжатия струи и определяется характерным размером формирующего канала. Для кругового цилиндрического канала, как у калибрующей втулки, — это диаметр, а для плоского или кольцевого (щелевого) канала, как у массопроводки, — его ширина. Наряду с этим ускорение потока обмазки в двуканальной массопроводке изменяется еще в 2 раза в зависимости от того, позволяет ли консистенция обмазки пройти сра-

зу обе части щелевого канала или только одну из них. Штатный зазор между торцом наконечника стержнепроводки и калибрующей втулкой 1,5 мм.

Для непрерывной регистрации разнотолщинности покрытия в процессе опрессовки электродов использован специализированный монитор с блоком электромагнитных датчиков, которым комплектуется пресс фирмы «Хейвелок Инжиниринг». Вместе с калибрующей втулкой блок закрепляется на предусмотренной для этого базовой площадке пресса. Положение калибрующей втулки, в том числе и на ходу, регулируется четырьмя болтами с известным шагом резьбы. Общий вид прибора в рабочем положении приведен на рис. 1 [9].

Электромагнитные сигналы, пропорциональные горизонтальной и вертикальной координатным составляющим вектора разнотолщинности электродного покрытия (КС ВРП), сформированные в электронном блоке монитора, в штатной экипировке считываются со шкал двух контрольных стрелочных приборов. О фактическом состоянии разнотолщинности судят по отклонению стрелок от нуля. Для непрерывной регистрации этих отклонений мы использовали шлейфный осциллограф 8SO-4. Запись вели на аэрофотоплёнке чувствительностью 1200 ед. по ГОСТ 100691–63 шириной 120 мм. Плёнка очень быстро проявляется на свету. Скорость записи выбрана в ходе предварительных опытов и составляла 10 мм/с. Данные, зарегистрированные на плёнке, переводили в цифровую форму во время ее последующей обработки, определяя координаты точек, удаленных друг от друга на кривых на расстоянии 5...6 мм.

Обмазочную массу готовили в количестве 50 или 100 кг (замес), брикетировали и делили на три зарядки пресса, в каждой не более двух брикетов. В ходе выпрессовки первой зарядки настраивали подачу обмазки и стержней, упреждающее взаимное смещение осей калибрующей втулки и стержней, положение шлейфовых лучей, а также проводили отладку записи на плёнке. В ходе выпрессовки второй зарядки делали основные запи-

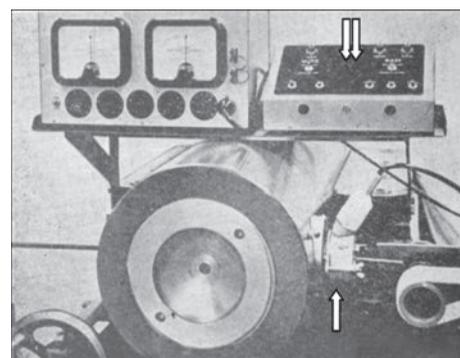


Рис. 1. Головка-датчик для измерения разнотолщинности покрытия, установленная на прессе «Хейвелок Инжиниринг» (указана стрелкой)

си продолжительностью от 50 до 360 с. Последнюю зарядку использовали как контрольную, а в случае необходимости — для проверки «живучести» обмазок брикетки выдерживали в течение до одного часа. Их хранили в условиях, традиционно используемых в производстве для предотвращения потери влаги.

В ходе опрессовки через каждые 7...10 с отбирали по одному электроду. Их тут же контролировали на переносном концентрометре (указан на рис. 1 сдвоенной стрелкой). Результаты сразу записывали на пленке (летучий контроль). В конце зарядки отбирали разовые пробы в количестве не менее 10 электродов, которые маркировали, а затем контролировали и результаты статистически обобщали в лабораторных условиях (групповой контроль).

Результаты летучего и группового контроля использовались для корректировки настройки прессы, осциллографа с целью уточнения положения на пленке нулевых линий (X_0, Y_0), предназначенных для отсчета горизонтальных (x_i) и вертикальных (y_i) составляющих ВРП. Смещение x_i вверх или вниз от нуля означало, соответственно, утолщение правой или левой половины оболочки покрытия. Аналогичное смещение y_i свидетельствовало об утолщении верхней или нижней ее частей.

Пользуясь значениями x_i и y_i , рассчитывали индивидуальные значения вектора разнотолщинности покрытия (e_i) и угла его ориентирования в сечении, перпендикулярном оси электрода ($\text{tg}\alpha_i = x_i/y_i$), затем строили карту e_i в сопоставлении с линиями средних (e_c) и граничных значений, регламентированных ГОСТ 9466–75.

Значения и угол ориентации e_i являются случайными величинами. Уже в ходе предварительных опытов была выявлена необходимость использования статистических методов их оценки и представления. С этой целью индивидуальные значения e_i , найденные по 100 замерам, группировали в условные выборки, каждая из пяти значений e_i . Количество выборок 20 шт. Рассчитывались выборочные средние (e_c), среднеквадратичные отклонения (s_p) и размахи (R), а также их генеральные средние значения по 20 выборкам (E_c, S_p и R_c). Представленные в графическом виде эти данные четче отражают изменчивость процессов и их тенденции, чем индивидуальные показатели [10].

