

ЖУРНАЛУ “ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ” (ЭОМ) – 40 ЛЕТ. НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

*Институт прикладной физики АНМ,
ул. Академией, 5, MD–2028, г. Кишинев, Республика Молдова*

С 1965 года начал выходить новый научный и производственно-технический журнал – “Электронная обработка материалов” (ЭОМ). Задачи журнала были сформулированы в обращении редколлегии к читателям:

“В новом журнале Института прикладной физики Академии наук Молдавской ССР “Электронная обработка материалов” будут публиковаться обзорные и оригинальные статьи, посвященные изысканию новых областей применения электричества в народном хозяйстве, основанных на использовании электрического разряда и электрических полей. Журнал будет информировать читателей о научных конференциях, съездах и совещаниях по новым применениям электричества, а также печатать библиографию наиболее важных работ по электронной обработке материалов.

“Электронная обработка материалов” – первый специализированный журнал, посвященный вопросам новых применений электричества в промышленности и сельскохозяйственном производстве”.

На протяжении всех сорока лет своей истории журнал следовал заявленной политике. Он был основан по инициативе первого директора Института прикладной физики АН МССР, академика Бориса Романовича Лазаренко, общепризнанного изобретателя принципиально нового метода размерной обработки металлов (в котором отрицательная способность электрического разряда разрушать металл электрода была использована и направлена на пользу человеку), энтузиаста исследований нетрадиционных применений электричества и разработки на их основе новых технологий.

Во вступительной статье первого номера журнала Б.Р. Лазаренко писал [1]:

“В последнее время характер использования электрической энергии начинает значительно изменяться. Возрастает количество процессов, основанных на использовании более существенных свойств электричества, нежели способность его превращаться в механическое движение, тепло и свет. Все чаще электричество применяется не как источник силы, а как вид энергии, способный непосредственно сам, без предварительной трансформации в какие-либо другие виды энергии, выполнять многообразные и весьма сложные процессы.

Если учесть, что многие появляющиеся электрические процессы уже не могут быть полностью объяснимы с точки зрения существующих положений классической электрофизики, то становится понятным, какими богатыми и еще полностью не вскрытыми возможностями обладает электричество. Задача ученых – изучить эти возможности и на их основе открыть качественно новые, высоко эффективные электрические процессы”.

Предвидение Б.Р. Лазаренко сбылось. С тех пор появилось множество новых технологических процессов и устройств. С первого своего номера журнал способствовал созданию этих процессов. Уже в 1965 году было опубликовано 84 статьи и 12 информационных материалов (библиографические обзоры, сообщения о конференциях, рецензии). Журнал стал центром, объединяющим многих исследователей из Советского Союза, а также из других стран. В 1965 году опубликованы статьи исследователей из 12 городов (из шести республик СССР), а также из Чехословакии и Японии.

Количество публикуемых статей стало быстро расти, а с 1973 года (после увеличения объема журнала) их число достигло 160–175 в год. Всего за время существования журнала было опубликовано более 5 тысяч статей и около ста информационных материалов.

На рис. 1 представлена диаграмма, показывающая распределение числа статей по пятилетиям. Буквально за пять лет число публикаций увеличилось в полтора раза, а с 1975 по 1989 год стабилизировалось на уровне ~ 810 статей за пятилетие.

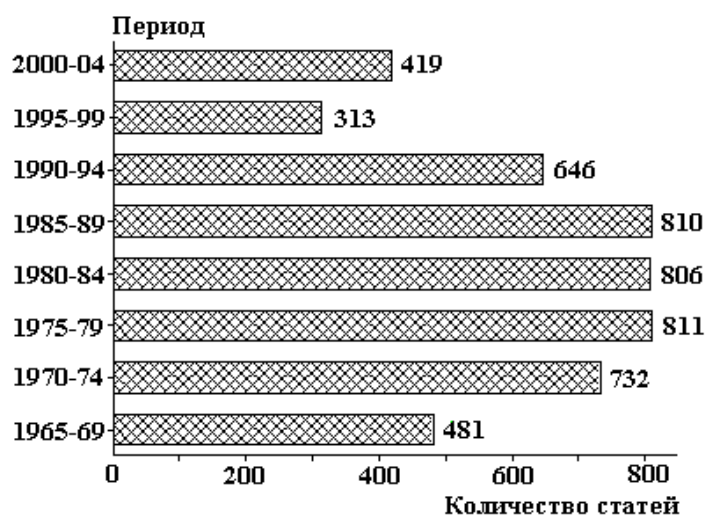


Рис. 1. Распределение количества статей, опубликованных в журнале, по пятилетним периодам

Редакционный портфель стал переполняться, и сроки опубликования становились слишком большими. Поэтому с 1985 года журнал вошел в государственную систему депонирования научных работ и за семь лет 135 статей были направлены на депонирование при одновременном опубликовании аннотаций к ним на страницах журнала. Такая практика позволила значительно сократить сроки информирования научной общественности о полученных результатах и дала возможность при необходимости оперативно получать статью из учреждения-депозитария.

В ЭОМ публикуются результаты исследований явлений, происходящих в условиях, которые часто выпадают из поля зрения отраслевых журналов, что привлекает в него авторов из многих стран. Среди них были представители 37 стран, в числе которых США, Канада, Израиль, Германия, Япония, Китай, Индия, Сингапур и другие. Исследователи практически всех независимых государств (14), прежде входивших в состав СССР, сотрудничали и продолжают сотрудничать с журналом. Так, например, в 1984 году были опубликованы статьи авторов из 41 города (восьми республик), а в 1989 году – из 50 городов (шести республик), а также из Болгарии. Расширяется не только география проживания авторов, но и определяются крупные центры исследований (которые, конечно, в отдельные годы по количеству статей в журнале могли не занимать первые места). Так, например, в 1984 году исследователи из Киева, Кишинева, Москвы, Николаева, Томска представили по 5% и более от общего количества статей. В 1989 году такими городами были Киев, Кишинев, Минск, Москва, Харьков.

Журнал первоначально включал разделы:

1. Электрическая размерная обработка материалов.
2. Электрические способы легирования металлических поверхностей (позже этот раздел стал называться “Электрические методы обработки поверхности”).
3. Электрические процессы в технике и химии.
4. Влияние электрических и магнитных воздействий на жизнедеятельность организмов.
5. Электрическая обработка пищевых продуктов.
6. Оборудование и приборы.
7. Из опыта работы.

С 1985 года 4-й и 5-й разделы были объединены в раздел “Электрическая обработка биологических объектов и пищевых продуктов”. Кроме того, в информационном разделе публикуются библиографические обзоры, сообщения о конференциях, рецензии и другие материалы, представляющие интерес для исследователей в данной области.

На рис. 2 и 3 представлено абсолютное и относительное распределение количества статей по разделам в различные периоды. Первоначально преобладающими (до 60%) были статьи из 1-го и 2-го разделов, непосредственно связанных с уже ставшими “традиционными” (точнее, достаточно привычными) методами обработки, такими как электроэрозионная и электрохимическая размерная обработка, а также электроискровое легирование, которые широко применяются в машиностроении.

Но вскоре стало возрастать число работ из 3-го раздела, доля которых в отдельные годы до 1991 года достигала ~ 50% от общего количества публикаций за год. Широкое и разнообразное применение электрических методов воздействия хорошо иллюстрируется рис. 2, где кривая количества работ из раздела 3 находится значительно выше остальных.

Доля 1-го раздела последовательно снижалась до ~ 9%. Число статей из 2-го раздела с 10–11% поднялось до ~ 15% в последние годы, что, несомненно, связано с наблюдающейся тенденцией концентрации усилий на модификации поверхностных слоев изделий, непосредственно контактирующих

с рабочей средой. Статьи, посвященные влиянию электрического воздействия на биологические объекты и пищевые продукты, составляют не более 10–12% от общего количества.

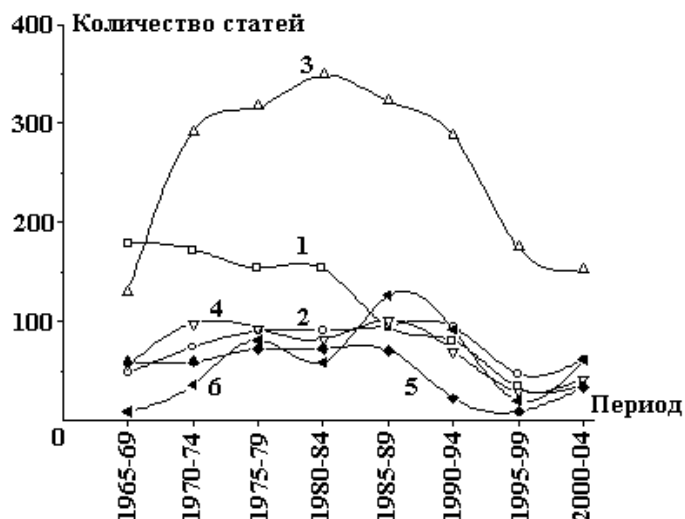


Рис. 2. Распределение статей по разделам: 1 – Электрическая размерная обработка материалов; 2 – Электрические методы обработки поверхности; 3 – Электрические процессы в технике и химии; 4 – Электрическая обработка биологических объектов и пищевых продуктов; 5 – Оборудование и приборы; 6 – Из опыта работы

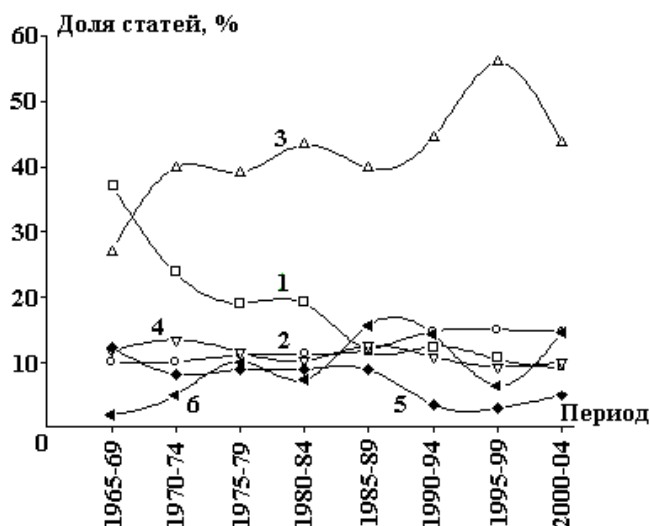


Рис. 3. Относительное распределение статей по разделам в различные периоды. Обозначения кривых те же, что и на рис. 2

Последние два раздела, более близкие к инженерным проблемам, весьма отличались по количеству публикаций в отдельные годы и достигали максимального суммарного объема ~ 25% от общего количества статей (1985–1989). Минимальная доля (9,3%) этих разделов отмечена в 1995–1999 годах.

Анализ распределения количества публикаций среди стран (с учетом республик, входивших в СССР) выделяет группу с наибольшим вкладом (94–98%) в общее количество работ – это Россия, Украина и Молдова, а также Беларусь (рис. 4). В этих странах сложились мощные научные центры и школы, которые и сейчас сохраняют свое значение и влияние. Надо отметить, что в определенные периоды относительный вклад разных стран был различным. Первоначально преобладающим был вклад России и Молдовы, но затем заметно возрос вклад Украины (развитие исследований по тематике раздела “Электрические процессы в технике и химии”) (рис. 5). Менее значителен вклад исследователей Беларуси, но он также со временем увеличивался. Доля других республик была менее заметной, но в последнее время активно сотрудничают с журналом исследователи из Азербайджана и Узбекистана.

Нарушение научных связей после 1991 года привело и к изменению соотношения числа публикуемых работ исследователей разных стран, в частности стала снижаться их доля из России (рис. 5). Расширению географии авторов журнала способствовал тот факт, что в нем стали публиковаться работы и на английском языке. Все это выразилось в снижении (до 89,7%) суммарной доли ведущих стран за 2000–2004 годы.

Несмотря на то что журнал выходит на русском языке и был ориентирован в основном на исследователей Советского Союза, его появление с самого начала привлекло внимание мировой научной общественности, как в силу актуальности исследуемой области науки и техники, так и благодаря большому научному авторитету Б.Р. Лазаренко. Уже в 1965 году (до 1970 года) он стал переводиться

издательством Scientific Information Consultants (London) под названием “Applied Electrical Phenomena”, а с 1971 по 1983 год – как журнал “Electrochemistry in industrial Processing and Biology”. С 1985 года “Электронная обработка материалов” стала переводиться на английский язык американским издательством Allerton Press. Первоначально переводной журнал выходил под названием “Soviet Surface Engineering and Applied Electrochemistry”, а с 1992 года – как “Surface Engineering and Applied Electrochemistry”. В англоязычном варианте публикуется меньшее количество статей (80–96%) от общего количества в оригинальном журнале.

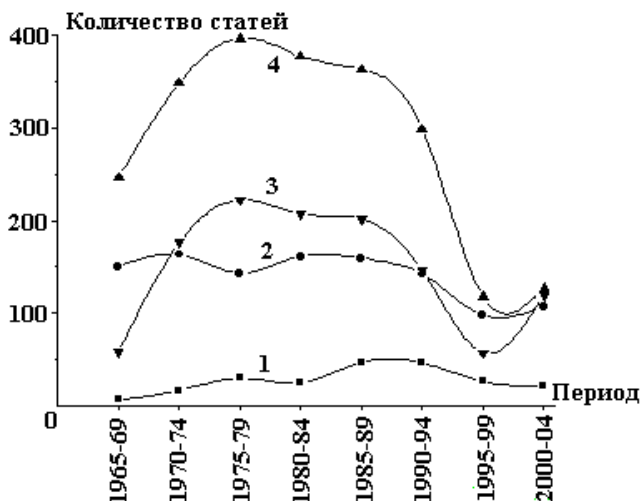


Рис. 4. Распределение по периодам количества работ ведущих стран:
1 – Беларуси; 2 – Молдовы; 3 – Украины; 4 – России

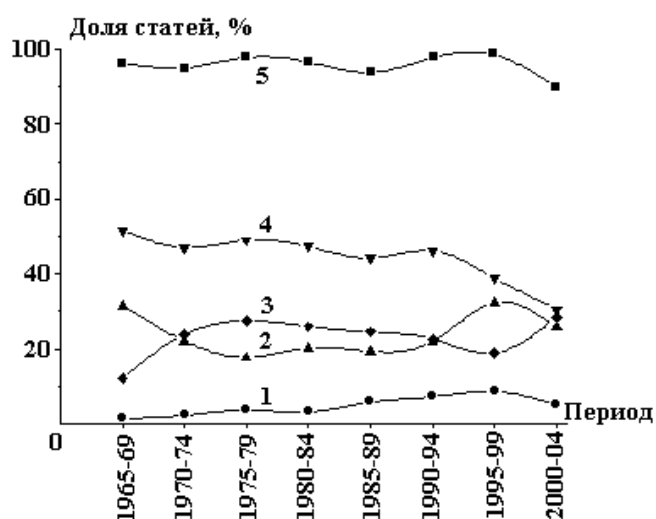


Рис. 5. Относительное распределение по периодам количества работ ведущих стран:
1 – Беларуси; 2 – Молдовы; 3 – Украины; 4 – России; 5 – суммарная доля этих стран в общем количестве публикаций

Так как журнал “Электронная обработка материалов” в первую очередь объединял русскоязычных исследователей Советского Союза, то после развала последнего возникло много проблем: разорвались традиционные связи между редакцией и научными учреждениями, которые оказались в других государствах; возникли финансовые и организационные затруднения. В кризисный период наблюдался значительный спад числа публикаций: до ~ 80% за 1990–1994 годы, по сравнению с предыдущим пятилетним периодом и до 39% в 1995–1999 годах (рис. 1). Вместе с тем со временем положение начало выправляться. Сейчас в журнале публикуется гораздо большее количество статей: в 2000–2004 годах оно возросло на треть по сравнению с предыдущим пятилетием. Укрепляются связи с большим количеством исследователей в различных странах: в 2002 году были опубликованы статьи из восьми стран, а в 2003-м – уже из 13.

В настоящее время журнал находится на подъеме и продолжает свою благородную миссию – объединяет ученых разных стран в области разработки электрических методов обработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р. Новые применения электричества в промышленности и сельском хозяйстве // Электронная обработка материалов. 1965. № 1. С. 3–11.

Поступила 24.12.04

Процессы металлообработки, основанные на использовании электрических дуговых разрядов различных форм проявления и включающие в себя традиционные способы ЭО, РОД и плазменную обработку, образуют в своей совокупности ЭРО, обладающую широкими технологическими возможностями. Преимущества этих технологий, простота осуществления, достигнутый уровень разработок делают процессы ЭРО высокоэффективной альтернативой традиционным процессам обработки резанием и давлением. Объективно ЭРО – это следующий этап развития металлообработки, когда на смену «эры силы» приходит «эра тепла». При этом именно процесс РОД явился скачком, качественно новым этапом в развитии металлообработки в целом, поскольку изложенные преимущества процессов ЭРО возможно реализовать в полной мере лишь после появления РОД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носуленко В.И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов. 2005. № 2.
2. А. с. 368965 СССР. М. Кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / В. И. Носуленко № 1223593/25-8; Заявлено 04.03.68.
3. Носуленко В.И. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. Киев, 1999.

Поступила 10.05.04

Summary

The new high-performance way electrophysical sizing machining of metals distinguished of themes is circumscribed, that handling realize by a stationary electrical arc in a transversal stream of a fluid of the appropriate hydrodynamic performances. Is shown, that this process was by a qualitatively new stage in a development of metal working as a whole.

Н.И. Цынцару^{*}, И.В. Яковец^{**}, О.Ю. Келоглу^{*}, В.Г. Звонкий^{**},
С.П. Ющенко^{*,**}, А.И. Дикусар^{*,**}

РАССЕИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТАНДАРТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ХРОМИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОСТОЯННЫМ И ИМПУЛЬСНЫМ ТОКАМИ

^{}Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, Кишинев, MD-2028, Молдова
^{**}Приднестровский госуниверситет им. Т.Г. Шевченко,
ул. 25 октября, 128, Тирасполь, Молдова*

Важным технологическим показателем различных видов электрохимической обработки является распределение локальных скоростей, которое в свою очередь определяется распределением тока (локальных плотностей тока) по обрабатываемой поверхности.

Применительно к процессам электроосаждения, в частности электроосаждения хрома, таким показателем является так называемая рассеивающая способность (РС) электролита, под которой обычно понимается способность электролита (вернее, границы раздела в широком смысле, включая в это понятие и диффузионные слои) изменять первичное распределение тока, обусловленное только геометрическими параметрами. Другими словами, РС характеризует равномерность распределения тока и толщины осадка (скорости электроосаждения) по обрабатываемой поверхности.

Специфической особенностью процесса хромирования при постоянной плотности тока является возрастающая зависимость выхода по току от плотности тока, что приводит к низкой рассеивающей (высокой локализирующей) способности электролита.

© Цынцару Н.И., Яковец И.В., Келоглу О.Ю., Звонкий В.Г., Ющенко С.П., Дикусар А.И. // Электронная обработка материалов, 2005, № 1, С. 17–22.

Количественное экспериментальное определение РС обусловлено необходимостью прогнозирования поведения электрохимической системы в процессе электроосаждения. Применительно к электроосаждению хрома на постоянном токе наличие возрастающей зависимости выхода по току от плотности тока (а также газовыделения водорода на катоде и кислорода на аноде) приводит к тому, что наблюдаются отрицательные значения РС для этих условий [1].

В [2] предложен метод определения РС с использованием ячейки Хулла с вращающимся цилиндрическим электродом (см. рис. 1). В этой электродной системе при определенных соотношениях геометрических параметров ячейки реализуется такое же первичное распределение тока, как и в классической ячейке Хулла. Использование такой ячейки для определения РС процесса хромирования позволяет количественно подойти к определению факторов, определяющих равномерность электроосаждения, и, как следствие, к созданию условий управления ею в процессе электроосаждения.

В настоящей работе исследованы процессы формирования равномерного распределения скоростей электроосаждения хрома из стандартного электролита измерением РС в ячейке Хулла с цилиндрическим электродом. В отличие от [2, 4] использовался не вращающийся, а неподвижный цилиндрический электрод, поскольку рассматривается поведение электрохимической системы в отсутствие перемешивания.

Теоретический анализ

Моделирование распределения скоростей электроосаждения хрома в ячейке Хулла с цилиндрическим электродом при возрастающей зависимости выхода по току от плотности тока. С целью определения влияния наблюдаемой в условиях использования постоянного тока возрастающей зависимости выхода по току от плотности тока на распределение скоростей электроосаждения в ячейке

Хулла (и соответственно на РС) осуществлено численное моделирование распределения с применением зависимостей η (выхода по току) – i (плотность тока), представленных в [5], а также в [6, 7].

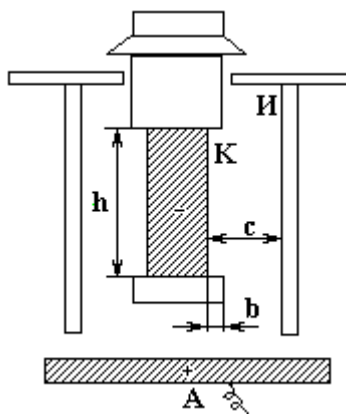


Рис. 1. Схема ячейки. К – катод, А – анод, И – изолирующая втулка, h – высота цилиндрического электрода (остальные пояснения в тексте)

Расчет проводился для значений $W_a = 0,01$. W_a – параметр Вагнера, определяемый как

$$W_a = \frac{b\chi}{i_{cp}h}, \quad (1)$$

где b – наклон поляризационной кривой, χ – электропроводность электролита, i_{cp} – средняя плотность тока, h – характерный линейный размер (высота электрода). При расчете W_a по (1) использовались следующие значения: $i_{cp} = 0,5 \text{ A/cm}^2$, $h = 3 \text{ см}$ (именно такие значения в дальнейшем использованы и при экспериментальных измерениях РС), $b = 0,1 \text{ В}$, $\chi = 0,15 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. В отличие от i_{cp} и h значения b и χ – модельные, причем подбирались такими, чтобы выполнялось условие $W_a = 0,01$, что соответствует первичному распределению тока. Специальными модельными расчетами показано, что при $W_a = \text{const}$ варьирование значениями параметров, его определяющих, не приводит к изменению распределения толщин электроосажденных слоев.

Расчет распределения толщин осуществлялся с использованием соотношения, следующего из закона Фарадея:

$$\mu_l = \frac{\eta_l(i) C \tau i_l}{\rho} \quad (2)$$

здесь μ_l , i_l , η_l – соответственно локальные толщина осадка, плотность тока и выход по току, τ – время осаждения, C – электрохимический эквивалент, ρ – плотность металла.

Результаты расчета приведены на рис. 2.

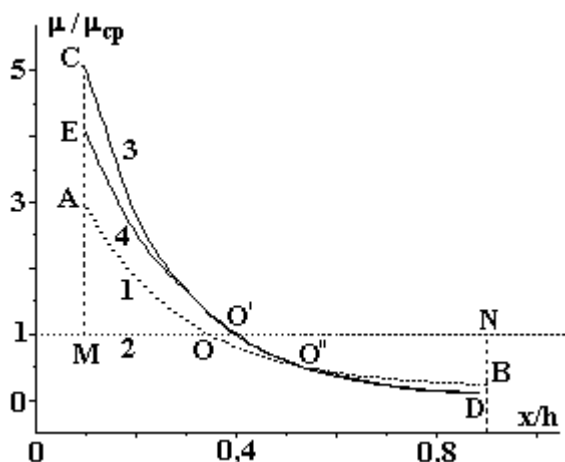


Рис. 2. Зависимость модельного распределения безразмерной толщины осадка от безразмерного расстояния по длине электрода при $i_{cp} = 0,5 \text{ A/cm}^2$, $W_a = 0,01$: 1 – первичное распределение тока при отсутствии зависимости выхода по току от плотности тока; 2 – идеально равномерное распределение тока; 3 – распределение скоростей электроосаждения при зависимости выхода по току от плотности тока по [5]; 4 – распределение скоростей электроосаждения при зависимости выхода по току от плотности тока по [6, 7]

Расчет РС по данным рис. 2 согласно [8] должен осуществляться следующим образом:

$$PC = \frac{S_{OO'O'} - S_{ACO'O} - S_{O'BD}}{S_{AOM} + S_{ONB}} 100\% \quad (3)$$

для зависимости $\eta(i)$ по [5], и соответственно

$$PC = \frac{S_{OO'O'} - S_{AEO'O} - S_{O'BD}}{S_{AOM} + S_{ONB}} 100\% \quad (4)$$

для зависимости $\eta(i)$ по [6, 7], где S – площадь соответствующей фигуры на рис. 2. Из модельных расчетов видно, что, поскольку $S_{ACO'O} + S_{O'BD} > S_{OO'O'}$, а также $S_{AEO'O} + S_{O'BD} > S_{OO'O'}$, РС в обоих случаях будет иметь отрицательное значение. Полученные значения (РС = –53,7% по (3) и РС = –36,2% по (4)) показывают, насколько неоднородным является распределение скоростей в условиях экспериментально наблюдаемых зависимостей выхода по току от плотности тока при использовании постоянного тока.

Методика эксперимента

Экспериментальное исследование распределения скоростей осаждения из стандартного электролита хромирования (250 г/л CrO_3 + 2, 5 г/л H_2SO_4) при $T = 50^\circ\text{C}$ проводилось на цилиндрических образцах при следующих условиях: ячейка для измерения РС (рис. 1) состояла из цилиндрического электрода K радиусом $r = 5$ мм и высотой $h = 30$ см. Высота втулки $II = 70$ мм, а ее нижний конец располагался на расстоянии ~ 20 мм от дна ячейки. Верхняя и нижняя изолирующие втулки из фторопласта диаметром 16 мм и высотой 10 мм (нижняя втулка) и 50 мм (верхняя). Очевидно, что для этих геометрических размеров выполнялись все условия геометрического подобия [2]. Определение РС проводилось для значений безразмерной длины цилиндрического электрода в пределах $0,1 \leq x/h \leq 0,9$. Расчет РС осуществлялся измерением площадей, образованных кривыми $\mu/\mu_{cp} - x/h$, как показано в [2] (а также см. выше (3)–(4)).

Осаждение хрома проводилось в следующих условиях: постоянный ток – плотность тока $i = 0,5 \text{ A/cm}^2$ при количестве пропущенного электричества $Q = 1,25 \text{ A}\cdot\text{ч/cm}^2$; импульсный ток – средняя плотность тока $i_{cp} = 0,5 \text{ A/cm}^2$ при количестве пропущенного электричества $Q = 1,25 - 2,00 \text{ A}\cdot\text{ч/cm}^2$, параметры импульсного тока: длительность импульса $\tau_{имп} = 2$ с, скважность $q = 4$.

Использование указанных параметров импульсного тока обусловлено результатами, представленными в [5, 9].

В работах показано, что в секундном диапазоне длительностей импульсов возможны: повышение выхода по току (которое существенно выше при низких плотностях тока, чем при высоких); наличие падающей зависимости выхода по току от плотности тока. Повышение равномерности элект-

троосаждения хрома на длинномерные поверхности в импульсных условиях с несколько иными параметрами импульсного тока экспериментально продемонстрировано в [10].

Результаты и обсуждение

Распределение локальных скоростей осаждения и РС при использовании постоянного тока. Экспериментальные данные по распределению скоростей осаждения (толщины осадка) из стандартного электролита хромирования в условиях постоянного тока представлены на рис. 3. Из экспериментально наблюдаемого распределения можно рассчитать РС следующим образом:

$$PC = \frac{S_{AOC} - S_{OLO'} + S_{LSO'} - S_{BDS}}{S_{AO'M} + S_{O'NB}} 100\% . \quad (5)$$

Полученное значение РС при $Q = 1,25 \text{ А}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$ ($-2,8\%$, см. таблицу) позволяет заключить, что измеренное в подобной электрохимической ячейке распределение более неравномерно, чем определяемое первичным распределением тока при отсутствии зависимости выхода по току от плотности тока. Кроме того, следует отметить, что в области низких плотностей тока (высокие значения x/h) наблюдаемое распределение практически совпадает с модельным в предположении первичного распределения тока, а при высоких наблюдается снижение скорости осаждения (область ОС, рис. 3). Причиной этого, видимо, является падение выхода по току от плотности тока в области высоких i , что вызвано повышением поверхностной температуры при высоких плотностях тока [11]. Существенное влияние разогрева в условиях описываемых экспериментов подтверждается низкими значениями средних значений выхода по току (см. таблицу).

Показатели скорости обработки и рассеивающей способности в зависимости от условий электроосаждения при $i = 0,5 \text{ А}/\text{см}^2$

$Q, \text{ А}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$	Постоянный ток	Импульсный ток		
	1,25	1,25	1,50	2,00
$\mu_{\text{ср}}, \text{ мкм}$	22,4	27,6	44	44,6
$\eta_{\text{ср}}, \%$	4,0	4,9	6,5	5,0
$V, \text{ мкм}/\text{мин}$	0,15	0,18	0,24	0,19
РС, %	-2,8	89,6	93,5	83,0

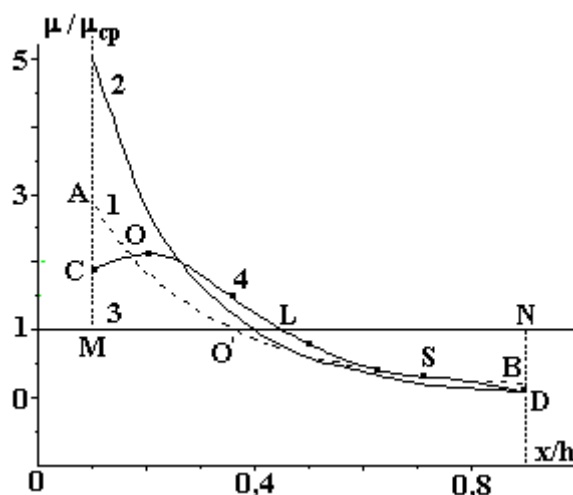


Рис. 3. Зависимость распределения безразмерной толщины осадка от безразмерного расстояния для электроосаждения хрома из стандартного хромового электролита при постоянной плотности тока $i = 0,5 \text{ А}/\text{см}^2$ и $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. 1 – распределение в условиях первичного распределения тока и отсутствия зависимости выхода по току от плотности тока; 2 – распределение при наличии зависимости выхода по току от плотности тока по [5]; 3 – идеально равномерное распределение тока; 4 – экспериментальное распределение, полученное на неподвижном цилиндрическом электроде

Следует обратить внимание также на то, что при использовании зависимости выхода по току от плотности тока, полученной на электродах относительно малой поверхности, до плотностей тока $\sim 2 \text{ A/cm}^2$ падения выхода по току не наблюдается [5]. Согласно [11] оно отмечено только при более высоких i . В то же время, если судить по распределению, представленному на рис. 3, в условиях настоящего эксперимента снижение выхода по току наблюдается уже при $i \sim 0,75 \text{ A/cm}^2$ (область ОС, рис. 3). Очевидно, это обусловлено наблюдаемым в [5] размерным эффектом (зависимость $\eta-i$, которая использована для модельных расчетов (см. рис. 3), получена на электродах малой поверхности в отличие от использованных в настоящем эксперименте).

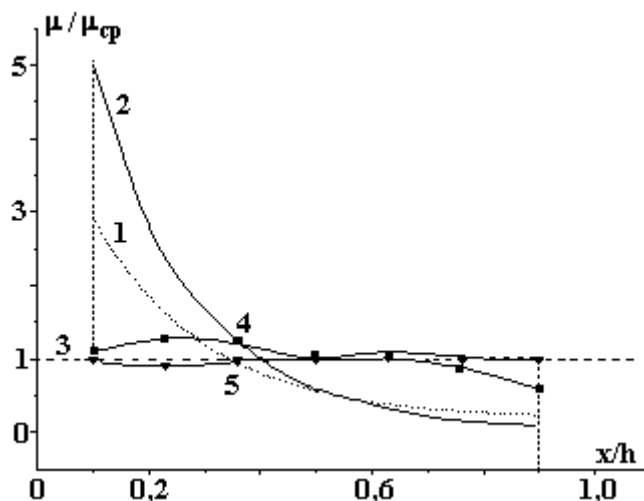


Рис. 4. Зависимость распределения безразмерной толщины осадка от безразмерного расстояния по длине электрода при импульсном электроосаждении хрома из стандартного хромового электролита при $i_{ср} = 0,5 \text{ A/cm}^2$, $q = 4$, $\tau_{имп} = 2 \text{ с}$: 4 – $Q = 1,25 \text{ A}\cdot\text{ч/cm}^2$; 5 – $Q = 1,5 \text{ A}\cdot\text{ч/cm}^2$ (остальные обозначения, как на рис. 3)

Распределение локальных скоростей осаждения и РС при использовании импульсного тока. Применение импульсных режимов (рис. 4) приводит к выравниванию распределения толщины осадков по сравнению с электроосаждением на постоянном токе при одной и той же средней плотности тока. Импульсный ток позволяет эффективно управлять распределением скоростей осаждения. На рис. 4 приведены распределения толщины осадка, которые близки к идеально равномерному распределению. Следует отметить, что в импульсных условиях возрастают по сравнению с постоянным током выход по току и скорость осаждения; выход по току и скорость осаждения практически не изменяются с увеличением Q ($\eta_{ср} = 5,5 \pm 0,5\%$, $V_{ср} = 0,20 \pm 0,03 \text{ мкм/мин}$) (см. таблицу). Однако, несмотря на то что выход по току выше наблюдаемого при постоянном токе, его значения являются низкими, что также является, видимо, следствием дополнительного поверхностного и объемного разогрева. Отмеченное ранее в импульсных условиях выравнивание распределения выхода по току от плотности тока [5] приводит к увеличению значений РС до $89 \pm 3\%$ (см. таблицу).

Заключение

Использование метода определения рассеивающей способности (РС) электролита хромирования с применением ячейки типа ячейки Хулла с неподвижным цилиндрическим электродом позволило показать, что в отличие от электроосаждения на постоянном токе, при котором РС отрицательна, использование импульсного осаждения в секундном диапазоне длительностей импульса (скважность $q = 4$, $\tau_{имп} = 2 \text{ с}$) позволяет достичь значений РС $\sim 90\%$. Несмотря на то что в условиях использования данного метода определения РС выход по току при использовании постоянного тока снижается (очевидно, вследствие дополнительного тепловыделения), в исследованных импульсных условиях он выше, чем на постоянном токе.

Сравнение экспериментально определенных значений распределения скоростей с модельными расчетами в рамках первичного распределения тока и экспериментально измеренной зависимостью выхода по току от плотности тока (i) показывает, что расхождение в области высоких i связано с дополнительным поверхностным тепловыделением, а также отмеченным в [5] размерным эффектом при хромировании с высокой плотностью тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лайнер В.И., Кудрявцев Н.Т. Основы гальваностегии. М., 1957.

2. Бобанова Ж.И., Ющенко С.П., Яковец И.В., Яхова Е.А., Дикусар А.И. Определение рассеивающей (локализирующей) способности электролитов при электрохимической обработке с использованием ячейки Хулла с вращающимся цилиндрическим электродом // Электронная обработка материалов. 2000. № 6. С. 4–16.
3. Яковец И.В., Ющенко С.П., Дикусар А.И. Влияние катодной поляризуемости на рассеивающую способность электролита при интенсивных режимах электроосаждения в условиях смешанной кинетики // Там же. 2004. № 4. С. 4–9.
4. Дикусар А.И., Бобанова Ж.И., Ющенко С.П., Яковец И.В. Рассеивающая способность разбавленного медно-сульфатного электролита при интенсивных режимах электроосаждения // Электрохимия. 2004. Т. 40. № 12. С. 1545–1550.
5. Цынцару Н.И., Бобанова Ж.И., Дикусар А.И. Влияние поверхностного тепловыделения на скорость хромирования при импульсном электроосаждении из стандартного электролита // Электронная обработка материалов. 2004. № 6. С. 4–10.
6. Chin D.-T., Zhang H.A. Study of Pulse Plating of Chromium // Electrochim Acta. 1986. V. 31. P. 299–305.
7. Звягинцева А.В., Бурдыкина Р.И. Проблемы хромирования и альтернативные покрытия никель–бор // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. XI. № 2. С. 24–29.
8. Гамбург Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М., К., 1997.
9. Цынцару Н.И. Импульсное электроосаждение хрома // Электронная обработка материалов. 2002. № 5. С. 18–21.
10. Звонкий В.Г., Ющенко С.П., Дикусар А.И. Равномерность электроосаждения хрома при обработке длинномерных деталей постоянным и импульсными токами // Там же. 2003. № 2. С. 23–29.
11. Цынцару Н.И. Термокинетические явления при осаждении хрома из стандартного электролита // Там же. 2003. № 6. С. 15–18.

Поступила 06.08.04

Summary

Using the method of determination of throwing power (TP) of electrolyte for chromium plating in cell like Hull cell with a motionless cylindrical electrode we demonstrated that use of pulse deposition (duty cycle = 0.25, $\tau_{\text{pulse}} = 2$ s) allows to obtain values of $TP \sim 90\%$ unlike electrodeposition at direct current, at which TP is negative. In spite of the fact, that at use of the given method of TP determination the current efficiency decreases at direct current (obviously, due to additional heat evolution), it is higher under investigated pulse conditions, than at direct current. Comparison of experimentally determined values of rate distribution with modelling calculations within the framework of an initial current distribution and experimentally measured dependence of current efficiency on current density (i) demonstrates, that the divergence in the field of high i is connected with additional surface heat evolution, and also with dimensional effect (mentioned in earlier articles) at chromium plating with high current density.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

А.Д. Верхотуров^{*}, В.П. Лунева^{**}, Т.В. Глабец^{***}, А.В. Козырь^{**}, С.А. Демин^{***}, В.Н. Бруй^{*}

СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ 45 ТУГОПЛАВКИМИ d-МЕТАЛЛАМИ

^{}Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

*^{**}Благовещенский государственный педагогический университет,
ул. Ленина, 104, г. Благовещенск, 675000, Россия*

*^{***}Дальневосточный военный институт,
ул. Ленина, 224, г. Благовещенск, 675000, Россия*

Введение

Известно [1–4], что при электроискровом легировании (ЭИЛ) сталей тугоплавкими металлами наиболее благоприятные условия формирования измененного поверхностного слоя наблюдаются при использовании в качестве легирующих материалов металлов, образующих неограниченные твердые растворы с металлом подложки. Однако при достаточно длительном процессе ЭИЛ этими металлами (V, Cr, Co, Ni) кривые изменения массы катода во времени имеют тенденцию к снижению [3, 4]. Это связано с тем, что электроискровое легирование осуществляется, как правило, на воздухе, температура рабочей поверхности анода достигает высоких значений (~1000°C), что вызывает образование хрупких оксидов, нитридов, которые разрушаются при длительном ЭИЛ.

Можно предположить, что металлы, обладающие высокой жаростойкостью, более эффективны для формирования измененного поверхностного слоя (ИПС).

Таким образом, целью настоящего исследования являлось определение влияния физико-химических свойств и особенно степени подверженности окислению при высоких температурах (~1000°C) в воздушной среде легирующих материалов, в частности тугоплавких металлов IV – VI групп и металлов подгруппы железа на свойства покрытий, сформированных методом ЭИЛ на стали 45.

Методика эксперимента

Электроискровое легирование осуществляли на воздухе на установке для упрочнения и восстановления деталей машин и режущего инструмента IMES–01-2, разработанной и выполненной Институтом материаловедения ХНЦ ДВО РАН [1] на воздухе при энергии импульса $E = 0,512$ Дж и частотой импульсов 400 Гц с удельной длительностью 1 мин/см².

В качестве материалов катода использована сталь 45, а анода – переходные металлы IV – VI групп, кобальт, никель. Катод изготовлен в форме цилиндра с площадью торцевой поверхности 1 см². Аноды имели цилиндрическую форму с заостренным концом, что обеспечивало более интенсивную эрозию при ЭИЛ.

Кинетику процессов эрозии и формирования легированного слоя оценивали гравиметрическим методом. Удельная эрозия анода ΔA и изменение массы катода ΔK являются среднестатистическими величинами из не менее десяти измерений. Из временных зависимостей ΔA и ΔK , а также из суммарных величин эрозии $\sum_{t=1}^{10} \Delta A$ и изменения массы (чаще всего привеса) катода $\sum_{t=1}^{10} \Delta K$ определили характеристики ЭИЛ, используемые для оценки основных параметров процесса. К их числу относятся: порог хрупкого разрушения легированного слоя (ЛС) t_x – время достижения максимального значения m_k или первого отрицательного значения Δm_k ; время хрупкого разрушения ИПС t_x ; коэф-

коэффициент переноса материала $k = \sum_{t=1}^{10} \Delta K / \sum_{t=1}^{10} \Delta A$; эффективность процесса ЭИЛ $\gamma = \sum_{t=1}^{10} \Delta K \cdot t_x \cdot \bar{K}$,

где \bar{K} – среднеарифметическая величина k за время t_x ; коэффициент упрочнения $K_{\text{упр}} = H_{\mu}^C / H_{\mu}^0$, где H_{μ}^C, H_{μ}^0 – микротвердость слоя и основы.

Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3, используя нагрузку 200 г и время нагружения 5 с. Выполняли не менее 30 замеров равномерно по всей площади покрытия с обработкой результатов методами математической статистики.

Шероховатость поверхности измеряли профилометром модели 283 с точностью $\pm 5\%$.

Рентгенофазовый анализ проводили с помощью дифрактометра «ДРОН-3М» в $\text{CuK}\alpha$ излучении со скоростью съемки 2 об/мин.

Исследование удельного изменения массы сформированных ЭИЛ покрытий выполнено на дериватографе Q-1000 при нагревании образцов до 1000°C .

Все результаты статистически обработаны. Доверительные интервалы определены по распределению Стьюдента с надежностью 0,95.

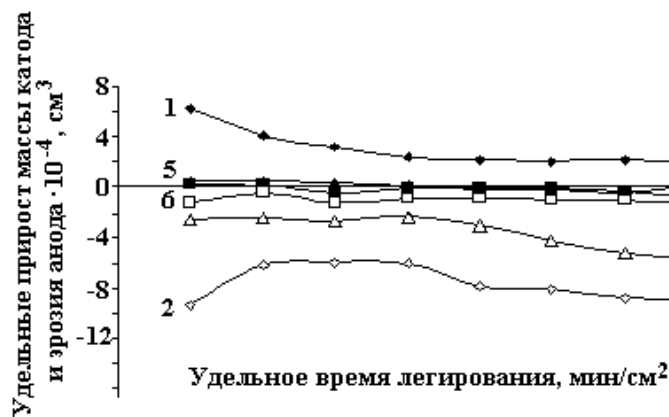
Результаты эксперимента и их обсуждение

По характеру зависимостей привеса катода и эрозии анода можно установить достаточно четкую связь между суммарным привесом катода, эрозией анода и положением легирующего элемента в таблице Менделеева. В частности, прослеживается тенденция уменьшения этих величин в подгруппах с увеличением атомных масс металлов. Это, по-видимому, связано с тем, что количество эродированного материала анода определяется энергией атомизации металла, определяемой совокупностью физико-термических характеристик, таких как температура плавления и температура хрупкого разрушения анода, атомная теплоемкость, скрытая теплота плавления.

На рис. 1 представлены зависимости удельного привеса катодов и убыли анодов от времени обработки. Установлено, что процесс легирования во времени состоит из двух сопряженных этапов: непрерывного уменьшения привеса катода и убыли массы анода. До некоторого времени t_x^* происходят образование вторичных структур (ВС) и стабилизация этих процессов во времени, как следствие – возникновения ВС на электродах [1]. Время, по достижении которого наступает хрупкое разрушение ЛС (t_x), определяется характером взаимодействия материалов электродов и температурой перехода материала анода в хрупкое состояние.