Характер осциллограмм КС ВРП. Кривые горизонтальной и вертикальной составляющих ВРП, как и получаемые на капиллярном пластометре ОБ 1435 [3] экструзионные кривые обмазочных масс, отражают стартовую, структурную, установившуюся и заключительную стадии опрессовки.

Запись в большинстве опытов начинали не сразу после пуска стержнеподающего станка. Поэто-

му на коротких осциллограммах, которые отражают ход опрессовки в течение 15...35 с, стартовая стадия, как правило, не регистрируется. Иногда на пленку попадала только заключительная часть ее структурной (нисходящей) ветви, переходящей в, условно говоря, установившуюся ветвь. Как следует из рис. 2, у обмазки, использованной нами для отработки методики, стартовая часть осциллограмм КС ВРП имеет ярко выраженный осциллирующий вид. Причем у вертикальной составляющей — это почти идеальная синусоида со слабо выраженной экстремальностью осевой линии, постепенно затухающая и, в конце концов, приобретающая форму нерегулярных колебаний, а горизонтальная является таковой с самого начала. При этом возмущения, зарегистрированные на осциллограмме вертикальных составляющих как смещения луча от шлейфа вверх или вниз, почти синхронно отражаются на осциллограмме горизонтальных отклонений как смещение соответствующего луча вправо-влево (на рис. 2 отмечены стрелками). Это объясняется довольно упругой консистенцией исследуемой обмазки и конфигурацией формирующей зоны использованного прессы, в частности, расположением по вертикали двух массопроводящих щелей, в результате чего вязкоупругая обмазка имеет возможность периодически изменять траекторию потока, перескакивая из верхнего окна в нижнее и наоборот. Горизонтальная составляющая дополнительно отражает следствия гидродинамических возмущений, возникающих еще до прохождения обмазкой сквозь щели массопроводки, которые вызваны поворотом потока на 90°; на них накладываются циклы, связанные с поочередными прохождениями обмазкой упомянутых выше двух щелевых каналов массопроводки.

Протяженность синусоидального участка вертикальной осциллограммы зависит от изменения консистенции обмазки, вызванного выдержкой брикетов перед использованием. Для первой, самой свежей зарядки эту стадию не удалось зарегистрировать из-за продолжительной настройки прессы (получен лишь стационарный участок длительностью 45 с.). Протяженность синусоидального участка во второй зарядке составляет 15 с, а

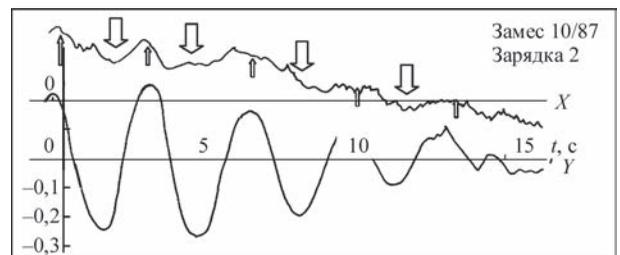


Рис. 2. Осциллограммы КС ВРП, полученные при опрессовке электродов УОНИ 13/55 (X — горизонтальная, Y — вертикальная составляющая; стрелками отмечены отклики вертикальной составляющей на изменение горизонтальной компоненты)

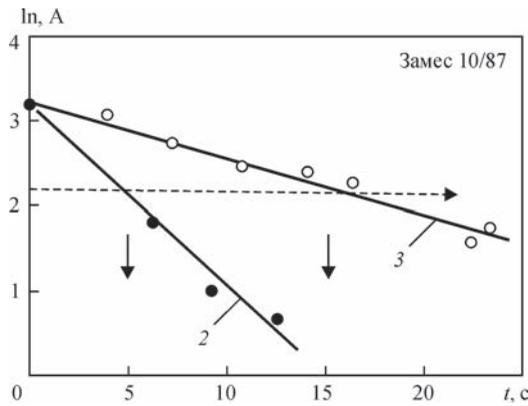


Рис. 3. Сравнение амплитуд колебаний вертикальной составляющей вектора разнотолщинности покрытия на протяжении стартовой стадии опрессовки электродов из второй (2) и третьей (3) зарядки обмазки

в третьей, которая дольше первых двух выдерживалась перед использованием, — вдвое больше.

Результаты расчета показателя затухания синусоидальных амплитуд, записанных при опрессовке электродов из второй и третьей зарядки обмазки, представлены на рис. 3. Видно, что, несмотря на относительно непродолжительную выдержку обмазки в состоянии брикета, период ее релаксации увеличился в 3 раза. Консистенция обмазки изменилась за счет процессов структурообразования, которые прошли в ней в течение этого времени.

Нами установлены следующие общие закономерности изменения формы кривых КС ВРП в зависимости от консистенции обмазок для низководородных электродов при их изготовлении на прессе «Хейвелок Инжиниринг». Для очень упругих обмазок обе осциллограммы $x_i = f(t)$ и $y_i = f(t)$ в стартовой стадии опрессовки имеют вид синусоид, правда, не всегда столь идеальных по форме, как на рис. 2. В дальнейшем они постепенно вырождаются в осциллирующие кривые иррегулярного вида, причем для осциллограмм $x_i = f(t)$ это часто наступает раньше, чем для $y_i = f(t)$.