а



б



6

Рис.1. Удельные изменения масс катодов из стали 45 и масс анодов при ЭИЛ переходными металлами: а – IV группы, 1 – Ti^* , 2 – Ti -анод; 3 – Hf^* ; 4 – Hf -анод; 5 – Zr ; 6 – Zr -анод; б – V группы, 1 – V^* ; 2 – V -анод; 3 – Nb^* ; 4 – Nb -анод; 5 – Ta^* ; 6 – Ta -анод; в – VI и VIII групп, 1 – Mo^* ; 2 – Mo -анод; 3 – W^* ; 4 – W -анод; 5 – Cr^* ; 6 – Cr -анод; 7 – Ni^* ; 8 – Ni -анод; 9 – Co^* ; 10 – Co -анод

Наибольшие значения привеса катода и эрозии анода получены для покрытий, сформированных металлами 4-го периода, причем увеличение их значений наблюдается практически в последовательности возрастания зарядов их ядер.

На рис. 2 представлена зависимость суммарного прироста массы катода от времени обработки при ЭИЛ стали 45 молибденом. Можно отметить, что в данном случае по прошествии времени $t_{уд} = 4$ мин/см² наблюдаются отрицательные значения удельного изменения массы катода, наступает порог хрупкого разрушения ЛС (t_x). В соответствии с этим значения суммарного прироста массы катода снижаются до определенных значений. В этом случае после $t_{уд} = 6$ мин/см² наблюдается отрицательное значение суммарного изменения массы катода, которое условно является началом критического хрупкого разрушения ИПС (T_x). В случае, если уменьшения массы катода не наблюдается, время хрупкого разрушения t_x условно принято равным 10 мин/см².



Рис. 2. Зависимость удельного и суммарного приростов массы и катода от удельного времени легирования при ЭИЛ стали 45 молибденом. 1 – удельный прирост массы катода; 2 – суммарный прирост массы катода

Исследования структур и свойств сформированных поверхностных покрытий показали, что для различных металлов, используемых в качестве легирующих материалов, обнаружены как индивидуальные проявления, связанные с их природой и теплофизическими свойствами, так и некоторые закономерности и сходства, объяснить которые можно на основе электронного и кристаллического строения. Характер формирования легированного слоя, согласно полученным авторами [2–5] резуль-

Знак * у символов металлов означает, что соответствующие им кривые были получены при ЭИЛ стали 45 анодами из этих металлов

татов, а именно: изменение прироста катода, эрозии анодов и соответственно эффективность процесса ЭИЛ зависят от энергии легирования, поэтому нами представлены результаты легирования на одном режиме.

Исследуемые материалы по характеру взаимодействия с железом можно условно разделить на следующие группы: образующие неограниченные твердые растворы (V, Cr, Co, Ni); ограниченно растворимые в сплавах железа (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Mo, W).

Наибольшие значения времени хрупкого разрушения t_x , среднего коэффициента переноса до t_x , суммарного прироста массы катода до t_x , суммарной эрозии анода до t_x и за 10 мин, эффективности формирования ЛС и эффективности процесса ЭИЛ стали 45 получены для металлов, образующих с железом неограниченные твердые растворы – V, Cr, Co, Ni, то есть на формирование слоя (при $t > 1$ мин/см²) оказывает влияние характер взаимодействия подложки и наносимого материала, поскольку прочность сцепления определяется их взаимной растворимостью [2, 3].

Как следует из рис. 1, для металлов, образующих ограниченные твердые растворы с железом, время t_x составляет от 2 до 10 мин, а для металлов, образующих неограниченные твердые растворы, более 10 мин. Следовательно, чем больше склонность материала анода к образованию твердых растворов с материалом катода, тем прочнее связь легированного слоя с материалом подложки.

На величину t_x оказывают влияние кислород и азот воздуха, так как из-за незначительной теплопроводности они способствуют образованию оксидов и нитридов, что приводит к изменению порога хладноломкости переходных металлов [2, 3].

По уменьшению порога хрупкого разрушения t_x при ЭИЛ стали 45 переходные металлы можно расположить в ряд: Ni > Cr > Co > V > Hf > Ti > Mo > Nb > W > Zr > Ta.

Кроме особенностей взаимодействия легирующих металлов с железом, на формирование измененного поверхностного слоя видимо, оказывают, влияние такие физические характеристики, как электросопротивление, теплопроводность, жаростойкость металла анода.

Таблица 1. Основные характеристики процесса легирования переходными металлами и металлами группы железа стали 45 ($E=0,512$ Дж)

Легирующий металл	t_x , мин	\bar{K} , %	$\Sigma K \cdot 10^{-4}$, см ³	$\gamma_{лс} \cdot 10^{-4}$, см ³ /мин	T_x , мин	$\Sigma A \cdot 10^{-4}$, см ³	$\Sigma A \cdot 10^{-4}$ за 10 мин, см ³	$\gamma_{ипс} \cdot 10^{-4}$, см ³ /мин
Ti	4	26	18,7	19,7	> 10	71	128	48,6
Zr	3	20	2,6	1,56	10	13	50,8	5,2
Hf	5	35	0,88	1,57	8	2,45	10,6	2,46
V	> 10	30,4	25	76	> 10	82	82	76
Nb	4	14	1,4	0,8	9	10	43,6	1,8
Ta	2	22	0,42	0,18	3	1,9	8,5	0,32
Cr	> 10	88	35,9	315	> 10	41,2	41,2	315
Mo	4	25	6	6,2	9	15,2	56	12,6
W	4	18	0,5	0,32	9	2,8	5,4	0,81
Ni	> 10	86	33,8	290	> 10	39,5	39,5	290
Co	> 10	74	25,5	189	> 10	34,5	34,5	189

Из табл. 1 следует, что наиболее низкий коэффициент переноса \bar{K} и невысокое значение t_x у металлов Zr, Nb, W, Ta. Это обусловлено хрупким разрушением вторичной структуры на аноде. У ниобия, например, низкий коэффициент переноса (14%), невысока и эффективность формирования легированного слоя, что связано с образованием при повышенной температуре малоустойчивых субоксидов, образующихся преимущественно у межзеренных границ, и дефектов, которые разрушаются уже при температуре 600°C. У тантала коэффициент переноса несколько выше, но $t_x = 2$ мин/см², что вызвано аналогичными причинами [6]. Соответственно прирост массы катода наименьший, что обусловлено также небольшой эрозией анода, так как температура плавления тантала высокая.

У вольфрама скорость окисления при температурах 800–1000°C достаточно высока, кроме того, образующийся на поверхности анода WO₃, о чем свидетельствуют результаты рентгенофазового исследования рабочих поверхностей электродов, не имеет защитных свойств, так как оксиды вольфрама сравнительно летучи [7]. Вольфрам с железом практически не образует твердых растворов, и это ухудшает условия формирования ИПС на катоде (сталь 45). Кроме того, в соответствии с результатами рентгенофазового анализа на поверхности всех легирующих металлов во вторичной структуре имеются α -Fe, интерметаллиды, нитриды, оксиды (табл. 2). Присутствие примеси железа в воль-

фреме снижает его жаростойкость [7], так же как наличие интерметаллидов и нитридов. Хотя при 500⁰С нитриды всех переходных металлов и металлов группы железа окисляются, кроме более стойких у титана и тантала, нитриды которых окисляются при 800⁰С и выше [8, 9].

Цирконий, несмотря на высокую температуру плавления, при 3000С образует аморфные оксиды со значительной дефектностью, чему способствует образование ZrN, который при 425⁰С размягчается. Для циркония при температуре до 600⁰С и на начальных стадиях нагрева характерны невысокая скорость окисления и образование оксидов с достаточно высокими защитными свойствами, затем, при более высоких температурах, скорость окисления увеличивается и наступает быстрое разрушение циркониевого покрытия как результат напряжений, вызванных выделением кристаллов ZrO₂ и ZrN. Окалина начинает отслаиваться, появляются частицы хрупкого разрушения. В результате – небольшое t_x (3 мин) невысокий прирост массы катода.

По имеющимся данным [8], титан окисляется с меньшей скоростью, чем цирконий, даже в начальный период окалина на нем образуется более тонкая, чем на цирконии. Однако при температурах выше 900⁰С в связи с конденсацией вакансий в окалине из рутила происходит заметное окисление титана. Негативную роль играет α -Fe, интерметаллиды (табл. 2), присутствие которых во вторичных структурах снижает жаростойкость титана, поэтому время хрупкого разрушения t_x невысоко (4 мин). Но коэффициент переноса у Ti выше, чем у Zr; Nb, Ta и суммарный прирост массы катода до t_x значительно превосходит соответствующие показатели у вышеперечисленных металлов (табл. 1).

При легировании гафнием время хрупкого разрушения составляет 5 мин, коэффициент переноса материала анода на катод до t_x несколько выше, чем у титана и циркония. При средних температурах в течение небольшого промежутка времени на гафнии с небольшой скоростью образуются достаточно устойчивые оксиды. При температурах 1000⁰С, 1200⁰С резко увеличивается скорость образования окарины, а по мере появления примесей – железа, интерметаллидов, нитридов (табл. 2) окисление принимает аномальный характер. В поверхностном слое образуются дефектные, хрупкие оксиды [9–11]. Этим, вероятно, можно объяснить тот факт, что коэффициент переноса (35%) до t_x выше, чем у циркония, но суммарный привес катода до t_x небольшой.

При ЭИЛ стали 45 электродами из молибдена происходит значительная эрозия анода, при этом коэффициент переноса равен 25%, что, видимо, связано с особенностями окисления на воздухе. Оксиды молибдена имеют самые слабые защитные свойства по сравнению с другими оксидами металлов. Согласно кинетическим кривым окисления Mo уже при температуре 800⁰С наблюдаются аномальное окисление, а также достаточно сильное испарение оксидов [10, 12, 13] и соответственно интенсивная убыль анода. Однако эффективность процесса легирования молибденом несколько выше, чем вольфрамом, танталом, ниобием, гафнием, что, вероятно, объясняется следующим. В первые минуты легирования перенос молибдена на катод достаточно высок. Это происходит, возможно, до момента, пока температура анода не достигнет температуры интенсивного окисления. Удельное электросопротивление у молибдена невысокое (5,4 Ом·см) при достаточно высокой теплопроводности. Вероятно, поэтому температура анода 900⁰С и выше достигается спустя некоторое время, после чего устанавливается стабильный массоперенос материала анода на катод.

Металлы, образующие неограниченные твердые растворы с железом, кроме того, обладают еще и достаточно высокой жаростойкостью. Из табл.1 видно, что высокий коэффициент переноса материала анода на катод (86%), суммарный привес катода (33,8 см³) и эффективность процесса легирования (290 см³/мин) наблюдаются в случае использования никеля в качестве легирующего металла. Известно, что никель обладает высокой жаростойкостью из-за прочного сцепления его оксидов с поверхностью металла и малой ионной проницаемости оксидной пленки, тормозящей диффузию [9–13]. На кинетических кривых окисления никеля [6] видно, что при 1200⁰С скорость образования окарины мала, и, так как присутствие железа во вторичных структурах повышает жаростойкость, это приводит к образованию оксидов никеля [11, 13].

У кобальта параметры процесса формирования ИПС (коэффициент переноса, суммарный привес катода, эффективность формирования легированного слоя, $\gamma_{\text{ипс}}$) ниже, чем у никеля и хрома. Объяснить, видимо, это можно тем, что при нагреве кобальта на воздухе выше 300⁰С он начинает медленно окисляться, но при 900⁰С и выше окисление идет быстрее. Низшие оксиды у кобальта достаточно устойчивы, высшие – менее стойки. У кобальта по отношению к другим тугоплавким металлам относительно низкое электросопротивление (9,7 Ом·см) и средняя величина теплопроводности, поэтому разогревание электрода (анода) происходит не слишком быстро. Но, как уже отмечалось, кобальт образует неограниченный твердый раствор с железом. Этим объясняются достаточно высокие параметры эффективности формирования ИПС.

Хром очень стоек к газовой коррозии при высоких температурах [13]. Оксидные пленки достаточно прочные, то есть хром обладает высокой жаростойкостью, но наличие элементов внедрения

приводит к некоторому снижению жаростойкости. И, как следствие, при легировании стали 45 хромом наблюдаются достаточно высокие характеристики формирования ИПС (коэффициент переноса 88%, эффективность процесса легирования 315 см³/мин).

Несколько ниже те же показатели у ванадия, хотя он тоже образует неограниченный твердый раствор с железом. При температурах ниже 450⁰С скорость окисления ванадия очень мала. При достаточно высоких температурах она увеличивается, причем образующиеся оксиды обладают термодинамической устойчивостью. Низшие оксиды более устойчивы, чем высшие. Они имеют решетку, связь в которой считается переходной между металлической и ионной. Переход от низших к высшим оксидам происходит в достаточно большом температурном интервале [8, 12]. Вероятно поэтому наибольший привес катода наблюдается в начале легирования. Теплопроводность у ванадия ниже, чем у никеля, кобальта, хрома, а электросопротивление (19 Ом·см) выше. Таким образом, анод, видимо, нагревается сильнее, чем у вышеперечисленных металлов.

Уменьшение прироста массы катода наблюдается в следующем порядке: Ti–Zr–Hf у металлов IV группы, V–Nb–Ta – у металлов V группы, Cr–Mo–W – у металлов VI группы, что также не противоречит ранее полученным данным [2–5].

Это, по-видимому, связано с тем, что количество эродированного материала анода определяется энергией атомизации металла, определяемой совокупностью физико-термических характеристик, таких как температура плавления анода, атомная теплоемкость, скрытая теплота плавления и испарения. Периодичность изменения этих характеристик аналогична во всех подгруппах и связана с электронным строением атомов и кристаллическим строением простых веществ [14].

В то же время повышение эрозии анода связано с такой важной химической характеристикой рассматриваемых металлов, как активность при высоких температурах к взаимодействию с кислородом и азотом воздуха. Растворение кислорода в поверхностных слоях катода и образование оксидов приводят к их разрушению при длительном ЭИЛ, вследствие чего снижается коэффициент переноса и ухудшается качество слоя, например у Ti.

Итак, для ЭИЛ переходными металлами наибольшая эффективность процесса ($\gamma_{лс}$ и порог хрупкого разрушения легированного слоя t_x) реализуется в случае образования электродами неограниченных твердых растворов и для легирующих металлов с достаточно высокой жаростойкостью, в частности наибольшие $\gamma_{лс}$ и t_x отмечались для Cr, Ni, Co и V.

Для определения структуры легированного слоя проведен рентгенографический анализ как поверхности, созданной электроискровым легированием на стали 45, так и анодных материалов.

Сформированные поверхностные слои в основном состоят из карбидов и интерметаллидов железа и легирующего материала, реже – оксидов. В большинстве сформированных покрытий обнаружено α -Fe, у хромовых и кобальтовых – γ -Fe. Сам же материал в легированном слое присутствует в случае образования неограниченных растворов с железом (кроме ванадия) и в случае легирования цирконием и гафнием.

Таблица 2. Результаты рентгенофазового исследования электродов после ЭИЛ стали 45 переходными металлами ($E=0,512$ Дж, $I=2,2A$)

Легировующий металл	Катод	Анод
Ti	α - Fe, TiO, Fe-C, FeTi, Fe ₂ Ti	α - Fe, Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , Fe ₂ Ti, Ti, TiN
Zr	α - Fe, ZrO ₂ , Zr (ω фаза), Fe Zr ₂	ZrO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Zr, α - Fe
Hf	α - Fe, Fe ₂ Hf, Hf, Fe ₂ O ₃ , FeC	Hf O ₂ , Fe ₂ O ₃ , Hf, α - Fe,
V	Fe ₂ O ₃ , FeV, V ₂ C	FeV, α - Fe, VN, VO
Nb	α - Fe, γ - Fe ₂ O ₃ , Fe Nb, Fe ₃ Nb ₂ C	α - Fe, Fe ₄ N, Nb, Nb N, Fe NbO ₄
Ta	α - Fe, Ta ₂ C, Fe ₃ Ta ₃	α - Fe, Ta, Ta ₂ O ₅ , Fe ₂ O ₃
Cr	Cr, CrN, Cr ₇ C ₃ , Fe ₂ C, γ - Fe	α - Fe, Cr, Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
Mo	Fe ₂ Mo, Fe ₂ C	α - Fe, Fe ₂ O ₃ , MoO ₃ , Fe ₄ N, Mo
W	α - Fe, Fe ₃ W ₃ C	α - Fe, Fe ₂ O ₃ , Fe ₄ N, W, WO ₃
Co	γ - Fe, Co, FeC	γ - Fe, Co, CoO, Co ₂ N
Ni	Ni, NiC	α - Fe, Ni, NiO, Fe ₄ N

Наличие карбидов в поверхностных слоях образцов обусловлено, видимо, тем, что переходные металлы на стальной подложке в жидком состоянии активно взаимодействуют с углеродом, со-

держаться в стали. Наиболее благоприятные условия формирования слоя возникают при ЭИЛ металлами, образующими с материалом подложки интерметаллиды – покрытия характеризуются повышенной твердостью (табл. 2).

Металлографические исследования показали, что наибольшие сплошность и минимальная пористость слоя достигаются при легировании хромом, никелем, кобальтом, ванадием (табл. 3).

Таблица 3. Физико-механические характеристики электроискровых покрытий на стали 45 переходными металлами ($E = 0,512$ Дж, $I = 2,2$ А)

Легирующий металл	Микротвердость, МПа	Толщина, мкм	Коэффициент упрочнения	Сплошность, %	Пористость, %	Шероховатость, мкм
Ti	10300	15-31	4	67	14	3,8
Zr	9860	12-29	3,8	50	11,5	3,4
Hf	8380	14-26	3,3	72	8,2	3,1
V	7940	16-37	3,1	91	10,2	2,36
Nb	7500	12-30	2,9	54	22	2,95
Ta	7300	10-25	2,8	52	15	3,3
Cr	8460	18-58	3,3	100	9,2	4,1
Mo	8540	9-26	3,29	57	17	3,8
W	9100	7-30	3,5	78	18	3,9
Ni	5920	18-70	2,3	100	6,8	4,3
Co	6320	15-56	2,5	99	7,2	3,8

Наличие карбидов в поверхностных слоях образцов обусловлено, видимо, тем, что переходные металлы на стальной подложке в жидком состоянии активно взаимодействуют с углеродом, содержащимся в стали. Наиболее благоприятные условия формирования слоя возникают при ЭИЛ металлами, образующими с материалом подложки интерметаллиды – покрытия характеризуются повышенной твердостью (табл. 2).

Из представленных результатов таблицы 3 видно, что коэффициент упрочнения легированного слоя в общем случае уменьшается от металлов IV группы к металлам VI группы и металлам группы железа. Высокие значения коэффициента упрочнения у металлов IV группы, вероятно, можно объяснить их склонностью к образованию фаз внедрения, характеризующихся повышенной твердостью (карбиды, оксиды, интерметаллиды).

Легирование стали 45 металлами Ti, Zr, Hf приводит к образованию в поверхностном слое за счет кислорода воздуха оксидных фаз, характеризующихся значительной долей ковалентности связи. Для металлов VI группы эти фазы рентгенофазовым исследованием не фиксируются.

По результатам металлографического исследования установлено, что покрытие состоит из поверхностного слоя, белого слоя, зоны термического воздействия искровых разрядов, толщина которых увеличивается при увеличении энергии воздействия. Рентгенофазовый анализ образцов (табл. 2), легированных титаном, показал наличие твердого раствора железа в титане. При легировании цирконием и гафнием выделены интерметаллиды соответственно циркония и гафния и их оксиды.

При легировании ниобием обнаружены следы железа, интерметаллид и карбид ниобия. В слоях, образованных танталом, также присутствуют карбид тантала Ta_2C и интерметаллид.

При исследовании образцов, легированных хромом, выявлены нитриды хрома, карбид хрома, что объясняет достаточно высокий коэффициент упрочнения поверхностей. При легировании молибденом покрытия представляют собой интерметаллид молибдена и карбид железа. Коэффициент упрочнения при этом достаточно высокий. Покрытие, полученное легированием подложки вольфрамом, представляет собой смесь двух фаз: $\alpha-Fe$ и Fe_3W_3C . Микротвердость белого слоя этого покрытия выше, чем у металлов V и VI групп.

Коэффициент упрочнения кобальтом стали 45 низкий (2,5) относительно коэффициентов упрочнения переходными металлами IV–VI групп. На поверхности выявлены следующие фазы: $\alpha-Fe$, Co, FeC. Микротвердость белого слоя при легировании никелем наименьшая.

Как видно из табл. 3 и результатов рентгенофазового исследования легированный слой с повышенным содержанием оксидов во всех случаях имеет большую микротвердость. В значительной степени качество поверхностного слоя и коэффициент переноса зависят от взаимной растворимости материалов анода и катода. В случае образования с железом неограниченных твердых растворов при-

рост массы катода и коэффициент переноса максимальный, и слой отличается достаточной толщиной, высокой сплошностью и небольшой пористостью. При легировании стали 45 металлами Nb, Ta, Mo пористость белого слоя наибольшая при относительно невысокой сплошности. Это согласуется с тем, что при высоких температурах на поверхности этих металлов образуются субоксиды (у ниобия и тантала), летучие оксиды у молибдена, которые легко разрушаются, поверхность анода охрупчивается, а продукты хрупкого разрушения переносятся на подложку. Легирование гафнием, обладающим наибольшей жаростойкостью, по отношению к другим переходным металлам IV группы, характеризуется небольшой пористостью и средней сплошностью покрытия. Титан при высоких температурах более устойчив к образованию оксидов, чем цирконий, и соответственно сплошность у слоя, легированного Ti, выше, хотя белый слой имеет темные включения, возможно, это фазы свободного графита. Вольфрам менее жаростоек, чем металлы, образующие неограниченные твердые растворы с железом, Hf, а также Ti. Сформированный слой на подложке из стали 45 обладает достаточно высокой пористостью и невысокой сплошностью.