Для обмазок, близких по консистенции к представленной в настоящей работе, синусоидальной является только осциллограмма $y_i = f(t)$ и то лишь в начале опрессовки. Для еще более мягких обмазок осциллограмма $y_i = f(t)$ почти сливается с нулевой линией, в то время как кривая $x_i = f(t)$ дольше сохраняет иррегулярный вид. Для жидкообразных обмазок обе осциллограммы с самого начала имеют вид малоамплитудных синусоид.

Кривые эволюции вектора разнотолщинности покрытия. Эволюция индивидуальных значений вектора разнотолщинности покрытия представлена на рис. 4. В стартовой стадии она имеет вид не столь идеальной синусоиды, как вертикальная составляющая ВРП. Наряду с этим, между большими амплитудами местами вклиниваются одна или две слабые амплитуды. И те

и другие постепенно (как и синусоиды КС ВРП) затухают, свидетельствуя о релаксационной природе процесса, который они отражают. Затем они эволюционируют в своего рода гармоническую функциональную зависимость с более чем двумя переменными. Пока удалось выделить четыре гармоники с частотой колебаний от 1 до $0,04 \text{ с}^{-1}$.

ВРП изменяется в пульсирующем режиме не только по величине, но и по ориентации в пространстве. Об этом можно судить, наблюдая за изменениями «следа» ВРП как проекции e_i на плоскость, перпендикулярную электродам, выходящим из головки прессы. Вид такого рода фазовых траекторий, полученных в течение стартовой стадии опрессовки электродов, представлен на рис. 5. Начальная точка в каждой выборке отмечена крестиком, конечная — стрелкой. Первые две выборки состоят из 20, а третья — из 10 электродов.

Как видим, с самого начала амплитуда пульсаций по y_i (особенно положительной ее части) уменьшается одновременно с менее заметным уменьшением x_i . В результате происходит общее сжатие x_p и y_p , а, следовательно, одновременно с уменьшением величины e_i происходит постепенное его смещение в нулевую область.

Дальнейшие изменения величины и ориентации e_i оценивали по следующим десяти выборкам электродов, выделенным из стационарной стадии. Они показаны на рис. 6 в виде лепестков, включающих 10 индивидуальных значений x_p и y_p из каждой выборки.

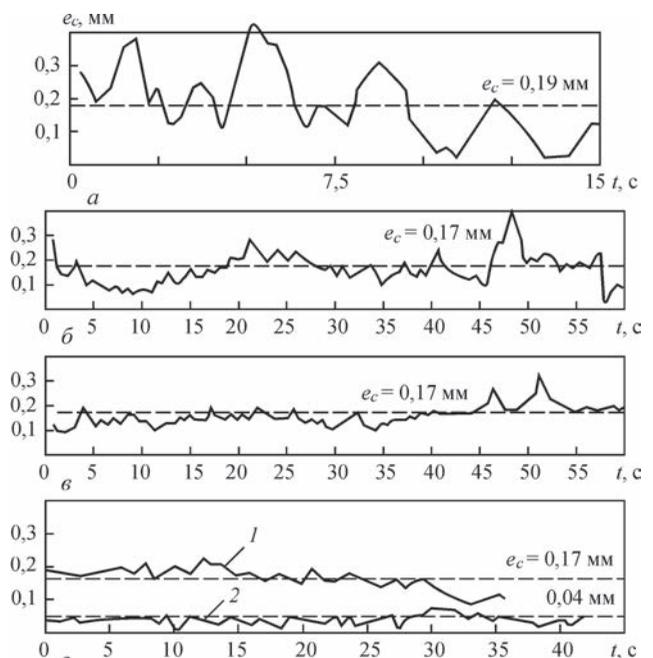


Рис. 4. Эволюция ВРП электродов, изготовленных в течение выпрессовки второй зарядки обмазки: стартовая (а), стационарная (б, в) и заключительная (г) стадии из первой (1) и второй (2) зарядки обмазки; e_p, e_{ic} — индивидуальные и выборочные средние значения разнотолщинности покрытия