Таблица 4. Удельное изменение массы металлов при высокотемпературном окислении ($t=15$ мин) [5]

Легировующий материал	Ti	Zr	Hf	Nb	Ta	Cr	Mo	W	Co	Ni
900°C	1,3	3,3	0,6	21,4	13,5*	0,08	-210	6,8	3,2	0,3
1000°C	5,4	10,1	1,8	10,7	40	0,2	–	10,3	4,5	0,5

*Ta при 600°C удельное изменение массы – 53,6 мг/см².

Таким образом, можно сделать вывод о том, что чем выше жаростойкость легировующего металла, тем лучше показатели формирования на электроде из стали 45 легированного слоя при ЭИЛ переходными металлами и металлами группы железа. Из табл. 4 видно, что самыми жаростойкими являются хром, никель, гафний, кобальт. Из них хром, никель, кобальт образуют неограниченные твердые растворы с железом, время хрупкого разрушения для этих металлов выше 10 мин, при этом у кобальта суммарный прирост массы катода, эффективность формирования легированного слоя ниже, чем у хрома и никеля. Гафний образует с железом ограниченный твердый раствор. Вероятно, ввиду его достаточно высокой жаростойкости, время хрупкого разрушения, коэффициент переноса у него выше, чем у других металлов, образующих ограниченные твердые растворы, используемых в данной работе. Согласно данным табл. 4 эти металлы по жаростойкости можно расположить в ряд: Ti, Zr, W, Nb, Ta, Mo. Параметры формирования легированного слоя для этих металлов ухудшаются практически в том же порядке за исключением молибдена.

Таблица 5. Удельное изменение массы стали 45 с электроискровыми покрытиями при высокотемпературном окислении [г/м²]

Легировующий материал	Сталь 45*	Ti	Zr	Hf	V	Nb	Ta	Cr	Mo	W	Co	Ni
900°C	45,08	11,1	32,5	9,67	-31,3	11,98	106,6	0	42,80	6,32	26,5	8,80
1000°C	131,2	29,2	157	27,6	-19,5	38,33	181,2	4,9	121,9	30,3	53,0	14,5

* Образец из стали 45 без ЭИЛ его поверхности, **покрытие при 1000°C полностью отслоилось.

У ванадия при 550°C удельное изменение массы составляет 0,5 мг/см². При 600°C ванадий окисляется до V₂O₅, имеющего температуру плавления 680°C и температуру разложения 700°C. В результате, несмотря на то, что ванадий образует с железом неограниченный твердый раствор, параметры формирования легированного слоя этим металлом гораздо хуже, чем Cr, Ni, Co. Причем основная масса материала анода переносится на катод в первые минуты легирования, пока температура анода не достигает 600–700°C.

Несмотря на некоторую несогласованность ожидаемых свойств покрытий, созданных с использованием жаростойких металлов, в основном наблюдается корреляция окисляемости металлов и сформированных ими покрытий. Только вольфрам, ниобий и молибден в легированном слое оказались менее жаропрочными, чем чистые металлы. Причины отклонений, вероятно, связаны со сложной структурой электроискровых покрытий за счет взаимной диффузии железа и углерода в поверхностный слой и возникновения карбидных, оксидных и интерметаллических фаз и шпинелей. Это согласуется с теорией жаростойкого легирования А.А. Смирнова и Н.Д. Томашова, в которой леги-

рующий компонент и основной металл должны образовывать твердый раствор при данном составе сплава. Только при этом условии удастся обеспечить сплошность покрытия за счет оксидов и металла на всей поверхности сплава. Учитывая закономерности изменения радиусов ионов металлов и близость их размеров с ионами железа, а также присутствие углерода в стали 45 ожидаемо согласованное влияние на жаростойкость покрытия металлов 4-го периода. Повышение жаростойкости при легировании металлами со значительным радиусом ионов объясняется устойчивостью к окислению их интерметаллических соединений.

Выводы

Кривые удельных зависимостей привеса катода и эрозии анода имеют характерную особенность: в течение некоторого времени t_x^* до образования на поверхностях электродов вторичных структур происходит уменьшение привеса катода и эрозии анода, а по истечении этого времени – стабилизация этих величин во времени.

Привес катода и эрозия анода уменьшаются в каждой группе от металлов 4-го до металлов 6-го периодов и в периодах от металлов IV до металлов VI группы, что связано преимущественно, с различными температурами плавления и температурами хрупкого разрушения для каждого из металлов. Наименьшие значения привесов катодов и эрозии анодов наблюдаются при легировании стали 45 танталом, вольфрамом, что вызвано их достаточно высокой температурой плавления и высокой температурой перехода в хрупкое состояние у вольфрама (300–600°C), и низкой у тантала (–200–290°C).

После ЭИЛ переходными металлами IV-VI групп и группы железа на поверхности стали 45 образуется композиционный материал слоистой структуры, состоящий из белого слоя, диффузионной зоны и зоны термического влияния. Белый слой представляет механическую мелкодисперсную смесь карбидов, интерметаллидов, оксидов, а также α - или γ -железа. При этом твердость “белого” слоя выше твердости стали.

Наиболее эффективно ЭИЛ металлами 4-го периода, так как массоперенос, толщина покрытия и время хрупкого разрушения для них максимальны.

Физико-химические характеристики покрытий позволяют рекомендовать для легирования металлы, которые кроме неограниченной растворимостью в металле подложки обладают еще и высокой жаростойкостью. Чем выше жаростойкость легирующего металла, тем лучше параметры формирования измененного поверхностного слоя.

Установлена корреляция между жаростойкостью легирующих металлов и окисляемостью сформированных этими металлами электроискровых покрытий. Наиболее жаростойкие поверхностные слои образуют хром и никель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николенко С.В., Коваленко С.В., Куценко В.С. и др. Устройство для электроискрового легирования. Патент №2146581.
2. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток, 1995.
3. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Владивосток, 1992.
4. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М., 1988.
5. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бобкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев, 1976.
6. Войтович Р.Ф., Головки Э.И. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов. Киев, 1980.
7. Войтович Р.Ф. Окисление циркония и его сплавов. Киев, 1989.
8. Сергеев А.Н. Тугоплавкие оксиды и их соединения в тонком слое. М., 1993.
9. Самсонов Г.В. Тугоплавкие покрытия. Киев, 1973.
10. Елютин В.П., Павлов Ю.А. Высокотемпературные материалы. М., 1972.
11. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии. М., 1966.
12. Войтович Р.Ф. Окисление тугоплавких соединений. М., 1978.
13. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие сплавы. М., 1986.
14. Самсонов Г.В., Прядко Л.Ф., Прядко И.Ф. Электронная локализация в твердом теле. М., 1976.

Поступила 10.08.04
Переработана 14.01.05

Summary

The research results of d- metal mass transfer under steel 45 electrosparking alloyage are presented. The formed surfaces were investigated with the X-ray structured method, the anode materials, intermetalids, as well as the oxides and nitrides of alloyed metals and iron were discovered. The mechanical properties of formed coverings were investigated. It was determined, that the presence of the products with the secondary structure brittle destruction worsens the alloyage efficiency and properties of coverings. It is most effective to use chrome, nickel and vanadium for forming surface layers, because these metals and iron form unlimited solutions. The correlation between the electrosparking alloyage efficiency and the anode materials thermo-physical properties and atomic characteristics was determined.

Ф.Х. Бурумкулов*, В.И. Иванов**, С.В. Вашкеба*

ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕСТОДЕЛИТЕЛЕЙ

**ГосНИТИ,*

1-й Институтский пр., 1, г. Москва, 109428, Россия

***НПФ «Техноинвест»*

бул. Троян, 21/3, офис 121, MD-2060, г. Кишинев, Республика Молдова

В настоящее время накоплен значительный опыт по восстановлению и упрочнению деталей электроискровой обработкой, обеспечивающий ремонт агрегатов с ресурсом на уровне нового изделия [1].

Отремонтированный агрегат, как правило, укомплектован деталями трех категорий: 1) бывшими в эксплуатации; 2) восстановленными; 3) из запасных частей, – отличающихся эксплуатационными свойствами. Поэтому его долговечность будет определяться не только качеством сборки и обкатки, но и количественным соотношением этих деталей и их надежностью, а также зависеть от того, с какой поверхностью взаимодействует восстановленная поверхность – новой или частично изношенной, так как от качества поверхностей и свойств поверхностных слоев контактирующих материалов зависят задиростойкость и износостойкость сопряжения, и, кроме того, потери на трение.

В процессе эксплуатации машин ресурс последовательно заменяемых деталей до двух раз ниже, чем ресурс тех же деталей, устанавливаемых в новое изделие, а коэффициенты вариации больше до 1,8 раза [1]. Следовательно, из объективных условий вытекает, что вероятность отказа машин и количество нересурсных отказов деталей в рядовых условиях эксплуатации больше, чем у нового агрегата. В пределе показатели надежности отремонтированных изделий, укомплектованных даже новыми деталями, хуже, чем у новых машин.

Мировая практика ремонта машин нацелена на восстановление 90–100% показателей надежности изделия при стоимости не более 60% от стоимости нового агрегата.

Достичь этой цели можно, если технологические решения основаны на знании процессов, протекающих при трении и изнашивании.

Обычно взаимное контактирование рабочих поверхностей деталей происходит по выступам микронеровностей на вершинах волн б (рис. 1,а). При первичном нагружении, как правило, происходит пластическая деформация выступов, то есть входящие в контакт выступы пластически сплющиваются с внедрением: внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации.

Площадь фактического контакта поверхностей составляет 0,01–0,0001 номинальной площади сопрягаемых поверхностей и состоит из множества дискретных, малых площадок б (рис.1,а), расположенных на различной высоте пятен касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. При взаимодействии поверхностей из двух различных материалов площадь фактического контакта

Summary

The research results of d- metal mass transfer under steel 45 electrosparking alloyage are presented. The formed surfaces were investigated with the X-ray structured method, the anode materials, intermetalids, as well as the oxides and nitrides of alloyed metals and iron were discovered. The mechanical properties of formed coverings were investigated. It was determined, that the presence of the products with the secondary structure brittle destruction worsens the alloyage efficiency and properties of coverings. It is most effective to use chrome, nickel and vanadium for forming surface layers, because these metals and iron form unlimited solutions. The correlation between the electrosparking alloyage efficiency and the anode materials thermo-physical properties and atomic characteristics was determined.

Ф.Х. Бурумкулов*, В.И. Иванов**, С.В. Вашкеба*

ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕСТОДЕЛИТЕЛЕЙ

**ГосНИТИ,*

1-й Институтский пр., 1, г. Москва, 109428, Россия

***НПФ «Техноинвест»*

бул. Троян, 21/3, офис 121, MD-2060, г. Кишинев, Республика Молдова

В настоящее время накоплен значительный опыт по восстановлению и упрочнению деталей электроискровой обработкой, обеспечивающий ремонт агрегатов с ресурсом на уровне нового изделия [1].

Отремонтированный агрегат, как правило, укомплектован деталями трех категорий: 1) бывшими в эксплуатации; 2) восстановленными; 3) из запасных частей, – отличающихся эксплуатационными свойствами. Поэтому его долговечность будет определяться не только качеством сборки и обкатки, но и количественным соотношением этих деталей и их надежностью, а также зависеть от того, с какой поверхностью взаимодействует восстановленная поверхность – новой или частично изношенной, так как от качества поверхностей и свойств поверхностных слоев контактирующих материалов зависят задиростойкость и износостойкость сопряжения, и, кроме того, потери на трение.

В процессе эксплуатации машин ресурс последовательно заменяемых деталей до двух раз ниже, чем ресурс тех же деталей, устанавливаемых в новое изделие, а коэффициенты вариации больше до 1,8 раза [1]. Следовательно, из объективных условий вытекает, что вероятность отказа машин и количество нересурсных отказов деталей в рядовых условиях эксплуатации больше, чем у нового агрегата. В пределе показатели надежности отремонтированных изделий, укомплектованных даже новыми деталями, хуже, чем у новых машин.

Мировая практика ремонта машин нацелена на восстановление 90–100% показателей надежности изделия при стоимости не более 60% от стоимости нового агрегата.

Достичь этой цели можно, если технологические решения основаны на знании процессов, протекающих при трении и изнашивании.

Обычно взаимное контактирование рабочих поверхностей деталей происходит по выступам микронеровностей на вершинах волн б (рис. 1,а). При первичном нагружении, как правило, происходит пластическая деформация выступов, то есть входящие в контакт выступы пластически сплющиваются с внедрением: внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации.

Площадь фактического контакта поверхностей составляет 0,01–0,0001 номинальной площади сопрягаемых поверхностей и состоит из множества дискретных, малых площадок б (рис.1,а), расположенных на различной высоте пятен касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. При взаимодействии поверхностей из двух различных материалов площадь фактического контакта

определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхности более твердого материала.

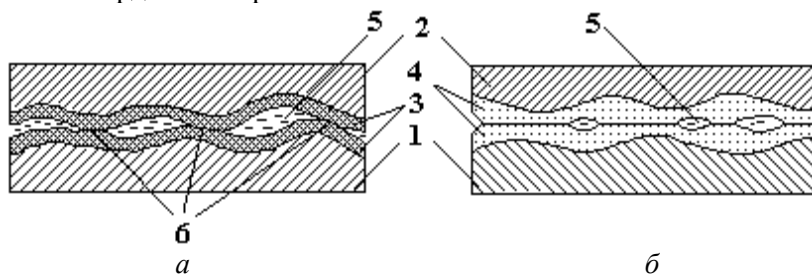


Рис. 1. Образования на поверхности контакта деталей при граничной смазке (а); при наличии медного покрытия и образования пленки (б): 1 – сталь; 2 – чугун; 3 – окисные пленки; 4 – квазиоживленные медные и особые пленки; 5 – смазка; 6 – микронеровности

Несущая способность смазываемой пары трения (величина давления, соответствующая переходу внешнего трения во внутреннее), в первом приближении, определяется из формулы [2]:

$$q_r = \frac{b \cdot HB}{2^{\nu+1}} \left[\frac{r}{R_z} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_0} \right) \right]^{\nu} \approx \frac{b \cdot HB \cdot r^{\nu}}{R_z^{\nu}} \left[\frac{h}{r} \right]^{\nu}, \quad (1)$$

где q_r – максимальная удельная нагрузка, воспринимаемая парой трения, определяемая по ГОСТ 23.224-86; HB – твердость более мягкого материала пары трения; b , ν – параметры кривой опорной поверхности; r – средний радиус закругления неровности более твердой поверхности; R_z – средняя высота неровностей более твердой поверхности, определяемая по десяти точкам; τ – прочность на срез адгезионной связи, образующихся «мостиков сварки»; σ_0 – предел текучести деформируемой, более мягкой поверхности; h – глубина внедрения.

Из формулы (1) следует, что напряженное состояние в зоне контакта двух микронеровностей известной формы определяется критериями τ/σ_0 и h/r . С их уменьшением несущая способность пары трения увеличивается, а коэффициент трения и интенсивность изнашивания уменьшаются.

Для повышения несущей способности соединения важным является радиус закругления микронеровностей более твердого тела. Чем он больше, тем с большей безопасностью две сопряженные трущиеся поверхности могут работать в режиме внешнего трения.

Критерий τ/σ_0 характеризует состояние поверхности трения более мягкого материала. Следовательно, величину прочности на срез адгезионной связи τ , образующихся «мостиков сварки», можно уменьшить нанесением относительно мягких покрытий (рис. 1, б) или двухслойных покрытий, верхний слой которых – это тонкое покрытие из мягкого материала.

При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты хрупкими окисными пленками (рис. 1, а), которые предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание, но одновременно препятствуют выходу дислокаций на поверхность, что ускоряет наклеп поверхностного слоя. Так как окисные пленки не способны многократно деформироваться, то в процессе трения они разрушаются. Кроме того, окисные пленки при трении препятствуют проникновению поверхностно-активных веществ к металлу, чем снижают эффект пластификации поверхностных слоев материала деталей и не создают условий для снижения сил трения между ними. В результате пластические деформации охватывают более глубокие слои участков контакта б (рис. 2, а), что увеличивает интенсивность изнашивания пары трения.

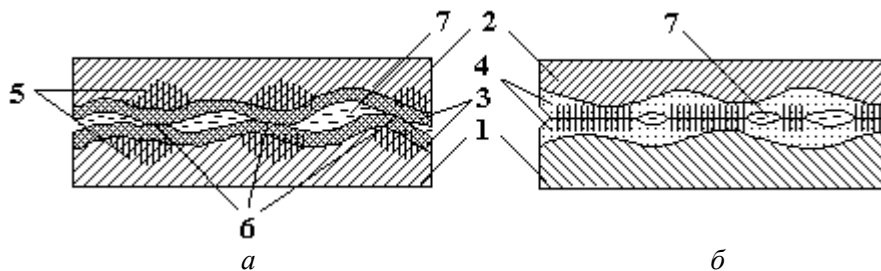


Рис. 2. Схема распространения деформаций в местах контакта при граничной смазке (а) и при наличии медного покрытия и образовании пленки (б): 1 – сталь; 2 – чугун; 3 – окисные пленки; 4 – квазиоживленные медные и особые пленки; 5 – напряженные зоны; 6 – микронеровности; 7 – смазка

Продуктами изнашивания при трении с граничной смазкой являются в основном окислы, которые не имеют электрического заряда, свободно уносятся из зоны трения и, перемещаясь между контактирующими поверхностями, оказывают на них абразивное действие.

Если пара трения работает в режиме избирательного переноса, то квазиоживленная пленка, по определению Д.Н. Гаркунова [3], это сервовитная пленка, спасающая поверхности трения от изнашивания. При наличии на поверхности трения сервовитной пленки продукты изнашивания состоят из частиц меди, поверхность которых пориста. Эти частицы очень активны, поэтому они покрываются адсорбционным слоем поверхностно-активных веществ. Такие частицы (мицеллы) имеют электрический заряд и под действием его сосредотачиваются в зазорах и могут переходить с одной поверхности на другую и схватываться, не вызывая повреждения этих поверхностей. Кроме того, сервовитная пленка, будучи мощным катализатором полимеризации, из составных частей смазки создает на поверхностях трения дополнительный защитный слой из полимерной пленки, предотвращающий их непосредственный контакт.

Толщина сервовитной пленки достигает 1–3 мкм, что часто перекрывает размеры неровностей многих деталей машин. При нанесении медных или бронзовых покрытий толщиной более 10 мкм на восстановленный слой сервовитная пленка может образовываться в течение времени, превышающего ресурс нового сопряжения, тем самым обеспечивая для отремонтированного узла ресурс не ниже, чем у нового узла.

В значительной степени реализуются требования, вытекающие из формулы (1), при использовании электроискровых технологий. Текстура электроискровых покрытий состоит из совокупности неровностей, близких по форме к шаровым сегментам, у которых радиус вершин неровностей во много раз больше, чем у неровностей после механической обработки [1]. Поэтому величина предельной глубины относительного внедрения неровности h/r в деформируемую поверхность минимальна, а несущая способность q_r максимальна.

Одной из областей эффективного применения электроискрового метода нанесения покрытий является современное хлебопекарное производство [4]. Это сложный технический комплекс, оснащенный энергетическим, технологическим и транспортным оборудованием. Среди многих объектов, подлежащих восстанавливающей и упрочняющей обработке электроискровым методом, можно выделить делительные устройства тестоделителей разных конструкций. Ремонт многих из них, производимых западными фирмами, не освоен ремонтными службами вследствие отсутствия необходимого оборудования, технологий и соответствующего опыта. Авторами наработан практический опыт ремонта делительных устройств тестоделителей с восстановлением изношенных деталей и обеспечением рабочих зазоров между ними в требуемых пределах.

В данной работе приведены сведения о ремонте делительных устройств тестоделителей «Parta-U1» (-U2», -U3») голландской фирмы «Werner und Pfleiderer Haton BV». В процессе ремонта производится восстановление размеров изношенных деталей путем нанесения покрытий на изношенные рабочие поверхности. Затем пригонкой достигается получение рабочих зазоров требуемой величины, соответствующей зазорам нового агрегата.

На рис. 3 показана схема вакуумного делительного устройства барабанного типа. В процессе эксплуатации этого устройства вследствие ряда причин (абразивное и коррозионное воздействие теста на металлические детали, трение деталей в непосредственном контакте) изнашиваются рабочие поверхности барабана, воронки бункера, корпуса всасывающей камеры, нагнетательного поршня, дозировочных поршней и камер, делительного ножа [3]. Износ рабочих поверхностей деталей делительного устройства на разных участках неоднороден по виду и величине и достигает местами 0,8 мм и более. Вследствие этого зазоры между ними выходят за допустимые пределы (0,05–0,07 мм), процесс всасывания становится не стабильным, и делительное устройство теряет работоспособность.

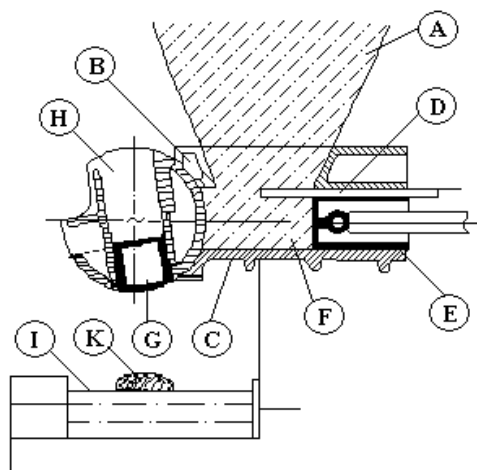


Рис. 3. Вакуумное делительное устройство барабанного типа: А – бункер; В – воронка бункера; С – корпус всасывающей камеры; D – заслонка (делительный нож); E – нагнетательный поршень; F – всасывающая камера; G – дозировочный (мерный) поршень; H – мерная камера задней заслонки (барабана); I – конвейерная лента; K – порция теста

Измерения высоты и ширины нагнетательного поршня показали, что средний износ по высоте равен 99,88 мкм при стандартном отклонении 5,74 мкм, а средний износ по ширине – 189,716 мкм при стандартном отклонении 9,44 мкм [4]. Обнаружено, что на всей площади поверхностей трения имеются борозды различной глубины (до 100 мкм), царапины, отдельные вмятины.

Результаты обследования дозирочных поршней показывают, что износ по высоте и ширине мерных поршней максимален в передней его части и может достигать 800–900 мкм. Участки трущихся поверхностей, находящиеся против окон, изношены в большей степени (в среднем на 250–300 мкм) в сравнении с остальной поверхностью.

В табл.1 и 2 приведены результаты измерений величины зазоров между поршнями и камерами делительного устройства. Видно, что суммарный боковой зазор между изношенными всасывающей камерой и главным поршнем достигает на отдельных участках значения 450 мкм.

Таблица 1. Величина бокового зазора между изношенными всасывающей камерой и нагнетательным (главным) поршнем*

Расстояние от переднего края камеры, мм	Значения зазора, мм (погрешность измерения $\pm 0,02$)					
	вверху		в средней части		внизу	
	слева	справа	слева	справа	слева	справа
0	0,15	0,02	0,12	0,05	0,20	0,18
25	0,18	0,08	0,18	0,10	0,22	0,22
50	0,30	0,15	0,20	0,20	0,22	0,22
75	0,25	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20
100	0,30	0,10	0,20	0,10	0,25	0,18
150	0,25	0,05	0,20	0,05	0,25	0,10
200	0,25	0,05	0,20	0,10	0,20	0,10

* Измерения осуществлялись между боковыми поверхностями камеры и передней частью поршня посредством комплекта щупов.

Таблица 2. Величина бокового и вертикального зазоров между изношенными дозирочными камерами и поршнями*

Расстояние от переднего края камеры, мм	Максимальные значения зазора в средней части камеры, мм ($\pm 0,02$)		
	слева	справа	сверху
Левая камера			
5	0,50	0,30	0,35
25	0,50	0,35	0,45
50	0,55	0,35	0,50
75	0,50	0,30	0,35
Правая камера			
5	0,10	0,10	0,40
25	0,10	0,15	0,45
50	0,05	0,15	0,45
75	0,05	0,15	0,40

*Измерения осуществлялись между поверхностями камеры и передней частью поршня посредством комплекта щупов.

Характерной особенностью всасывающей камеры является повышенный износ (300–400 мкм) нижней плоскости по всей ее ширине длиной 25–30 мм у выходной части. В связи с этим вертикальный зазор составляет 400–500 мкм и более. Значения суммарного бокового и вертикального зазоров между изношенными дозирочными камерами и поршнями превышают допустимую величину на 700–800 мкм.

Максимальный износ на наиболее изношенных участках рабочей поверхности барабана (задней заслонки) составляет 280–300 мкм, но может достигать и больших значений.

Фактический зазор между барабаном и всасывающей камерой измерялся на собранном делительном устройстве. Результаты измерения приведены в табл. 3. Как следует из табл. 3, зазоры в парах трения, значительно превышают допустимую величину.

Процесс восстановления технологического зазора между нагнетательным поршнем и всасывающей камерой, дозирочными поршнями и мерной камерой с плоскими поверхностями электро-

искровой наплавкой относительно несложен, хотя и является трудоемким. Восстановление же технологического зазора между барабаном и всасывающей камерой с воронкой бункера электроискровой наплавкой представляет серьезные трудности. Это связано с тем, что поверхности, образующие зазор, криволинейные, а износ неравномерен на разных участках барабана и ответных деталей.

Таблица 3. Величина зазора между барабаном и всасывающей камерой

Сечения	Значения зазора, мм (погрешность измерения $\pm 0,02$) в точках								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	0,06	0,15	0,15	0,13	0,10	0,20	0,18	0,21	0,07
Б	< 0,05	0,26	0,30	0,30	0,08	0,25	0,25	0,28	< 0,05
В	< 0,05	0,17	0,15	0,18	0,07	13	0,15	0,15	0,05
Г	< 0,05	0,09	0,10	0,08	< 0,05	0,12	0,11	0,10	< 0,05
Д	0,05	0,07	0,08	0,08	0,05	0,05	0,06	0,08	< 0,05
Е	< 0,05	0,16	0,14	0,15	0,09	0,15	0,15	0,13	< 0,05
Ж	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05

После восстановления размеров главного и мерных поршней и соответствующих камер с обеспечением требуемого зазора ведется восстановление необходимого зазора между барабаном и всасывающей камерой, а также барабаном и воронкой бункера.

С учетом конструктивных особенностей оборудования для ЭИО нанесение износостойкого твердосплавного покрытия производилось на установке «Элитрон-52Б» производства Опытного завода Академии наук Молдовы, а восстановление размеров изношенных деталей с устранением дефектов поверхности – на установке «Вестрон-31/1» российского производства. При этом использовался технологический опыт, описанный в [1]. Одной из особенностей технологии нанесения покрытий являлось использование в качестве электродов металлов и сплавов, разрешенных к использованию в пищевой промышленности [5].

Проведенные на нескольких московских хлебокомбинатах эксплуатационные испытания отремонтированных тестоделителей с восстановленными деталями показали, что работоспособность этих устройств не ниже, чем у новых, а стоимость восстановительного ремонта не превышает 40 тысяч рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов. Саранск, 2003.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., 1977.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М., 2001.
4. Бурумкулов Ф.Х., Иванов В.И., Евсеев П.Н, Молодых В.В. Ремонт оборудования хлебопекарной промышленности восстановлением размеров изношенных деталей электроискровой обработкой // Хлебопечение России. 2003. № 6.
5. Бурумкулов Ф.Х., Иванов В.И., Евсеев П.Н, Молодых В.В. Ремонт тестоделительного устройства вакуумного типа восстановлением размеров изношенных деталей электроискровой наплавкой // Хлебопечение России. 2004. № 2.

Поступила 11.08.04

Summary

Application of electrospark alloying at repairing of bread-baking equipment, providing operating life on the level of a new one, is considered. The analysis of the processes taking place during the friction and wearing is carried out. Results of the observation of wearing of the main units of bread-baking equipment are presented. Some elements of the repairing technique are given. Operating life of repaired equipment is not less than that of a new one.

А.И. Максимов, А.Ю. Никифоров, И.Н. Сергеева, Ю.В. Титова

ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР В РАСТВОРЕ ЭЛЕКТРОЛИТА

*Институт химии растворов РАН,
ул. Академическая, д.1, г. Иваново, 153045, Россия*

Введение

Сочетание химической активности неравновесной плазмы с особенностями химических и технологических процессов в растворах дает принципиальную возможность создания новых перспективных технологий, в том числе модифицирования природных и синтетических полимерных материалов. Использование тлеющего разряда, горящего между электродом в газовой фазе и раствором электролита, не позволяет полностью реализовать потенциальные возможности плазменно-растворных систем. Причина этого в том, что процесс активации раствора тлеющим разрядом сосредоточен в очень тонком поверхностном слое (сотые доли микрометра). В то же время первичные химически активные частицы H , OH , e_{solv} не только образуются в пределах этого тонкого слоя, но и гибнут там, рекомбинируя или вступая в химические взаимодействия. Это значит, что в случае обработки в активируемом таким образом растворе твердых тел реагировать реально могут только вторичные активные частицы, такие как пероксид водорода. Поэтому, например, эффективность модифицирования поверхности полимерных материалов обработкой в активируемом тлеющим разрядом растворе много ниже эффективности действия плазмы пониженного давления. Для повышения эффективности химического действия плазменно-растворных систем необходимо создавать зону плазмы непосредственно в растворе, причем таким образом, чтобы была возможность регулируемого чередования прямого действия плазмы на обрабатываемый материал с воздействием активированного раствора.

Плазма в объеме раствора создается импульсными разрядами [1–4]. Однако короткоживущая (микросекунды) плазма, локализованная в узких каналах, вряд ли подходит для равномерной обработки помещаемых в раствор объектов.

Поэтому разработка плазменно-растворных систем, в которых плазменный объем внутри раствора характеризовался бы достаточно большим объемом и большой длительностью существования, является актуальной задачей.

Низковольтные разряды промышленной частоты в объеме раствора электролита

Диафрагменный разряд

К этому типу плазменно-растворных систем можно отнести низковольтный диафрагменный разряд, описанный нами ранее [5, 6]. Такой разряд возникает в ячейке, разделенной на две части диэлектрической перегородкой с малым отверстием (десятые доли миллиметра). При достижении критической плотности тока в диафрагме создается паровой пузырек, размыкающий цепь. При достаточно высокой ЭДС источника (при использовании переменного тока нужно также учитывать ЭДС самоиндукции) происходит пробой пузырька с последующим схлопыванием плазменного пузырька и распространением в растворе звуковой волны (рис. 1). Технологические эффекты такого разряда связаны как с генерацией химически активных частиц, так и с возникающими кавитационными эффектами. Прямое действие плазмы в этой системе ограничено областью диафрагмы и небольшим прилегающим к диафрагме пространством. В результате диафрагменный разряд оказывается эффективным при стерилизации воды и водных растворов [7], но в случае обработки таких материалов, как полимерные пленки и ткани, возникают указанные выше проблемы.

Объемный бездиафрагменный разряд переменного тока в растворе электролитов. Феноменология

В процессе исследований диафрагменного разряда в разных конструкциях ячеек нами обнаружено, что плазменные образования возникают в объеме раствора в достаточно широких трубках (в описываемых ниже опытах внутренний диаметр трубок составлял около 6 мм).

Конструкция ячеек ясна из рис. 2–6. В экспериментах использовались растворы хлорида калия с концентрацией 1 г/л и KCl с красителем метиленовым синим. С помощью перистальтического насоса производилась циркуляция раствора в системе.

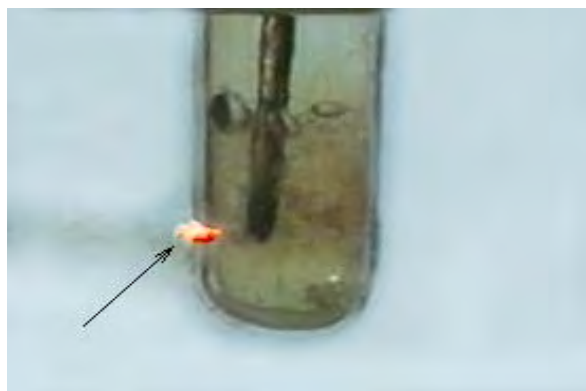


Рис. 1. Возникновение диафрагменного газового разряда атмосферного давления

Для зажигания разряда использовался однофазный трансформатор, обеспечивающий напряжение до 2 кВ при токе нагрузки до 1 А. Трансформатор присоединялся к погружаемым в раствор электролита электродам из нержавеющей стали непосредственно без балластного сопротивления. Ток в цепи и падение напряжения на ячейке контролировались с помощью схемы с АЦП Minilab 1008 и компьютером. Для феноменологических исследований разряда производилась его аналоговая съемка с помощью видеокамеры.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Эксперименты показали следующие свойства объемного разряда.

1. Разряд представляет собой последовательность плазменных сгустков, стохастически образующихся в растворе (не синхронизовано с внешним напряжением) и перемещающихся вдоль трубки, как правило, в направлении потока раствора.
2. Плазменный сгусток может иметь форму цилиндра, диска или кольца, которые могут не перекрывать все сечение проводящего канала или возникать в широком участке ячейки (рис. 2, 4).
3. Длина светящегося столба может достигать приблизительно четырех внутренних диаметров трубки и составляет 25 мм (рис. 2).

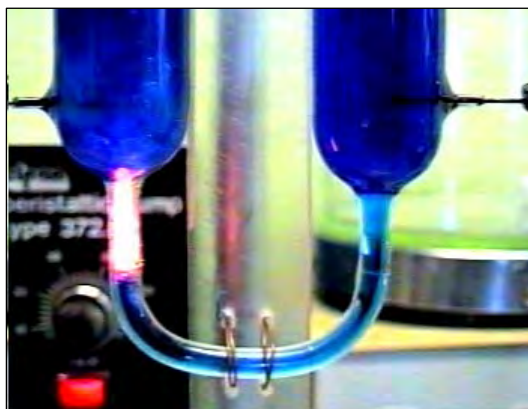
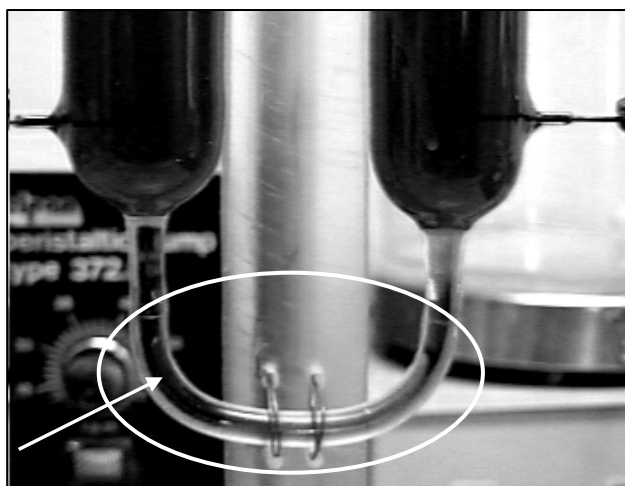


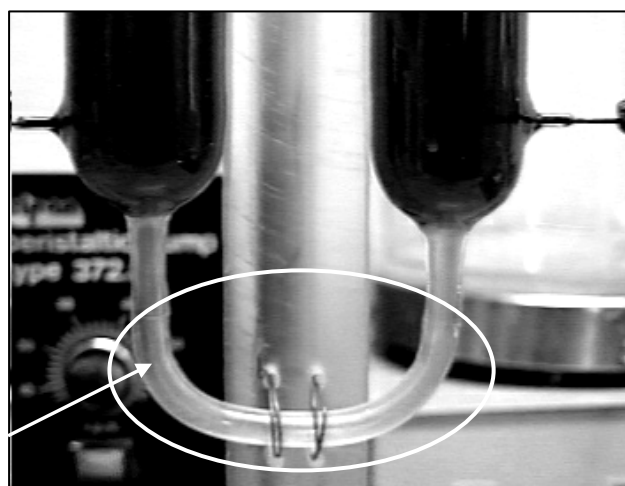
Рис. 2. Цилиндрическое плазменное образование в растворе электролита

4. Максимальное время жизни плазменного сгустка на основе видеосъемки со скоростью 25 кадров в секунду можно оценить не менее чем за 0,2 с. Для сравнения укажем, что время «схлопывания» диафрагменного разряда меньше примерно на два порядка. Эта величина согласуется с оценками, полученными на основе осциллограмм напряжения разряда.

5. Типичный цилиндрический плазменный сгусток имеет яркую (бесцветную) «сердцевину» с красной «окантовкой» с двух сторон. При малой толщине сгустка красная «окантовка» проявляется с одной стороны (в передней части сгустка по направлению потока раствора). Красное излучение принадлежит резонансной линии атомов калия.



а



б

Рис. 3. Раствор метиленового синего в трубке при прохождении тока до зажигания разряда. Кадры а и б разделяет временной интервал 0,04 с

6. Часто наблюдается (в масштабах возможностей наблюдений на видеосъемках с частотой 25 Гц) одновременное существование не менее трех светящихся зон, расположенных вдоль оси системы и образующих плазменную структуру (рис. 6).

7. При достаточно длительном горении разряда, когда температура раствора в левой (нижней по потоку) части ячейки приближается к 100°C , возникают яркие «сплохи» свечения в этом сосуде вблизи впаянного электрода (рис. 5). Форма светящихся областей, вероятно, определяется интенсивным турбулентным перемешиванием пароводяной смеси в этой области.

8. Зажиганию разряда предшествует скачкообразное изменение внешнего вида раствора в трубке. Синий прозрачный раствор красителя метиленового синего через 1/25 с становится гораздо более светлым «белесым» и менее прозрачным (рис. 3). В дальнейшем зажигание разряда происходит только в области «белесого» раствора или на ее границе.

Таким образом, анализ видеосъемок показывает, что возникающий в объеме электролита на частоте 50 Гц разряд нельзя отнести к типу уже изученных плазменно-растворных систем. Одновременное наблюдение нескольких плазменных сгустков, разнообразие их форм и длительность существования позволяют говорить о формировании самоорганизующихся плазменных структур, появление и свойства которых зависят от свойств раствора. Несмотря на кажущееся сходство с диафрагменным разрядом, природа этих разрядов, по-видимому, существенно различается. Об этом говорит со-

поставление осциллограмм тока и напряжения, а также динамических вольт-амперных характеристик (фазовых портретов) этих разрядов, представленных на рис. 7–10.

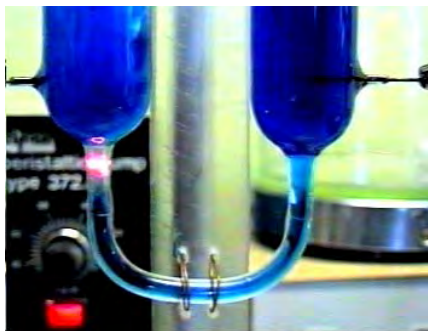


Рис. 4. Сосуществование цилиндрического и кольцевого плазменных сгустков

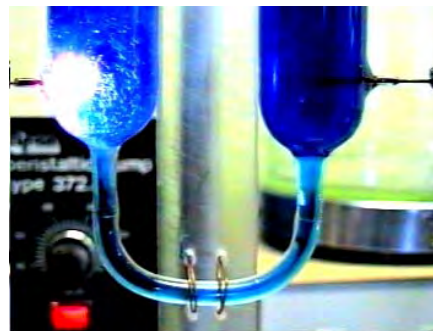


Рис. 5. Плазменный сгусток в районе электрода

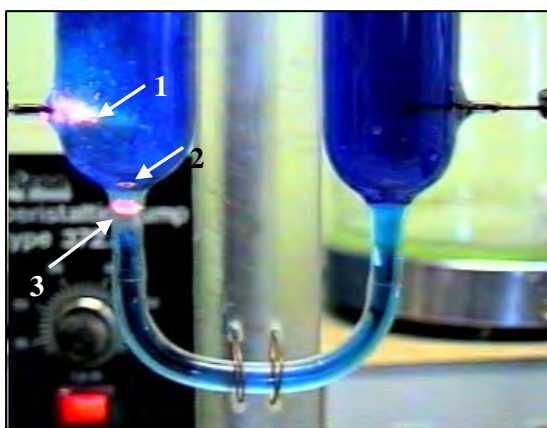


Рис. 6. Сосуществование трех плазменных сгустков, указанных цифрами 1, 2, 3

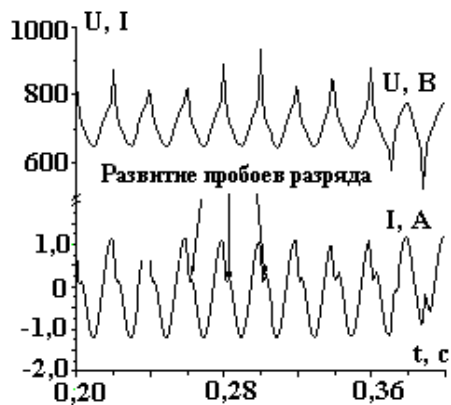


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения диафрагменного разряда

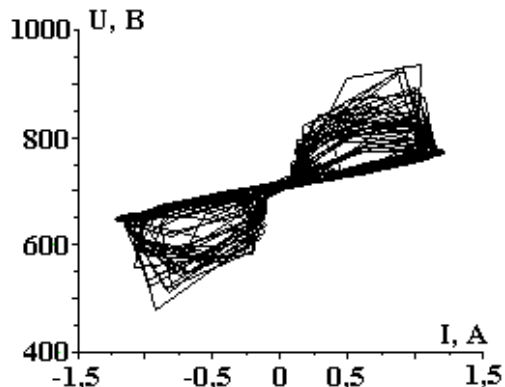


Рис. 8. Фазовый портрет диафрагменного разряда

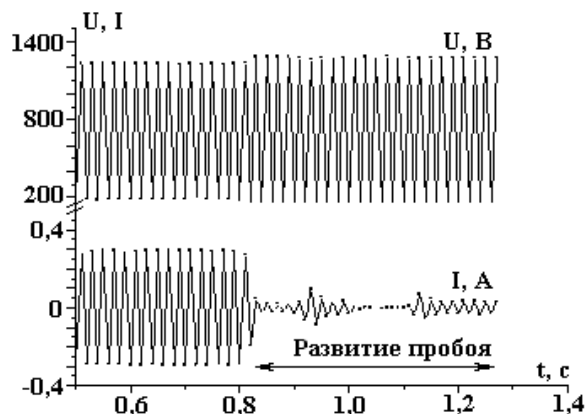


Рис. 9. Осциллограммы тока и напряжения объемного разряда

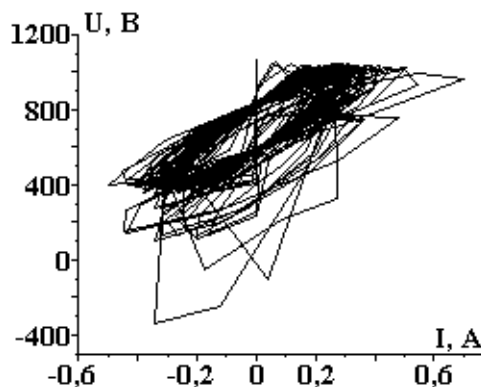


Рис. 10. Фазовый портрет объемного разряда

Если формирование диафрагменного разряда синхронизовано с частотой внешнего напряжения, то в случае объемного разряда наблюдаются стохастические импульсы тока, модулированные частотой 50 Гц. При этом фазовый портрет близок по внешнему виду к странному аттрактору.