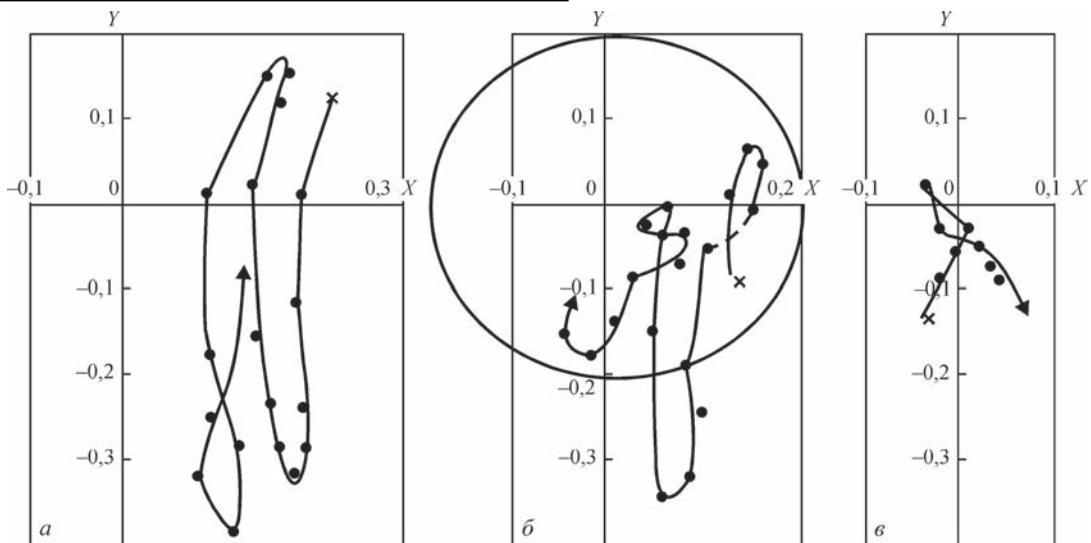


Рис. 5. Вид фазовых траекторий вектора разнотолщинности покрытия в течение стартовой стадии опрессовки электродов. Номера замеров разнотолщинности, включенных в выборки: а — 1...20; б — 21...40; в — 41...50

Вместе с рис. 4 он показывает, что с точки зрения эволюции ВРП стационарной эту стадию можно называть с большой натяжкой. Вектор разнотолщинности покрытия электродов, опрессованных в течение этой стадии, сначала уменьшается, а затем резко возрастает, а дислокация изменяется по пульсирующей спирали, в виде последовательных вращательных переходов из III в IV, I, II, а затем снова в IV квадрант. В пределах каждой выборки, а также при переходе от выборки к выборке это происходит не монотонно, с разной скоростью на протяжении всего лишь 60-ти секунд. С учетом того, что каждую минуту из головки пресса выходило 420 электродов, скорость этих изменений в расчете на длину электрода поистине огромна, и объяснить это, исходя только с позиций изменения вязкости обмазки, как это многие пытались сделать до сих пор, невозможно. Для этого нужно одновременно учитывать из-

менения соответствующего по смыслу показателя упругости обмазки.

Эволюция статистических выборочных показателей ВРП. На рис. 7 отражены изменения выборочных средних и размахов разнотолщинности покрытия на протяжении «стационарной» стадии в сравнении с их средними выборочными значениями для каждой группы — начальной, средней и заключительной. Они отчетливее, чем e_p , отражают общую эволюцию разнотолщинности. У электродов начальной группы (а) заметно ощущаются последствия стартовой стадии процесса. За понижением e_p , которое имело место в конце стартовой стадии, следуют два всплеска, разделенные непродолжительной стабилизацией. В целом величина выборочных значений разнотолщинности растет, и этот рост продолжается в новой серии выборок (б), тоже волнообразно, хотя и в несколько более спокойной форме. Лишь в заключительной фазе (в) намечились признаки понижения этого показателя, но видимо только в качестве очередной нисходящей ветви волны. Косвенное подтверждение этому — постоянство значения генерального среднего E_c на уровне 0,17 мм.

Тем не менее, процесс постепенно успокаивается, о чем свидетельствует отраженное на рис. 7 уменьшение колебаний и генеральных средних выборочных значений размахов ($R_c = 0,090$ мм в начальной и 0,025 мм в заключительной серии выборок).

Мы не приводим выборочных среднеквадратичных отклонений e_p , хотя наряду с размахами рассчитывали их и учитывали при анализе полученных результатов. Характер их изменений такой же, как и у размахов. Но абсолютные значения в 2...3 раза меньше. Если возникает необходимость оценить долю скрытого брака по e_p , значение s_p должно учитываться обязательно [10].

Постоянство E_c в проанализированных выше выборках из электродов зарядки 2 не следует рас-

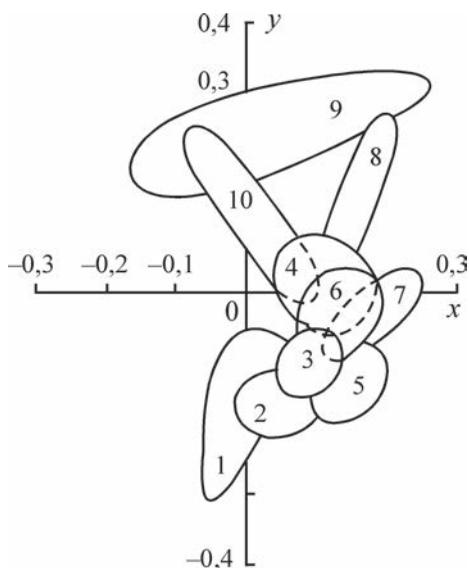


Рис. 6. Характер изменения показателей разнотолщинности покрытия электродов, опрессованных из обмазки зарядки 2. Цифрами отмечен номер выборки, каждая из 10 электродов

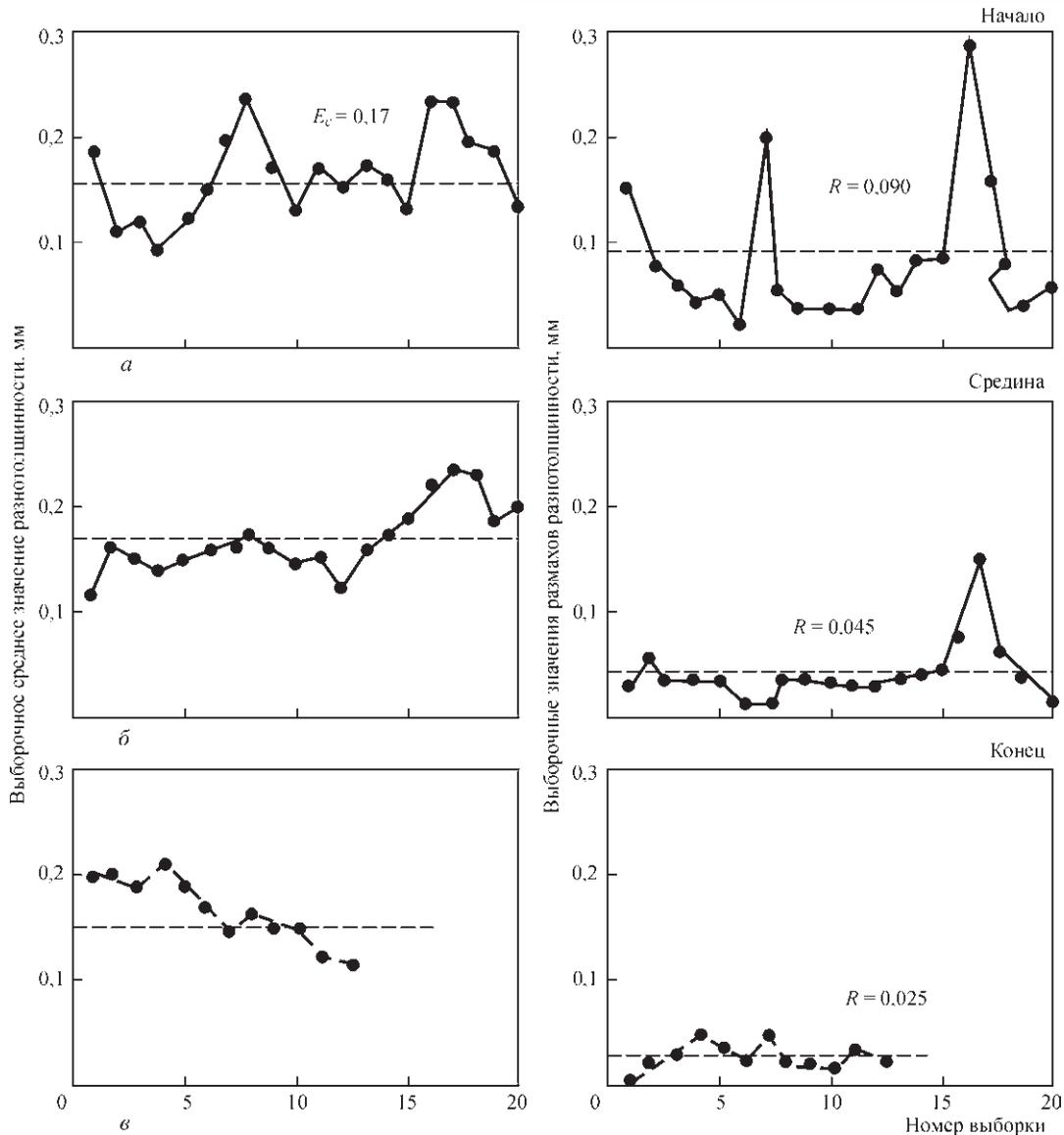


Рис. 7. Изменение статистических характеристик ВРП в ходе опрессовки электродов из обмазки в зарядке 2 (а, б, в — см. в тексте)

смагивать как свидетельство того, что их величина и дальше не может уменьшаться. Результаты, полученные при исследовании электродов первой зарядки, которые для сравнения приведены на рис. 4, г, показывают, что в этом случае E_c , в конце концов, понизилось до значений 0,04 мм (в зарядке 2) в сравнении с 0,17 мм. Разницу тоже можно в какой-то мере увязать с изменением консистенции обмазки в течение ее выдержки в брикетах.

Обсуждение результатов. Изложенные результаты исследований показывают, что главной причиной образования разнотолщинности покрытия является нестабильное течение обмазочной массы. Нестабильности в напорном потоке обычно возникают, когда упругость, накопленная в нем во время деформирования обмазки, превышает уровень, который может быть демпфирован ее вязкостью до того, как она встретится в прессовой камере со стержнем.

Разнотолщинность как раз и является одним из нежелательных видов быстрой разрядки избыточной упругости во время формирования оболочки из обмазки на стержне. Другой вид обсуждается ниже.