Проведенные предварительные эксперименты показали, что обработка льняной ровницы в объемном разряде вызывает существенное уменьшение содержания лигнина и может приводить (в зависимости от режима) к изменению средней молекулярной массы полимера. Эффективность технологического действия объемного разряда намного выше, чем у тлеющего и диафрагменного разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Šunka P. Pulse electrical discharges in water and their applications // *Physics of Plasmas*. 2001. Vol. 8. No 5. P. 2587–2594.
2. Šunka P., Babicky V., Člupek M., Fuciman M., Lukeš P., Šimek M., Beneš J., Locke B., Majcherova Z. Potential applications of pulse electrical discharges in water // Institute of Physics, SAS, Bratislava, Slovakia Submitted to *acta physica Slovaca*, 1–11, January 13, 2003.
3. Miichi T., Ihara S., Satoh S., Yamabe C. Spectroscopic measurements of discharges inside bubbles in water // *Vacuum*. 2000. Vol. 59. P. 236–243.
4. Ihara S., Tomoaki S., Chobei Y., Eiji S. Ozone generation by a discharge in bubbled water // *Japan J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 38. Part1. No 7B. P. 4601–4604.
5. Стройкова И.К., Максимов А.И. Обеззараживание растворов тлеющим и диафрагменным разрядами атмосферного давления // *Электронная обработка материалов*. 2002. № 6. С. 43–49.
6. Сергеева И.Н., Титова Ю.В., Максимов А.И. Исследование действия тлеющего и диафрагменного разрядов атмосферного давления на раствор метиленового синего // *Электронная обработка материалов*. 2002. № 4. С. 34–38.
7. Патент РФ. Способ стерилизации МПК7 А61L 2/02,2/03, 2/14. Стройкова И.К., Максимов А.И., Кузнецов О.Ю. и др. Решение о выдаче 18 июня 2002 г.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № нш-1829.2003.

Поступила 02.02.04

Summary

The passage of the current under industrial frequency (the voltage 1–2 kV) through dielectrical tubes filled with electrolyte solutions cause the formation of plasma structures, involving up to three simultaneously existing plasmoids. Their appearance may be as cylinder with the length up to four diameters of the tube, disk or ring. These structures move along tubes, as a rule, in the direction of the solution movement, and their lifetime is up to 0.2 s. The discharge current in the period of plasmoid existence is the sequences of pulses with the mentioned above duration, modulated with the frequency of 50 Hz. This type of plasma-solution system is characterized by high efficiency of modification action at high-molecular compounds.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОД ЗАРЯЖЕННОЙ СТРУИ

*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150000, Россия*

1. Исследование временной эволюции и дробления во внешних электрических полях движущихся заряженных струй представляет интерес в связи с многочисленными академическими, техническими и технологическими приложениями феномена. Оно неоднократно выполнялось в прошедшем столетии как экспериментально, так и теоретически в линейной и нелинейной постановках аналитическими и численными методами. Так, относительно недавно [1–8] экспериментально и теоретически анализировался вопрос о равновесных формах таких струй. Сделанные при этом выводы не всегда понятны, в частности теоретические исследования равновесных форм струй в [6–8] выполнены для осесимметричных волн, описываемых функциями Бесселя более высоких порядков, чем нулевой, тогда как реально осесимметричные волны на поверхности струи описываются функциями Бесселя только нулевого порядка. В [9–23] основной акцент был сделан на исследовании устойчивости заряженных струй по отношению к бесконечно малым периодическим деформациям. Теоретические исследования в этом направлении выполнялись в линейном приближении по амплитуде деформации для осесимметричных мод, а основным результатом проведенных расчетов было дисперсионное уравнение, на основе которого изучалась устойчивость струи. Однако получаемые в различных математических постановках дисперсионные уравнения не лишены недостатков: в [19], например, допущена ошибка при записи компоненты дисперсионного уравнения, характеризующей давление электрического поля, а в [21–23], где предполагалось исследовать влияние эффекта релаксации электрического заряда на струе на ее устойчивость неверно выписано уравнение баланса поверхностного заряда (отсутствует слагаемое, связанное с кривизной поверхности струи), следовательно, неверны и полученные результаты.

В работах [24–32] исследовалась нелинейная устойчивость незаряженных струй в отсутствие внешних электрических полей. Строгие аналитические асимптотические расчеты выполнены лишь в приближении идеальной жидкости. Имеющиеся нелинейные анализы для струй вязкой жидкости [30–33] проведены либо численно [30–31, 33] при достаточно произвольных допущениях, либо для весьма грубых математических моделей [32, 33]. Так, в [32] использованы приближенные одномерные уравнения, выведенные в предположении, что поперечный масштаб изменения поля скоростей много меньше продольного, и справедливы лишь для весьма длинных волн. Во всяком случае, допущения, принятые при выводе этих уравнений, не справедливы, а эти уравнения незаконны при описании финальной стадии распада струи на капли, на что указывалось еще в [34]. Единственная работа, посвященная исследованию нелинейной устойчивости заряженной поверхности струи [33], выполнена численными методами для струи вязкой жидкости конечной длины, но для грубой математической модели при весьма произвольных допущениях.

Несмотря на упомянутые многочисленные исследования устойчивости и дробления заряженных струй, многое в физике остается до сих пор не выясненным и по-прежнему привлекает внимание ученых. Сказанное, в частности, относится к анализу устойчивости неосесимметричных мод осцилляций. И связано это с тем, что большая часть ранее проведенных по этому вопросу исследований была ориентирована на получение потоков монодисперсных капель, проблема же спонтанного распада сильно заряженных струй, выбрасываемых с вершин свободно падающих капель [35] и менисков жидкости на торцах капилляров [10, 14, 36–38], до сих пор исследована весьма поверхностно. В экспериментальных работах [10, 14, 35–38] зафиксировано «хлыстообразное» движение конца распадающейся на капли струи, что связано согласно [39, 40] с возбуждением неосесимметричных мод ка-

пилярных осцилляций струи.

В связи со сказанным нами будет проведено аналитическое асимптотическое исследование нелинейных осцилляций неосесимметричных волн на поверхности заряженной идеально проводящей струи (в линейной постановке эта задача была рассмотрена в [39, 40]) в рамках метода многих масштабов, использованного ранее в [24] для изучения нелинейных осцилляций незаряженной струи.

2. Рассмотрим движущуюся с постоянной скоростью \vec{U}_0 бесконечную струю постоянного радиуса R идеальной несжимаемой идеально проводящей жидкости с плотностью ρ и коэффициентом поверхностного натяжения σ . Примем, что внешняя среда отсутствует, однако в окружающем струю пространстве создано электростатическое поле, перпендикулярное оси струи. Вследствие этого на поверхности распределен заряд, поверхностная плотность которого в равновесном состоянии, то есть в условиях отсутствия каких-либо возмущений цилиндрической формы струи, имеет величину χ .

Исследование проведем в цилиндрической системе координат, начало которой движется со скоростью \vec{U}_0 , а ось OZ направлена вдоль струи по направлению ее движения: $\vec{n}_z \parallel \vec{U}_0$. Очевидно, что в такой системе координат поле скоростей движения жидкости в струе будет полностью определяться капиллярными колебаниями ее поверхности.

Проследим эволюцию во времени распространяющейся по поверхности струи в положительном направлении оси OZ неосесимметричной волны с волновым числом k , амплитуда которой мала по сравнению с радиусом струи.

Все рассмотрение проведем в безразмерных переменных, приняв в качестве основных единиц R , ρ , σ (то есть, полагая, $R = \rho = \sigma = 1$). В этом случае уравнение свободной поверхности струи, возмущенной капиллярным волновым движением, запишется в виде $r = 1 + \xi(\varphi, z, t)$, где $|\xi| \ll 1$, r , φ , z – цилиндрические координаты, t – время, ξ – функция, описывающая искажение равновесной цилиндрической формы струи.

В рамках модели потенциального течения математическая формулировка задачи о расчете временной эволюции виртуального волнового возмущения поверхности струи будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta\Psi &= 0, & \Delta\Phi &= 0 \\ r \rightarrow 0: & |\nabla\Psi| \rightarrow 0; & r \rightarrow \infty: & |\nabla\Phi| \rightarrow 0; \\ r = 1 + \xi: & \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla\Psi \cdot \nabla F = 0; & F(r, \varphi, z, t) &\equiv r - [1 + \xi(\varphi, z, t)]; \\ \Delta P - \frac{\partial\Psi}{\partial t} - \frac{1}{2}(\nabla\Psi)^2 + \frac{1}{8\pi}(\nabla\Phi)^2 - \nabla \cdot \vec{n} &= 0; & \Phi &= \Phi_s(t). \end{aligned}$$

Здесь ΔP – перепад давлений внутри и вне струи в равновесном состоянии ($\xi = 0$, $\Psi = 0$); предпоследнее и последнее слагаемые – давления электрического поля и сил поверхностного натяжения соответственно; \vec{n} – вектор нормали к поверхности струи: $\vec{n} = \nabla F / |\nabla F|$.

Сформулированную краевую задачу следует дополнить условиями сохранения заряда и объема участка струи, длина которого равна длине волны $\lambda = 2\pi/k$:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{4\pi} \oint_S (\vec{n} \cdot \nabla\Phi) r \cdot d\varphi \cdot dz &= 2\pi\chi\lambda; & S &= \begin{cases} r = 1 + \xi(\varphi, z, t); \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi; \\ z_0 \leq z \leq z_0 + \lambda; \end{cases} \\ \int_V r \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz &= \pi\lambda; & V &= \begin{cases} 0 \leq r \leq 1 + \xi(\varphi, z, t); \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi; \\ z_0 \leq z \leq z_0 + \lambda. \end{cases} \end{aligned}$$

Для полного замыкания выписанной системы уравнений необходимо задать еще начальные условия. Однако в силу того, что начальные условия произвольного вида могут привести к чрезмерной громоздкости получаемого решения, в нелинейных задачах об отыскании периодических волновых профилей поверхности идеальной жидкости принято выбирать начальные условия так, чтобы

решение принимало наиболее простой вид [24]. Поэтому примем, что в начальный момент времени скорости всех точек свободной поверхности струи нулевые, а форма струи определена выражением

$$r = 1 + \varepsilon \left[\left(\zeta^{(+)}(\varepsilon \cdot t) \cdot \exp(im\varphi) + \zeta^{(-)}(\varepsilon \cdot t) \cdot \exp(-im\varphi) \right) \cdot \exp(i\theta) + (к.с.) \right] + O(\varepsilon^2),$$

где $\theta \equiv k \cdot z - \omega_m(k) \cdot t$, $\omega_m(k)$ – частота волны с волновым числом k и азимутальным числом m ; аббревиатура «к.с.» означает комплексно сопряженные слагаемые; ε – малый параметр, в качестве которого возьмем отношение амплитуды волны к радиусу струи; $\zeta^{(\pm)}(\varepsilon \cdot t)$ – амплитудные коэффициенты, являющиеся функциями времени.

Будем искать методом профиль струи, совершающей нелинейные неосесимметричные осцилляции, в виде разложения по ε с точностью до второго порядка малости включительно.

3. В нулевом приближении будем иметь равновесное состояние, которому соответствует неподвижный (в движущейся системе координат) цилиндрический столб жидкости с постоянной поверхностной плотностью заряда χ . Электрическое поле в окрестности невозмущенного однородно заряженного цилиндрического столба определяется потенциалом

$$\Phi^{(0)}(r) = -4\pi\chi \ln(r).$$

Динамическое граничное условие в нулевом приближении позволяет определить равновесный перепад давлений на поверхности струи

$$\Delta p = 1 - 2\pi\chi^2.$$

4. Решая сформулированную задачу с точностью до слагаемых второго порядка малости, можно найти форму струи как функцию времени в виде выражения

$$r(z, \varphi, t) = 1 + \varepsilon \cdot \cos(m\varphi) \cdot \cos(\theta) - \frac{\varepsilon^2}{8} \cdot [1 - (a_1 \cdot \cos(2m\varphi) + a_2) \cdot \cos(2\theta) - a_3 \cdot \cos(2\varphi)];$$

$$a_1 \equiv \frac{2G_{2m}(2k) \cdot [Y_1 + \chi L \cdot H_{2m}(2k)] + 2\omega_m(k) X_1}{4\omega_m^2(k) - \omega_{2m}^2(2k)}; \quad G_m(k) \equiv \frac{k \cdot I'_m(k)}{I_m(k)}; \quad H_m(k) \equiv \frac{k \cdot K'_m(k)}{K_m(k)};$$

$$a_2 \equiv \frac{2G_0(2k) \cdot [Y_2 + \chi L \cdot H_0(2k)] + 2\omega_m(k) X_2}{4\omega_m^2(k) - \omega_0^2(2k)}; \quad a_3 \equiv \frac{2(Y_3 - 2m\chi L)}{(1-2m)(1+2m-4\pi\chi^2)};$$

$$X_1 = \frac{\omega_m(k)}{G_m(k)} [2(k^2 + m^2) - G_m(k)]; \quad X_2 = \frac{\omega_m(k)}{G_m(k)} [2k^2 - G_m(k)];$$

$$Y_1 = 1 + \frac{1}{2}(k^2 - 5m^2) + \frac{\omega_m^2(k)}{2(G_m(k))^2} [k^2 + m^2 - 3(G_m(k))^2] +$$

$$+ 2\pi\chi^2 [3k^2 + 3m^2 - 3 - 4H_m(k) - (H_m(k))^2];$$

$$Y_2 = 1 + \frac{1}{2}(k^2 - 3m^2) + \frac{\omega_m^2(k)}{2(G_m(k))^2} [k^2 - m^2 - 3(G_m(k))^2] +$$

$$+ 2\pi\chi^2 [3k^2 + m^2 - 3 - 4H_m(k) - (H_m(k))^2];$$

$$Y_3 = 1 - \frac{1}{2}(k^2 + 5m^2) + \frac{\omega_m^2(k)}{2(G_m(k))^2} [k^2 - m^2 - (G_m(k))^2] +$$

$$+ 2\pi\chi^2 [k^2 + 3m^2 - 3 - 4H_m(k) - (H_m(k))^2]; \quad L = -2\pi\chi [1 + 2H_m(k)];$$

$$\omega_m^2(k) = \frac{k \cdot I'_m(k)}{I_m(k)} \left[k^2 + m^2 - 1 + W \cdot \left(1 + \frac{k \cdot K'_m(k)}{K_m(k)} \right) \right]; \quad W \equiv 4\pi \cdot \chi^2.$$

Расчеты по полученным выражениям при $\varepsilon = 0,3$ и докритических в смысле реализации неустойчивости струи по отношению к поверхностному заряду значениях параметра W в пакете аналитических вычислений «Matematica» иллюстрируются рис.1, где для первой и третьей мод ($m = 1, 3$) приведены трехмерные изображения поверхности нелинейно осциллирующих струй в

момент времени: $t = 0,25 T$, где T – период волн. Критическое в смысле реализации неустойчивости струи по отношению к поверхностному заряду (проявляющейся в дроблении струи на капли) для фиксированного m значение параметра W , характеризующего давление электрического поля на поверхность струи, находится из требования обращения в ноль квадрата частоты в дисперсионном уравнении [39, 40]: $\omega_m^2(k) = 0$. Напомним, что для $m = 0$ картинка, аналогичная приведенным рисункам представляет собой правильное чередование осесимметричных расширений и сжатий на поверхности цилиндрической струи.

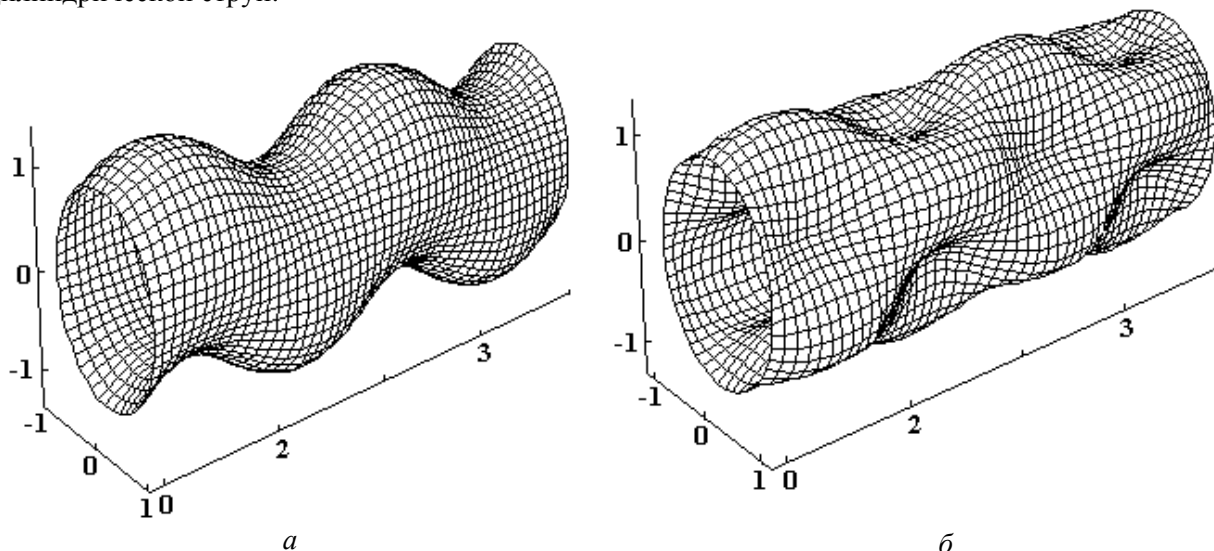


Рис. 1. Формы поверхности нелинейно осциллирующих струй при докритических в смысле устойчивости по отношению к собственному заряду значениях поверхностной его плотности, рассчитанные при $\varepsilon = 0,3$, $W=1$, $k=2$: а) $m=1$; б) $m=3$

Из приведенных рисунков видно, что, по всей видимости, возбуждение «хлыстообразного» движения струй [39, 40] связано с одновременным возбуждением моды с $m = 1$ и одной из более высоких мод с $m \geq 2$. Видно также, что при реализации неустойчивости неосесимметричных волн с высокими значениями азимутального числа m повышается вероятность полидисперсного распада струи, как это и наблюдается в естественных условиях при спонтанном распаде сильно заряженных (необходимое условие для обеспечения реализации неустойчивости неосесимметричных мод с $m \geq 1$) струй [39, 40]. Расчеты также показывают, что с увеличением плотности электрического заряда амплитуды волн растут.

Из выписанного уравнения для формы струи несложно видеть, что кроме волны с волновым числом k , существующей в начальный момент времени, возбуждается также (за счет нелинейного взаимодействия) волна с удвоенным волновым числом $2k$. Между этими двумя волнами имеет место резонансное взаимодействие, определяющееся наличием у коэффициентов a_1 и a_2 знаменателей, которые при определенных условиях обращаются в ноль. Отметим, что при резонансном взаимодействии нелинейных осцилляций и волн возможен стопроцентный обмен энергией между ними. Кроме того, примечательно, что резонансно взаимодействуют волны с различными волновыми и азимутальными числами, то есть с различной симметрией, как это видно из выражений для коэффициентов a_1 и a_2 . На рис. 2 приведен график зависимости $F \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_{2m}^2(2k)$ при $m = 0$ (определяющей величину знаменателя в коэффициенте a_1 , а также в коэффициенте a_2 при $m = 0$) от величины волнового числа k и параметра W , пересеченной плоскостью $F = 0$. На кривой $f_1(k, W)$ по которой пересекаются эти две поверхности, реализуется резонансное взаимодействие между двумя осесимметричными модами ($m=0$) для волн с волновыми числами k и $2k$. Резонансный обмен энергией между двумя осесимметричными волнами разной длины (заданной в начальный момент времени с волновым числом k и волной с вдвое большим волновым числом $2k$, возбуждение которой происходит в результате нелинейного взаимодействия) на стадии дробления струи может привести к образованию «сателлитов» - капель с размерами, отличающимися от размеров капель, на которые разбивается струя при отсутствии возмущающих воздействий. Из рис. 2 можно видеть, что указанное взаимодействие имеет место только при $W \neq 0$.

$$f_1(k, W) \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_{2m}^2(2k) = 0,$$

$$f_1(k, W) \equiv \frac{2k \cdot I_1(2k) \{1 - 4k^2 - W[1 - (2k \cdot K_1(2k))/K_0(2k)]\}}{I_0(2k)} - \frac{4k \cdot I_1(k) \{1 - k^2 - W[1 - (k \cdot K_1(k))/K_0(k)]\}}{I_0(k)},$$

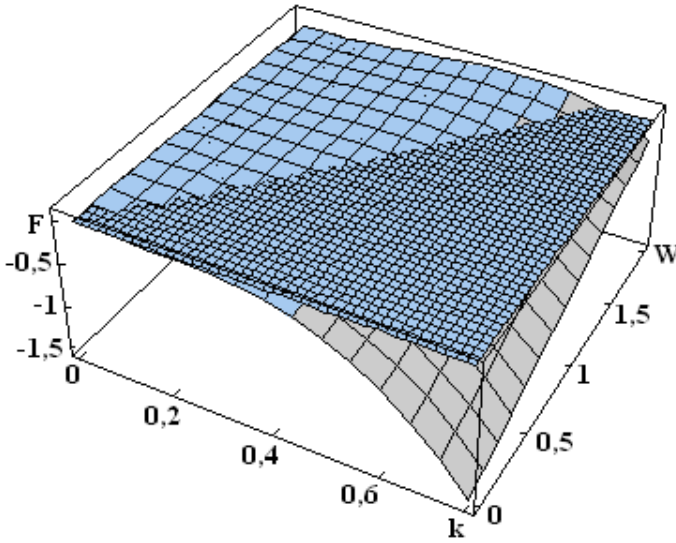


Рис. 2. График зависимости $F \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_{2m}^2(2k)$ от величины волнового числа k и параметра W (амплитудные коэффициенты a_1 и a_2 становятся бесконечно большими)

Расчеты на основе соотношения $4\omega_m^2(k) - \omega_{2m}^2(2k) = 0$ показывают, что резонансная перекачка энергии из заданной в начальный момент времени неосесимметричной моды с $m = 1$ и волновым числом k в другую неосесимметричную моду с $m = 2$ и с вдвое большим волновым числом $2k$ может реализоваться только при достаточно больших значениях поверхностной плотности заряда на струе (при $W \geq 3$), как это видно из рис. 3.

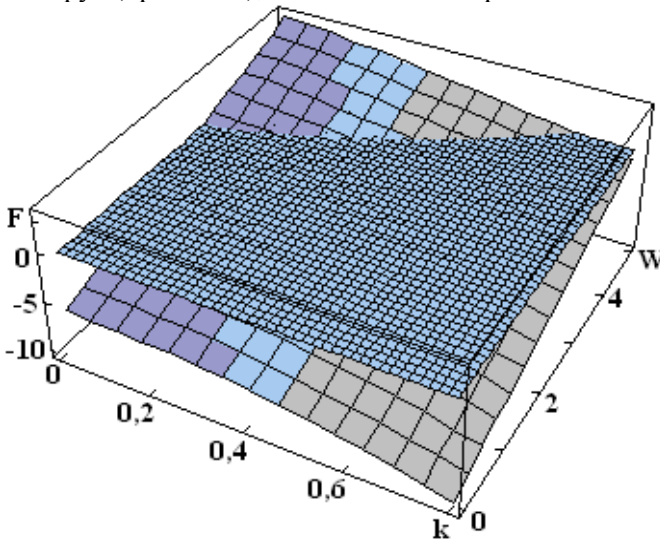


Рис. 3. График зависимости $F \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_{2m}^2(2k)$ от величины волнового числа k и параметра W при $m=1$, пересеченный плоскостью $F=0$. На линии пересечения указанных поверхностей реализуется нелинейное резонансное взаимодействие неосесимметричных волн (амплитудный коэффициент a_2 становится бесконечно большим)

Из вида амплитудного коэффициента a_2 видно, что возможно резонансное взаимодействие между осесимметричной модой $m = 0$ и неосесимметричными модами с $m \neq 0$. На рис. 4 приведен график зависимости $F \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_0^2(2k)$ при $m = 1$ (определяющей величину знаменателя в коэффициенте a_2) от величины волнового числа k и параметра W , пересеченной плоскостью $F = 0$. На кривой $f_0(k, W)$, по которой пересекаются эти две поверхности, реализуется резонансное взаимодействие между заданной в начальный момент времени неосесимметричной волной с $m = 1$ и волновым числом k и осесимметричной волной $m = 0$ с волновым числом $2k$. При таком взаимодействии энергия перекачивается из неосесимметричной моды с $m = 1$ к осесимметричной моде с удвоенным волновым числом. Из рис. 4 видно, что такой резонансный обмен энергией может иметь место и при отсутствии на струе электрического заряда (при $W = 0$).

$$f_0(k, W) \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_0^2(2k) = 0,$$

$$f_0(k, W) \equiv \frac{2k \cdot I_1(2k) \{1 - 4k^2 - W[1 - (2k \cdot K_1(2k))/K_0(2k)]\}}{I_0(2k)} + \\ + \frac{2k[I_0(k) + I_2(k)] \cdot \{k^2 + W[1 - (k[K_0(k) + K_2(k)])/2K_1(k)]\}}{I_1(k)}.$$

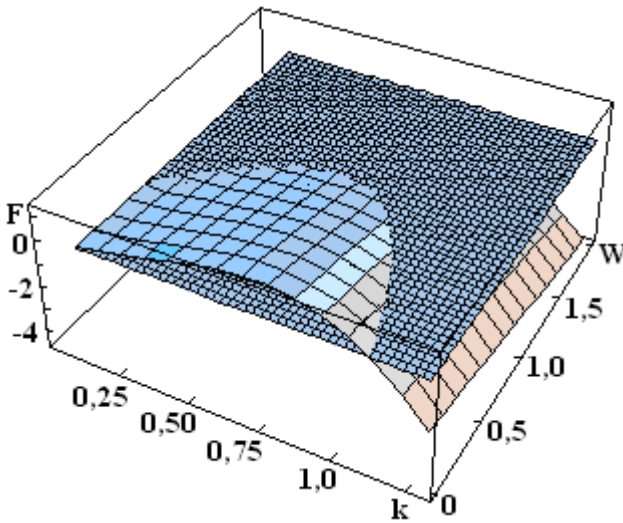


Рис.4. График зависимости $F \equiv 4\omega_m^2(k) - \omega_0^2(2k)$ от величины волнового числа k и параметра W (амплитудный коэффициент a_2 становится бесконечно большим)

Расчеты также показывают, что резонансное взаимодействие с перекачкой энергии от неосесимметричной моды с $m = 2$ к осесимметричной возможно только при достаточно больших плотностях поверхностного заряда на струе (при $W \geq 3$).

Влияние величины поверхностной плотности электрического заряда на струе χ на закономерности реализации резонансного взаимодействия сводится к изменению положений резонансов (к изменению волновых чисел и азимутальных параметров взаимодействующих волн при варьировании χ). Вдали от положений резонансов влияние электрического заряда, имеющегося на поверхности струи, сводится к появлению возможности развития неустойчивости неосесимметричных мод при достаточно больших плотностях заряда (при $4\pi\chi^2 \geq 1$) [39, 40]. Напомним, что в отсутствие заряда (при $\chi = 0$) все неосесимметричные моды устойчивы, что следует из дисперсионного уравнения. Влияние заряда (объемного либо поверхностного) на форму струи реализуется через зависимость от его плотности χ коэффициентов a_j , определяющих отклонение второго порядка малости формы струи от цилиндрической.

Следует также отметить, что в [41] для незаряженной струи нелинейное возбуждение осесимметричных мод с частотами, кратными возбужденной, в начальный момент исследовано экспериментально: во всяком случае в [41] показано, что нелинейное возбуждение мод, кратных изначально возбужденной, имеет место.

5. Проведенное рассмотрение выполнено для ситуации, когда начальная деформация струи определяется одной модой. Это обстоятельство накладывает ограничение на общность сделанных выводов. Представляется целесообразным решить задачу о расчете нелинейных неосесимметричных осцилляций струи, когда начальная деформация струи определяется суперпозицией различных мод. Такая задача позволила бы более детально исследовать перенос энергии между модами, а также взаимодействие волн различной природы, например капиллярных и релаксационных (последнее возможно лишь при корректном учете вязкости жидкости). Отметим, что подобная задача для незаряженной струи решена в [42] численными методами, что, естественно, накладывает ограничение на гносеологическую ценность полученных результатов: так, весьма проблематичным при таком подходе становится исследование внутренних нелинейных резонансов.

В [27] сходная задача решена аналитическими асимптотическими методами, но в отличие от задачи, решенной выше, в [27] в начальный момент времени задавалась не форма струи, а поле скоростей, которое в соответствии с вышесказанным представлялось в виде суперпозиции двух мод. Такая постановка целесообразна при изучении закономерностей вынужденного капиллярного распада струи (более подробно см. монографию [43]), при исследовании закономерностей сателлитообразования, что и было сделано в [30, 31] численными методами.

6. Заключение. Решение задачи о расчете нелинейных осцилляций заряженной струи уже во втором порядке малости по амплитуде деформации невозмущенной цилиндрической струи позволяет

обнаружить резонансное взаимодействие волны, определяющей начальную виртуальную деформацию, с волной, появляющейся вследствие нелинейности уравнений гидродинамики и имеющей вдвое большее волновое число. Положение резонансных ситуаций зависит от величины волнового числа и поверхностной плотности электрического заряда на струе. В частности, осесимметричная мода может взаимодействовать с модой, ответственной за закручивание струи ($m = 1$). При нелинейном резонансном взаимодействии волн на заряженной струе энергия всегда перекачивается от более длинных волн к более коротким независимо от симметрии взаимодействующих волн. Из начально возбужденной моды с $m = 1$ энергия может перекачиваться как в осесимметричную моду с вдвое большим волновым числом, так и в неосесимметричную с $m = 2$, также с вдвое большим волновым числом. Вовлечение в нелинейное резонансное взаимодействие мод с $m \geq 2$ возможно лишь при значительных плотностях поверхностного заряда на струе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириченко В.Н., Петрянов-Соколов И.В., Супрун Н.Н., Шутков А.А. Асимптотический радиус слабопроводящей жидкой струи в электрическом поле // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 4. С. 817–820.
2. Кириченко В.Н., Супрун Н.Н., Петрянов-Соколов И.В. Области существования свободных стационарных жидких струй в сильном внешнем электрическом поле // ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 2. С. 308–311.
3. Кириченко В.Н., Супрун Н.Н., Петрянов-Соколов И.В. Форма свободной стационарной жидкой струи в сильном однородном электрическом поле // ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 4. С. 553–555.
4. *Canan-Calvo A.M.* On the theory of electrohydrodynamically driven capillary jets // *J. Fluid Mechanics*. 1997. V. 335. P. 165–188.
5. Шутков А.А., Захарьян А.А. Заряженная струя несжимаемой жидкости в электрическом поле // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 4. С. 12–15.
6. Зубарев Н.М. Точное решение задачи о равновесной конфигурации двумерной заряженной жидко-металлической капли // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 23. С. 55–60.
7. Зубарев Н.М. Точное решение задачи о равновесной конфигурации заряженной поверхности жидкого металла // ЖЭТФ. 1999. Т.116. № 6(12). С. 1990–2005.
8. Зубарев Н.М., Зубарева О.В. Анализ равновесных конфигураций заряженных цилиндрических струй проводящей жидкости // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып.1. С. 51–55.
9. Глонти Г. А. К теории устойчивости жидких струй в электрическом поле // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 5. С. 1328–1330.
10. *Magarvey R., Outhouse L.* Note on the break up of charged liquid jet // *J. Fluid Mech.* 1962. Vol. 13. № 1. P. 151–157.
11. *Schneider J., Lindbland C., Hendrick Jr.* Stability of an electrified liquid jet // *J. Appl. Phys.* 1967. V. 38. № 6. P. 2599–2606.
12. *Michael D., O'Neil M.* Electrohydrodynamic instability of a cylindrical viscous jet // *Can. J. Phys.* 1969. V. 47. P. 1215–1220.
13. *Saville D.* Electrohydrodynamic stability: effect of charge relaxation at the interface of a liquid jet // *J. Fluid Mech.* 1971. V. 48. № 4. P. 815–827.
14. *Huebner A., Chu H.* Instability and breakup of charged liquid jets // *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 49. № 2. P. 361–372.
15. *Garmendia L., Smith I.* The effects of an electrostatic field and air stream on water jet break-up length // *Can. J. Chem. Eng.* 1975. V. 53. P. 606–610.
16. *Toraita Y., Sudou K., Tshibashi Y.* Effect of a magnetic and an electrical field on the behavior of liquid jets // *Bull. JSME*. 1979. V. 22. № 172. P. 1390–1398.
17. Кожевников В.И., Чеканов В.В., Литовский Е.И. Свободные вертикальные струи над деформированной поверхностью магнитной жидкости в электрическом поле // Магнитная гидродинамика. 1982. № 4. С.118–120.
18. *Grossmann S., Muller A.* Instabilities and decay rates of charged viscous liquid jets // *Z. Phys. B: Condensed Matter*. 1984. V. 57. P. 161–174.
19. Назин С.С., Изотов А.Н., Шикин В.Б. Об устойчивости заряженной струи // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 1. С. 121–125.

20. Герцеништейн С.Я., Мусабеков П. М., Рудницкий А. Я., Уразов Ш. Н. Неустойчивость и распад наэлектризованных капиллярных струй // ДАН СССР. 1989. Т. 306. № 5. С. 1073–1077.
21. Гиневский А. Ф., Мотин А.И. Особенности капиллярного распада струй диэлектрической вязкой жидкости с поверхностным зарядом // ИФЖ. 1991.Т. 60. № 4. С. 576–581.
22. Mestel A.J. Electrohydrodynamic stability of a slightly viscous jet // J. Fluid Mech. 1994. Vol. 274. P. 93–113.
23. Mestel A.J. Electrohydrodynamic stability of a highly viscous jet // J. Fluid Mech. 1996. Vol. 312. № 2. P. 311–326.
24. Nayfeh F.H. Nonlinear stability of a liquid jet // Phys. Fluids. 1970. № 4. P. 841–847.
25. Rutland D., Jamerson G. A nonlinear effect in the capillary instability of liquid jets // J. Fluid Mech. 1971. V. 46. № 2. P. 267–271.
26. Новиков А.А. Нелинейные капиллярные волны на поверхности струи вязкой жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1977. № 2. С. 179–182.
27. Chaudhary K., Redekopp L. The nonlinear capillary instability of a liquid jet // J. Fluid Mech. 1980. V. 96. Pt. 1. P. 257–274.
28. Chaudhary K., Maxworthy T. The nonlinear capillary instability of a liquid jet // J. Fluid. Mech. 1980. Vol. 96. Pt. 2. P. 275–286.
29. Chaudhary K., Maxworthy T. The nonlinear capillary instability of a liquid jet. Part 3. Experiments on satellite drop formation and control // J. Fluid. Mech. 1980. V. 96. № 2. P. 287–298.
30. Блаженков В.В., Гиневский А.Ф., Гунбин В.Ф., Дмитриев А.С., Щеглов С.И. Нелинейная эволюция волн при вынужденном капиллярном распаде струй // Изв. АН СССР. МЖГ. 1993. № 3. С. 54–60.
31. Huynh H., Ashgriz N., Mashayek F. Instability of a liquid jet subject to disturbances composed of two wave numbers // J. Fluid Mech. 1996. Vol. 320. P. 185–210.
32. Чесноков Ю.Г. Нелинейное развитие капиллярных волн в струе вязкой жидкости // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 31–38.
33. Горшков В.Н., Чабан М.Г. Нелинейные электрогидродинамические явления и генерация капель в заряженных проводящих струях // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 1–9.
34. Ентов В.М., Ярин А.Л. Динамика свободных струй и пленок вязких и реологически сложных жидкостей // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М., 1984. Т.17. С.112–197.
35. Macky W.A. Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields // Pros. Roy. Soc., London. 1931. V. 133. № A822. P. 565–587.
36. Cloupeau M., Prunet Foch B. Electrostatic spraying of liquids: main functioning modes // J. Electrostatics. 1990. V. 25. P. 165–184.
37. Kim K., Turnbull R. Generation of charged drops of insulating liquids by electrostatic spraying // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. № 5. P. 1964–1969.
38. Hoburg J.F., Melcher J.R. Current-driven, corona terminated water jets as sources of charged droplets and audible noise // IEEE Transaction on Power Apparats System. 1975. V. 94. № 1. P. 128–136.
39. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Левчук Т.В., Рыбакова М.В. О спонтанном распаде заряженной струи вязкой электропроводной жидкости // ЭОМ. 2003. № 1. С. 38–43.
40. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Левчук Т.В. Об устойчивости неосесимметричных мод объемно заряженной струи вязкой диэлектрической жидкости // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 22–30.
41. Аликин А.Р., Блаженков В.В., Гунбин В.Ф., Щеглов С.И. Исследование эволюции спектра колебаний поверхности струи при вынужденном капиллярном распаде // ИФЖ. 1991. Т. 60. № 4. С. 550–553.
42. Епихин Б.Е., Шкадов В.Я. Численное моделирование неоднородного распада капиллярных струй // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 3. С. 12–17.
43. Аметистов Е.В., Блаженков В.В., Городов А.К. и др. Монодиспергирование вещества: принципы и применение. М., 1991.

Поступила 16.02.04

Summary

The energy is aulwace transfer from long waves to more short one at a nonlinear resonant interaction of waves on charged liquid jet surface independently from its symmetry.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТЕРМОИОНИЗОВАННЫХ СТРУЯХ

ИТЭС РАН

Ижорская 13/19, г. Москва, 125412, Россия

Введение

Ударные волны могут вызвать сильные электрические поля в низкотемпературной плазме [1]. Ранее аналогичный эффект для сильных слабоионизованных струй такой плазмы обоснован теоретически [2]. При анализе пространственных распределений исследуемых электрических полей уравнения Пуассона относительно их потенциалов решались как в [1], так и в [2]. Для математического замыкания таких уравнений Пуассона в [1] использовалось кинетическое уравнение Больцмана, описывающее перенос нейтральных и заряженных частиц в ударных волнах, в то время как в [2] – макроскопический закон сохранения заряда в интегральной форме с учетом гидродинамического переноса, образующегося в нагретой струе объемного заряда совместно с аналитическим решением Шлихтинга [3] уравнений пограничного слоя для рассматриваемой струи [2]. Электрический ток в струе является исходным условием для разработанного в [2] расчетного метода определения искомого пространственного распределения установившегося потенциала, и ранее эта константа определялась только из результатов экспериментов для сопла из нержавеющей стали. В настоящей работе этот ток определяется теоретически по известной формуле для плотности тока термоэмиссии электронов из любого нагретого металлического сопла.

Теоретическая модель

Для теоретического описания переноса заряда сильными струями использовалась такая же макроскопическая модель, как и в предыдущих работах. Однако для решения этой задачи при выписываемых ниже предположениях можно рассмотреть более общую теоретическую модель ионизации, чем используемую ранее в [4]. Считаем, что электрическая проводимость рассматриваемой среды зависит от абсолютной температуры T , но невозможно определить точно такую зависимость (в частности, в предыдущих работах нами использованы уравнения аррениусовского типа для определения зависимости скорости ионизации от T , но она не является единственной). Можем пренебречь диффузионными членами в электродинамических уравнениях, потому что в [4, 5] показано, что влияние этих членов важно только в тонких слоях у границ рассматриваемых сред даже при учете влияния температуры и макроскопического электрического поля на скорость их ионизации. Рассматриваемая нагретая струя истекает из конической металлической поверхности S в холодную среду того же состава. Температура струи не превосходит температуру слабоионизованной плазмы. В этом случае плотность ρ и скорость v нейтральной компоненты близки к скорости и плотности среды. Поэтому можно использовать простые формулы для осесимметричной стационарной струи, полученные Шлихтингом [3]. Расход сильной струи J аналитически определен в [3]. Это выражение выглядит как

$$J = 0,404(\sqrt{P/\rho})^*x, \quad (1)$$

где P – импульс струи, а x – ее осевая координата. Увеличение расхода с ее ростом обусловлено тем обстоятельством, что неподвижная среда ввиду ее достаточно существенной вязкости увлекается струей и движется вместе с ней.

Для определения пространственного установившегося квазиодномерного распределения искомого потенциала выпишем макроскопические векторные дифференциальные электродинамические уравнения с учетом движения среды. Выражение для плотности электрического тока j выглядит следующим образом:

$$j = \sigma E + qv. \quad (2)$$

Здесь q – плотность объемного заряда, E – напряженность электрического поля, σ – электропроводность среды.

Объемный заряд может образовываться двумя способами. Первый – ионизация из нагретой металлической поверхности сопла S . А второй – образование объемного заряда ввиду возникающего в рассматриваемых условиях градиента проводимости в среде, в которую истекает исследуемая нагретая струя. Последний градиент обусловлен градиентом температуры в струе. Оба способа описаны в [4]. А в [5] показано, что импульс P является тягой струи. Используя уравнения, доказательство этого утверждения приведем здесь, применяя результаты [6] с учетом тензорной формы выписываемых уравнений Навье–Стокса и их решения Ландау, которое успешно применяется для описания течения осесимметричной затопленной струи. Считаем, что динамическая вязкость η – величина постоянная, а вектор приложенной точечной силы (тяги струи) направлен вдоль оси ее симметрии. При этом такая вязкость среды в случаях гомогенных сред является произведением ее кинематической вязкости на плотность, а выражение для тензора плотности потока импульса движущейся вязкой среды по [6] выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k} = F_i \delta(r); \\ \frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\Pi_{ik} = \rho v_i v_k + p \delta_{ik} - \rho \nu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right).$$

Кроме того, в (3) p – давление струи и среды, v_k – компоненты скорости струи в декартовых координатах x_k .

Здесь компоненты вектора F – компоненты тяги струи (силы) в ортогональной (не обязательно декартовой, а, возможно, и криволинейной) системе координат x_k , при этом $\delta(r)$ – дельта-функция векторного аргумента r , а δ_{ik} – символ Кронекера. По немому индексу “ k ” осуществляется суммирование по правилам тензорного исчисления. В случае криволинейной системы координат левая часть выписываемых уравнений Навье–Стокса в тензорной форме преобразуется в соответствии с правилами векторного и тензорного исчисления. Решение типа затопленной струи удовлетворяет уравнениям (3) при $r \gg r_0$, где r – радиальная сферическая координата, r_0 – радиус критического сечения конического сопла (минимальный радиус усеченного сечения, соответствующего соплу геометрического конуса). При этом центр системы координат, связанный со струей, выбирается в [3, 6] в центре круга радиуса r_0 . Уравнения (3) выписаны в предположении, что скорость рассматриваемых течений в случае сильной струи по величине существенно превышает скорость термогравитационной естественной конвекции, возникающей ввиду разности температур струи и среды. Тогда при пренебрежении гравитацией выражение для компонент интегральной силы выглядит как

$$F_i = \int_V F_i \delta(r) dV = \int_V \frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k} dV = \int_S \Pi_{ik} dS_k, \quad (4)$$

по теореме Гаусса–Остроградского. Отсюда в векторном виде сила

$$F = \int_S \Pi_{ik} \mathcal{E}_i dS_k, \quad (5)$$

где \mathcal{E}_i – векторы криволинейного ортогонального базиса; S – замкнутая поверхность, ограничивающая объем, внутри которой находится начало выбираемой системы координат. В рассматриваемых случаях сильных струй, в которых и наблюдается пространственное распределение искомого электрического потенциала, может быть осуществлен переход к свободному пограничному слою у оси струи. При этом p для струи и среды по Шлихтингу считается постоянным.