Накопление и релаксация упругих напряжений в напорном потоке обмазочной массы, из которой формируется электродное покрытие в головке пресса, следует рассматривать как непрерывный процесс, который стартует в момент, когда начинается течение обмазки, и может продолжаться, пока не будет полностью выработана зарядка массы. Результаты проведенных исследований показывают, что это:

– в целом, релаксационный процесс, в котором в благоприятных условиях статистическое среднее значение и показатели рассеяния разнотолщинности постепенно понижаются, т. е. улучшается общий баланс вязкости и упругости, прежде всего, за счет релаксации упругих напряжений;

– многостадийный процесс, характеризующийся разными на разных стадиях уровнями и соотношениями упругости и вязкости;

– «наследственный» процесс, в котором возмущения, возникшие на предыдущих, ощущаются на последующих его стадиях, включая в самом неблагоприятном случае и стартовую, и заключительную стадии;

– немонотонный, а, скорее, волнообразный процесс, в ходе которого разнотолщинность, понижаясь со временем, после достижения очередного минимума, вновь возрастает до прежнего или до несколько меньшего уровня;

– гармонический процесс, поскольку в пределах длительного цикла идут кратковременные циклы с меньшими амплитудами пульсирования.

Главные источники упругости — стартовая деформация обмазочной массы, которая вызывается ее объемным сжатием, с одной стороны, и поворот потока обмазки на 90° , существенно ускоряющий слои в его внешнем обводе. Действие первого источника начинается, когда шток переводится с маршевой скорости на рабочую. Релаксируя, они продолжают после включения стержнеподающего станка и заканчиваются после полной релаксации стартовой упругости. Продолжительность действия второго источника видимо действует на протяжении всего цикла прессования.

Возникшие в этот период упругие напряжения релаксируют разным путем и скоростью в каналах массопроводки, прессовой камере и калибрующей втулке. Накладываясь друг на друга, они проявляются в качестве гармоник на кривой эволюции показателя разнотолщинности. В каждой из них генерируется дополнительная упругая энергия благодаря редуцированию потока обмазки. Релаксация ее происходит на последующих стадиях формирования потока.

В этой сложной картине возникновения и релаксации упругих напряжений, провоцирующих разнотолщинность, требует выяснения, в чем же причины немонотонной эволюции ее значений в ходе опрессовки электродов. Для этого известные положения гидродинамики течения ньютоновской жидкости через кольцевой канал, образованный двумя неподвижными неконцентричными трубами, нужно уточнить, учитывая вязкоупругую природу электродных обмазочных масс. Наряду с этим вместо неподвижной внутренней трубы следует рассматривать упругий стержень, тоже склонный к обратимым деформациям, движущийся синхронно с оболочкой и имеющий, находясь в ней, определенную степень свободы в поперечных перемещениях.

В соответствии с гидродинамической теорией течения жидкостей объемная скорость потока жидко-

сти сквозь круглую трубу с внутренним сердечником круглого сечения зависит от осевого смещения сердечника относительно наружной трубы.

В случае их концентричного положения — жидкость в кольцевом зазоре течет, обволакивая сердечник слоем с симметричным профилем скорости. Чем больше сердечник смещен относительно концентричного положения, тем больше объемная скорость (расход) жидкости по широкому сечению зазора, несмотря на то, что величина общего сечения, по которому перетекает жидкость, остается неизменной [11, 12].

Этот вывод справедлив для напорных потоков ньютоновских, простых и сложных неньютоновских жидкостей, а также для вязкопластичных материалов, таких как тело Бингама. Он, в принципе, не зависит от того, вызывается ли несоосность покрытия и стержня небрежной предварительной настройкой элементов прессовой камеры, или она возникает как естественное смещение упругого стержня, вызванного упругостью обмазки. И в том, и другом случае увеличение степени несоосности приводит к увеличению статистического показателя рассеяния разнотолщинности. Таким образом, стремление кольцевого потока обмазки нарушить соосное положение калибрующей втулки со стержнем следует считать вполне естественным явлением. Этот вывод не теряет значения и для электродных обмазочных масс, которые по реологическим свойствам не являются жидкостями, и перемещаются синхронно со стержнем, а не в виде аксиально неподвижного ядра, как рассмотрено выше.

Наши исследования реологических свойств электродных обмазок показывают, что есть ряд причин, почему система «обмазка–стержень», выведенная из концентричного состояния, как правило не сохраняет максимальную разнотолщинность, при которой достигаются наиболее благоприятные энергетические условия для ее напорного течения. С определенной периодичностью она выходит из него, постепенно приближаясь к стационарному состоянию. Прежде всего следует учитывать, что увеличение объемной скорости течения обмазки, вызванное нарушением соосности втулки и стержня, сопровождается повышением градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ в режиме $\dot{\gamma} = \text{const}$, в котором происходит наибольший ее диссипативный разогрев [13].

И то, и другое уменьшает сдвиговую вязкость обмазки η и, в значительно большей степени, ξ — коэффициент первой разности нормальных напряжений. Он характеризует скорость уменьшения упругости обмазки под влиянием увеличения градиента скорости сдвига [5]. Таким образом, с повышением $\dot{\gamma}$, вызванным увеличением разнотолщинности, способность обмазки гасить ее

упругие показатели тоже должна возрасти, т. е. вероятность дальнейшего увеличения разнотолщинности покрытия со временем уменьшается. В результате этого каждый раз за периодом возрастания e_i следует ее снижение, система «стержень–покрытие» разряжается от упругих напряжений и постепенно достигает очередного минимума разнотолщинности.

После этого начинается новый ее цикл, поскольку достигнутые при этом $\dot{\gamma}$ и T будут способствовать накоплению упругих напряжений.

Нельзя упускать из виду, что упругие напряжения в напорном потоке могут релаксировать не только в поперечных (x_i и y_i) направлениях, но и вдоль перемещающегося электрода (направление z_i) с последствиями, которые не регистрируются принятым нами осциллографическим методом. Их можно оценить косвенным путем. Представим себе электрод в виде двухслойного стратифицированного потока, в котором стальной стержень заменен обмазкой, отличающейся от обмазки в наружном слое соотношением упругости и вязкости. Например, наполнителем обмазки для внутреннего слоя выберем порошок мрамора, а для наружного — шихту покрытия и наоборот. Консистенция сопоставляемых обмазок разная: пластическая прочность и давление экструзии у первой, более мягкой обмазки: $P_m = 0,35$ МПа, а $P_s = 6,0$ МПа, а у второй, более тугой, 1,95 и 23,5 МПа, соответственно. Представим сначала, что более мягкая обмазка находится внутри двухслойного брикета, а упругая — аксиально по отношению к нему снаружи. Эксперимент показывает, что, в полученном из такой заготовки экструдате внутренний слой разрывается на цилиндрические куски, разведенные вдоль оси материалом наружного слоя почти на одинаковые расстояния друг от друга. Когда же более мягкий компонент разместить снаружи двухслойного брикета, а упругий — внутри него, межфазная граница в экструдате остается сплошной, но приобретает волнообразную форму. В реальном электроде межфазная граница не может деформироваться подобным образом. Но периодическая продольная разрядка упругих напряжений, накопленных в процессе деформации обмазки, обволакивающей стальной прутки, может реализоваться как восстановление струи [14] путем проскальзывания оболочки покрытия вдоль поверхности стержня. В результате сцепление оболочки покрытия со стержнем нарушается.

Чем мельче наполнитель обмазки, тем выше прочность образца прокаленного из нее экструдата, но ниже прочность оболочки покрытия из нее же у прокаленных электродов [15]. Особенно, когда обмазка готовится на высокомодульном жидком стекле низкой вязкости.

Таким образом, есть основания полагать, что упругость обмазки, накапливающейся в ней при опрессовке электродов, не только вызывает разнотолщинность, но и, ослабляя в результате релаксации упругости адгезию покрытия со стержнем, может способствовать понижению конечной его прочности у прокаленных электродов.

Выводы

1. С применением осциллографических и математико-статистических методов изучены закономерности образования разнотолщинности покрытия экспериментальных электродов УОНИ 13/55 с диаметром стержня 4 мм при их изготовлении на угловом гидравлическом прессе в условиях, максимально приближенных к производственным. Значения вертикальных и горизонтальных составляющих вектора разнотолщинности регистрировались на аэрофотопленке, движущейся со скоростью $10 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ при скорости опрессовки 420 электродов в минуту. Продолжительность наблюдения в опыте изменяли от 30 до 240 с.

2. Результаты проведенных экспериментов позволяют считать, что разнотолщинность покрытия вызывается дисбалансом характеристик упругости и вязкости электродных обмазочных масс, возникающем в процессе экструзионного нанесения обмазки на прутки. Упругость нужно рассматривать как показатель, провоцирующий в результате мгновенных релаксаций накопленных упругих напряжений появление разнотолщинности покрытия, а вязкость — как демпфирующий фактор, ослабляющий или подавляющий неблагоприятную с этой точки зрения роль упругости.

3. Накопление и релаксация упругих напряжений в напорном потоке обмазочной массы, из которой формируется электродное покрытие в головке прессы, — это непрерывный, многостадийный, немонотонный (волнообразный) и гармонический процесс. В нем возмущения, ответственные за появления разнотолщинности, возникшие на предыдущих стадиях, ощущаются на последующих стадиях опрессовки, в числе которых в самом неблагоприятном случае могут быть даже заключительная стадия.

4. Вероятность образования разнотолщинности покрытия определяется консистенцией обмазочных масс и зависит от конструктивных особенностей формирующего тракта электрообмазочного прессы. Склонность к несимметричной конфигурации оболочки из обмазки на стержне — результат ее стремления обеспечить наиболее благоприятные энергетические условия потока. Степень отклонения стержня от соосного по отношению к оболочке положения зависит от того, как изменяется соотношение упругости и вязкости в резуль-

тате такого отклонения. В реальных неизотермических условиях на эволюцию этого соотношения наряду со скоростью накладывається вплив вязкостного разогрева обмазки, в результате чего эволюция становится циклической. Гармоники в пределах каждого цикла отражают влияние на нее центров генерирования упругости, которые вызывают нарушение стабильности течения обмазки (к примеру, ускорения, поворота, редуцирования, разделения и стратифицирования потока). Количество и разновидность этих центров зависят от конструктивных особенностей формующей головки электрообмазочного пресса.

5. Разнотолщинность покрытия, с одной стороны, тонко реагирует на изменение консистенции обмазочной массы и конфигурацию формующего тракта, а с другой стороны, ее значение при этом изменяется по величине и ориентации резко и непредсказуемо. В результате мониторинг процесса с целью улучшения качества продукции по этому показателю может стать весьма проблематичным. С точки зрения реологии обмазочных масс основным направлением их совершенствования с целью уменьшения разнотолщинности покрытия должно стать понижение их склонности к накоплению упругости в состоянии напорного течения.

1. Ворновицкий И. Н. Разнотолщинность покрытия – основной показатель качества электродов / И. Н. Ворновицкий // Сварочное производство. – 1989. – № 4. – С. 7–9.
2. Марченко А. Е. Разнотолщинность покрытия как индикатор состояния процесса и качества изготовления сварочных электродов / А. Е. Марченко // Электродное производство на пороге нового тысячелетия: материалы научно-технического семинара (г. Санкт-Петербург, 22–26 мая 2000 г.). – Череповец: Ассоциация «Электрод», 2000. – С. 124–125.
3. Марченко А. Е. Разнотолщинность покрытия как следствие эластической турбулентности электродных обмазочных масс в состоянии неизотермического напорного потока / А. Е. Марченко // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 182–194.
4. Марченко А. Е. Исследование вязкоупругих характеристик электродных обмазочных масс в состоянии напорного течения сквозь цилиндрические формующие насадки / А. Е. Марченко // Сварочные материалы 2015. Петраньевские чтения: сб. докладов Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции 15–17 окт. 2015 г. – С. 79–89.
5. Марченко А. Е. Реологические исследования неизотермических напорных потоков обмазочных масс для сварочных электродов в прямоточных ступенчатых каналах / А. Е. Марченко // Автоматическая сварка. – 2016. – № 1. – С. 1–19.
6. Степаносов А. Р. Экспертная оценка причин разнотолщинности покрытия сварочных электродов / А. Р. Степаносов // Сварочное производство. – 1989. – № 4. – С. 9–11.
7. Ворновицкий И. Н. Управление качеством сварочных электродов в процессе их изготовления / И. Н. Ворновицкий. – М.: Издательство ИКАР, 2001. – 110 с.

8. Марченко А. Е. Особенности формирования разнотолщинности покрытия, обнаруженные осциллографированием / А. Е. Марченко, М. Ф. Гнатенко // Металлургия сварки и сварочные материалы: междунар. научно-техн. конф., 1–2 июня 1992 г.: тезис. докл. – Санкт-Петербург, 1993. – С. 98–100.
9. Патон Б. Е. Сварочная техника в Великобритании / Б. Е. Патон, И. К. Походня // Автоматическая сварка. – 1961. – № 6. – С. 75–92.
10. Саката Сиро Практическое руководство по управлению качеством / Саката Сиро; пер. с 4-го япон. издания С. И. Мышкиной; под ред. В. И. Гостева. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
11. Redderger P. J. Axial Laminar Flow in a Circular Pipe a Fixed Core. Canad / P. J. Redderger, M. E. Charles // J. of Chemical Engineering. – 1962. – Aug. – P. 148–151.
12. Хаппель Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер. – М.: Мир, 1976. – 630 с.
13. Марченко А. Е. О тепловой обстановке, создаваемой вязкостным разогревом электродной обмазочной массы, в зоне формирования напорного потока / А. Е. Марченко // Сварочные материалы 2015. Петраньевские чтения: сб. докладов Санкт-Петербургской международной науч.-техн. конф. 15–17 окт. 2015 г. – С. 65–78.
14. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
15. Марченко А. Е. О физико-химической природе прочности электродных покрытий и технологических путей ее обеспечения / А. Е. Марченко // Сварочные материалы. Технологии. Производство. Качество. Конкурентоспособность: V между. конф., 7–11 июня 2010 г., Артемовск: сб. докл. – Киев, 2010. – С. 78–99.

А. Ю. Марченко

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНОТОВЩИННОСТІ ПОКРИТТЯ ЕЛЕКТРОДІВ ПІД ЧАС ОПРЕСУВАННЯ

Із застосуванням осцилографічних і математико-статистичних методів вивчені закономірності утворення різновтовщинності покриття експериментальних електродів УОНИ 13/55 з діаметром стрижня 4 мм під час їх виготовлення на кутовому гідравлічному пресі в умовах, максимально наближених до виробничих. Виявлено, що зміна різновтовщинності покриття це безперервний, багатостадійний, немонотонний (хвилеподібний) і гармонійний процес, в якому обурення, що виникли на стартовій стадії, можуть відчуватись на наступних стадіях опресування електродів. Різновтовщинність покриття викликається, насамперед, порушенням балансу пружності і в'язкості, який залежить від консистенції електродних обмазувальних мас. Разом з тим на ймовірність утворення різновтовщинності покриття суттєво впливають конструктивні особливості формуючого тракту електрообмазувального преса. Бібліогр. 15, рис. 7.

Ключові слова: дугове зварювання, покриті електроди, опресування, різновтовщинність покриття, осцилографування, математична статистика

Поступила в редакцію 28.11.2016