Для дифференциала тяги из выписываемых выше соотношений можно получить выражение

$$dF = \Pi_{ik} \mathcal{E}_i dS_k = \Pi_{rr} dS_k r_0, \quad (6)$$

где dS – элемент поверхности сферы, проведенной вокруг начал координат, а r_0 – единичный вектор оси сферической системы координат, связанной со струей.

Последнее равенство в (6) выписано с учетом того, что для струйного решения Ландау уравнений (3) в сферической системе координат отлична от нуля только одна компонента Π_{rr} тензора Π_{rk} . Тогда для его осевой компоненты

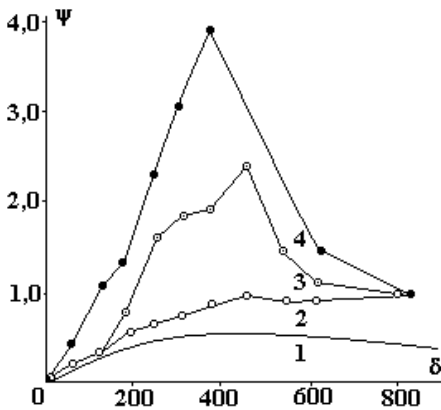
$$dF_x = \Pi_{rr} \cos(\theta) dS, \quad (7)$$

где θ – угловая координата долготы в рассматриваемой системе координат. Отсюда

$$F = F_x = \int_S \Pi_{rr} \cos(\theta) d\theta = P. \quad (8)$$

Последнее равенство принято с учетом выражения для импульса струи, полученного Ландау и выписанного в [6]. Отметим, что идея об интерпретации затопленной струи как течения, обусловленного действием точечной силы любой, не обязательно механической или электрической природы, высказывалась в работах Сквайра без доказательства, приведенного выше. Аналогичного доказательства с применением решения Шлихтинга вместо решения Ландау для описания исследуемых струй автору настоящей работы осуществить пока не удалось, как и для случая плоской затопленной струи.

Уравнения (3) выписаны в приближении несжимаемости среды, хотя здесь рассматриваем неизотермические процессы с возможными сильными скоростями, а не адиабатические с дозвуковыми. Это возможно, когда уравнение состояния используется в приближении Буссинеска [6], где коэффициент теплового расширения среды можно считать малым. Тогда уравнение неразрывности в уравнениях Навье–Стокса здесь выписано, как и в [6], без учета сжимаемости, а в уравнении импульсов в случае сильной струи не учтено влияние объемной плотности гравитационной силы на величину скорости рассматриваемых течений. Перейдем к определению искомого пространственного распределения установившегося потенциала макроскопического электрического поля в струе. Влиянием индуцированных магнитных полей при этом пренебрегаем ввиду недостаточно высокой проводимости рассматриваемой слабоионизованной плазмы. В этом случае система уравнений Максвелла упрощается до одного дифференциального уравнения второго порядка.



Распределение потенциала электрического поля в струе (вдоль оси). 1 — теоретическое решение ($\delta = x/r_0$, $\psi = \varphi/\varphi_{max}$), 2 — эксперимент с сеточным электродом, 3 — с металлическим электродом, 4 — с жидким электродом (вода)

В одномерном случае известное электродинамическое уравнение Пуассона для плотности образованного в струе объемного заряда q выглядит так:

$$d^2\varphi/dx^2 = -q/\epsilon\epsilon_0, \quad (9)$$

где φ — электрический потенциал, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды. Считаем, что в сильных струях выполняется неравенство

$$|\sigma E| \ll |qv|. \quad (10)$$

Можем использовать выписанные выше соотношения, начиная с (1) вплоть до (10), для определения распределения электрического поля в струе. При этом уравнение для определения распределения потенциала выглядит следующим образом:

$$d^2\varphi/dx^2 = -I/(0,404 \epsilon\epsilon_0 \sqrt{P/\rho}) \cdot x. \quad (11)$$

Граничными условиями для такого уравнения являются

$$\varphi(S) = 0, \quad \varphi(d) = \varphi_0. \quad (12)$$

В (11) и (12) I — электрический ток, а d — максимальное расстояние от S , на котором может быть определен эмпирический потенциал.

Безразмерное решение этого уравнения с выписанными граничными условиями выглядит как

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(\tilde{x}) &= \tilde{x} \cdot (1 - \tilde{I} \cdot \ln \tilde{x}), \\ \tilde{I} &= \frac{I \cdot d}{0,404 \epsilon\epsilon_0 \sqrt{P/\rho}}, \quad \tilde{\varphi} = \frac{\varphi}{\varphi_0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Ток I определялся из термоэмиссионной формулы Ричардсона–Дешмана:

$$j_s = A \cdot T_s^2 \cdot \exp\left(-\frac{W_e}{kT_s}\right). \quad (14)$$

Здесь A – универсальная для всех металлов константа термоэмиссии ($A = 6,02 \cdot 10^5 \text{ A}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^2)$); W_e – работа выхода; k – постоянная Больцмана; T_s – температура сопла, из которого истекает струя; j_s – плотность тока термоэмиссии. Результаты теории [7] приводят к графику монотонно возрастающей зависимости потенциала от расстояния с асимптотическим экстремумом. В отличие от предложенной модели они не могут описать убывающий участок распределения потенциала вдали от сопла, наблюдаемый в экспериментах с сеточным электродом. Теоретический максимум для нагретой воздушной струи по порядку величины составляет 100 В, что согласуется с результатами экспериментов [7], проводимых при тяге струи, равной 230 Н образующей сопла, равной 75 мм, радиусе критического сечения – 2,2 мм и высоте сопла – 50 мм. Результаты расчетов, проведенных с использованием аналитического решения, полученного в настоящей работе, представлены на рисунке. Видно, что они достаточно хорошо согласуются с результатами опытов с сеточным электродом. Следовательно, предложенная в настоящей работе теоретическая модель может быть использована для диагностики степени электризации и зарядки нагретых струй.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Velikodnyi V. Yu., Biturin V.A.* Shock wave structure in long-lived plasma formation. The proceeding of the 2ND workshop on magnetoplasma-aerodynamics in aerospace application. Moscow. IVTAN. 2000. P. 301–306.
2. *Апфельбаум М.С.* Задача о пространственном распределении электрического поля в термоионизованных газодинамических струях // Труды ИВТАН “Экстремальные состояния вещества” (ред. В.Е. Фортов). М., 1991. С. 358–364.
3. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М., 1974.
4. *Apfelbaum M.S., Apfelbaum E.M.* On electric field distribution in the vicinity of particles in a weakly ionized disperse medium // Chem. Phys. Report. 2000. Vol. 18. P. 2313–2328.
5. *Apfelbaum M.S., Apfelbaum E.M.* One model of electric conduction and electric field distributions in a liquid insulator. Journal Of Electrostatics. 2001. V. 50. P. 129–142.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М., 1989.
7. *Усачев В.К., Ставров В.П., Тамбовцев В.И.* Электрокинетическое явление в струе ионизованных продуктов сгорания // Тезисы докладов научно-практического семинара по электрофизике горения. Караганда, 1985. С. 68–69.

Поступила 19.07.04

Summary

The theoretical model of termoionization jets electrification is given. The Shlihting jet solution of hydrodynamic equations is used. The analytical solution of written electrohydrodynamic equations for space electric potential distribution is obtained. The calculation and experimental results are compared.

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бандеры, 12, г. Ровно, 33028, Украина*

Изучено влияние дисперсного металлического наполнителя на величину напряженности электрического поля в гетерогенной полимерной системе. Рассмотренная модель может быть использована для оценки термодеполаризационных эффектов в полимерах и электрической прочности полимерных композиционных материалов, а также для получения термоэлектретов.

Введение

Среди огромного разнообразия гетерогенных полимерных систем (ГПС) недостаточно изучены металлонаполненные композиции [1]. Это относительно новый класс в ряду как наполненных полимеров, так и „металлонаполненных систем” (под последними чаще понимают макроскопические комбинации полимеров и металлов). Наиболее примечательная черта полимеров с дисперсными наполнителями – диаметрально противоположность практически всех физических свойств компонентов системы. Все это обуславливает ряд теоретических и практических проблем, решение которых приобретает все большее значение в физике и физической технологии металлонаполненных полимеров. Особо следует отметить тот факт, что в металлонаполненных системах существует значительный и достаточно стабильный электретный эффект [2], в некоторых случаях эти системы имеют свойства полупроводников [3], при этом открываются перспективы их использования в качестве генераторов и трансформаторов энергии [4].

Работами [5] показано, что свойства ГПС определяются типом и объемным соотношением их компонентов, формой и размером дисперсных частиц [6], морфологией системы [7] и характером взаимодействия фаз на границе раздела [8]. Если с этих позиций рассматривать наличие диаметральной противоположности свойств компонентов полимер–высокодисперсный металлический наполнитель, то определяется одна из актуальных задач: изучение причины усиления приложенного электрического поля в Т-р режиме в случае использования ГПС в качестве термоэлектрета [2].

Для решения этой задачи необходимо рассчитать напряженность E электрического поля внутри заряженной металлонаполненной полимерной системы. В [9] был предложен метод расчета E поля, созданного двумя сферическими включениями для случая значительного расстояния между ними. С помощью метода изображения [10] удалось рассчитать коэффициент усиления электрического поля на поверхности каждой из двух близко размещенных металлических частиц. Однако в реальных ГПС процессы распределения электрического поля между частицами металлического наполнителя в полимере имеют более сложную природу, обусловленную нелинейностью эффектов [11]. В [12] рассмотрен один из случаев такой нелинейности, когда в ГПС существует электрическое поле с напряженностью $E_{\text{ср}}$ и определено значение $E_{\text{макс}}$ на поверхности металлического сферического включения. При этом указано, что определить значение E в произвольной точке ГПС для любого соотношения между r и l (где r и l – соответственно радиус частицы и расстояние между ними) не представляется возможным [12].

Для определения аналитического выражения, с помощью которого можно количественно определить величину E электрического поля в различных точках ГПС при любом соотношении между r и l (то есть в зависимости от объемного содержания наполнителя), нами использован метод электрических изображений. С его помощью найдем величины дипольных моментов, индуцированных на электропроводящем сферическом включении в виде дисперсного металлического наполнителя.

Теоретический анализ

Предположим, что при отсутствии сегрегации частицы наполнителя имеют сферическую

форму, причем центры сфер образуют простую кубическую решетку как единственный возможный тип строения тела при минимальном объеме. Ее узлы погружены в полимерную матрицу (рис.1) и в случае квазиодномерной модели при размере сферических включений r среднестатистическое расстояние между ними l . Методом «электрических изображений» выполняем расчет величины дипольного момента индуцированных на электропроводящем сферическом включении зарядов. Для этого определяем потенциалы электрического поля в точках А и В, которые находятся на поверхности частицы металлического наполнителя, центр которой – точку О принимаем за начало координат (рис.1). На рис.1 представлен результат использования метода электрических изображений, основанный на условии постоянства потенциала на подложках и на поверхности электропроводящих включений.

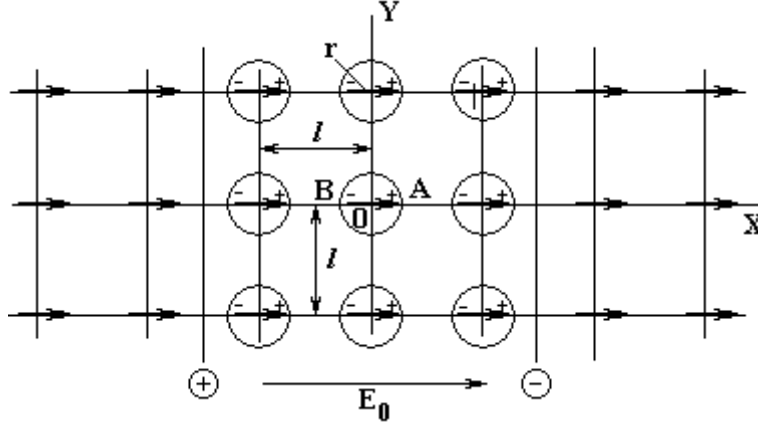


Рис. 1. Модель неоднородного диэлектрика со сферическими включениями

Здесь стрелками показан точечный дипольный момент шаров и их фиктивных изображений. Из рис. 1 видно, что потенциал электрического поля в точке А определяется по формуле

$$\varphi_A = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+\xi)^2} - \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i-\xi)^2} + \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+\xi}{[(i+\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-\xi}{[(i-\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где $\xi = r/l$; 1-е слагаемое – вклад полей центрального диполя, диполей металлических шаров и их фиктивных изображений, которые находятся на отрицательной полуоси ОХ; 2-е слагаемое – вклад диполей металлического наполнителя и фиктивных изображений, что лежат на положительной оси ОХ; 3-е и 4-е слагаемые – вклад остальных диполей объема, находящихся соответственно с левой и правой стороны от плоскости ОУZ. Аналогично имеем для точки В:

$$\varphi_B = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+\xi)^2} + \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i-\xi)^2} - \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+\xi}{[(i+\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-\xi}{[(i-\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} + E_0 2r, \quad (2)$$

где E_0 – напряженность приложенного электрического поля.

Потенциал всех точек шара одинаковый, поэтому $\varphi_A = \varphi_B$. Приравняв (1) и (2), получим выражение для определения дипольного момента индуцированных на электропроводном сферическом включении зарядов:

$$p = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3 E_0 \xi}{\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+\xi)^2} - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i-\xi)^2} + \frac{1}{\xi^2} + 4 \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+\xi}{[(i+\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-\xi}{[(i-\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} \right)}. \quad (3)$$

Имея выражение для p , можем найти соотношения, которые позволят определить численное значение напряженности электрического поля в любых точках внутри полимерной системы в зависимости от объемного содержания металлического наполнителя. Для этого потенциал электрического поля в произвольной точке с координатами x, y, z (рис. 2) представим восемью слагаемыми, каждое из которых дает вклад диполей одного из октантов, что окружают данную точку:

1-е слагаемое – вклад полей диполей 1-го октанта

$$\varphi_1 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il-x}{[(il-x)^2 + (jl-y)^2 + (kl-z)^2]^{\frac{3}{2}}};$$

2-е слагаемое – вклад полей диполей 2-го октанта

$$\varphi_2 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il - x}{\left[(il - x)^2 + (jl + y)^2 + (kl - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

3-е слагаемое – вклад полей диполей 3-го октанта

$$\varphi_3 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il - x}{\left[(il - x)^2 + (jl - y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

4-е слагаемое – вклад полей диполей 4-го октанта

$$\varphi_4 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il - x}{\left[(il - x)^2 + (jl + y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

5-е слагаемое – вклад полей диполей 5-го октанта

$$\varphi_5 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl - y)^2 + (kl - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

6-е слагаемое – вклад полей диполей 6-го октанта

$$\varphi_6 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl + y)^2 + (kl - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

7-е слагаемое – вклад полей диполей 7-го октанта

$$\varphi_7 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl - y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

8-е слагаемое – вклад полей диполей 8-го октанта

$$\varphi_8 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl + y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}.$$

$$\varphi(x, y, z) = \sum_{n=1}^8 \varphi_n.$$

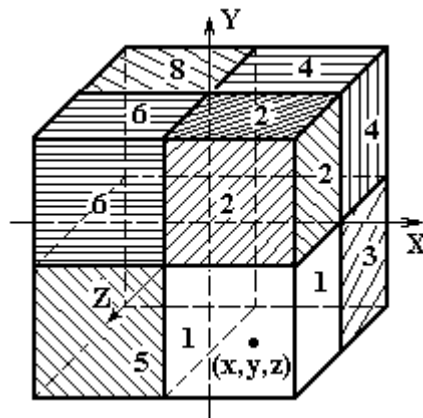


Рис. 2. Объем полимерной матрицы, разделенный на восемь октантов (точка с координатами x, y, z находится в первом октанте)

Зная потенциал электрического поля, можем найти его напряженность, которая определяется непосредственно из потенциальной функции: $\vec{E} = -grad\varphi$. Проекция вектора E на ось x :

$$\Delta E_{x_n} = -\frac{\partial \varphi_n}{\partial x};$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{x_1} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_2} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_3} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_4} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_5} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_6} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_7} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_8} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_x(x, y, z) &= \sum_{n=1}^8 \Delta E_{x_n} + E_0, \text{ где } \eta_x = \frac{x}{l}, \eta_y = \frac{y}{l}, \eta_z = \frac{z}{l}. \end{aligned}$$

Проекция вектора E на оси y и z :

$$\begin{aligned} E_{y_n} &= -\frac{\partial\Phi_n}{\partial y}; & E_{z_n} &= -\frac{\partial\Phi_n}{\partial z}; \\ E_{y_1} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_1} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_2} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j+\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_2} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_3} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_3} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k+\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_4} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j+\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_4} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k+\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_5} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_5} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_6} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j+\eta_y)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_6} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_7} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_7} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k+\eta_z)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \end{aligned}$$

$$E_{y_8} = \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j+\eta_y)}{[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2]^{\frac{5}{2}}};$$

$$E_{z_8} = \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k+\eta_z)}{[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2]^{\frac{5}{2}}};$$

$$E_y(x, y, z) = \sum_{n=1}^8 E_{y_n}$$

$$E_z(x, y, z) = \sum_{n=1}^8 E_{z_n}$$

Представленные ряды сходящиеся и могут быть рассчитаны с нужной точностью. Для нахождения модуля вектора E воспользуемся формулой

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}.$$

Условия проведения исследований, их результаты и обсуждение

Исследовалось влияние металлического наполнителя на электретный эффект в промышленном поливинилхлориде (ПВХ) суспензионной полимеризации марки С-65 методом термостимулированной деполяризации (ТСД). В качестве наполнителя для ПВХ использовался дисперсный порошок вольфрама (W) с преобладающим размером частиц 7 мкм. Образцы для исследований диаметром (29 ± 1) мм и толщиной $(0,2 \pm 0,02)$ мм готовились горячим прессованием в Т-р режиме при температуре 403 К и давлении 10,0 МПа. Поляризация образцов проводилась при температуре 383 К в электрическом поле с постоянной напряженностью 20 кВ/см на протяжении 5 мин. После этого образец охлаждался до комнатной температуры в поле той же напряженности на протяжении 30 мин. Измерение токов ТСД и расчеты параметров электрической релаксации композиций проводили в соответствии с ГОСТ 25209-82. Ток разрядки регистрировался электрометрическим усилителем У5-9. Рассчитанные по кривым тока ТСД (скорость нагревания – 3 К/мин) параметры электрической релаксации представлены в таблице (σ – поверхностная плотность заряда электрета, W – энергия активации релаксации заряда, τ_e – минимальное время релаксации заряда в условиях эксплуатации). Измерения удельного объемного электрического сопротивления ρ_v проводились методом вольтметра-амперметра в соответствии с ГОСТ 6433.2–71.

Некоторые параметры электрической релаксации композиций

Состав образцов	Температура максимума, К	$\sigma \cdot 10^{-4}$, нКл/м ²	W , кДж/моль	τ_e , с
ПВХ без добавок	357	0,20	271	10^8
ПВХ, W (0,5 об.%)	357	0,55	237	10^7

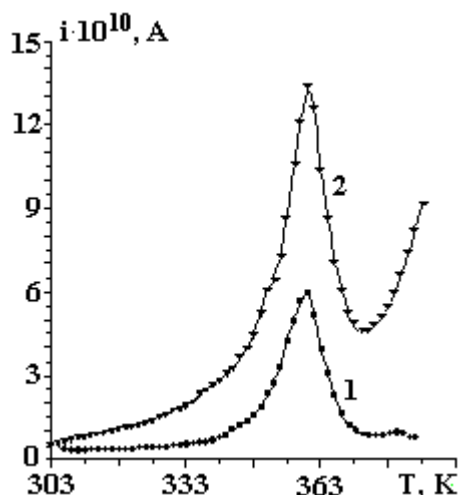


Рис. 3. Кривые тока ТСД для ПВХ без добавок (1) и с добавкой W в количестве 0,5 об.% (2)

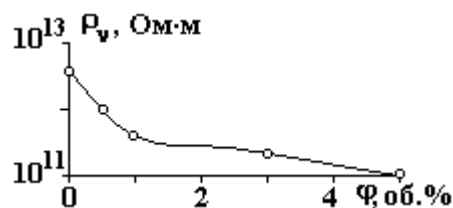


Рис. 4. Концентрационная зависимость ρ_v для систем ПВХ с добавкой W при $T=298$ К

Как следует из данных, представленных на рис. 3, наличие электрического поля внутри ПВХ-системы с добавкой высокодисперсного порошка W в количестве 0,5 об.% приводит к усилению величины тока ТСД. Это является следствием наличия электрического поля в ГПС. Воспользуемся полученными соотношениями для исследования распределения напряженности электрического поля

между металлическими частицами при $\xi = 0,1$. Этот случай отвечает концентрации сфер 0,4 об.% ($\theta = 4\pi\xi^3/3$) и может служить моделью ПВХ с добавкой дисперсного порошка W с предпочтительным размером частиц 7 мкм [13]. Такая композиция не является электропроводной (рис. 4), в то время, когда электрофизические свойства композиций с $\xi \geq 0,3$ приближаются к свойствам металлов и не обладают электретным эффектом. Для случая $\xi = 0,1$ в формуле (3):

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+0,1)^2} = 101,4332992, \quad \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i-0,1)^2} = 101,92254,$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+0,1}{[(i+0,1)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-0,1}{[(i-0,1)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} = 0,119192$$

остается только одно слагаемое $\frac{1}{\xi^2} = 100$.

Подставляя координаты точек, которые лежат на оси X между двумя соседними частицами, в формулы для определения E , после соответствующих расчетов, погрешность которых по абсолютной величине не превышает 10^{-6} , получаем распределение напряженности электрического поля вдоль координатной оси X . Оно изображено на рис. 5 и с достаточной степенью точности описывается формулой

$$E = A \operatorname{csc}^{3+\varepsilon} \pi \eta_x + \alpha, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 0,1$; $A = 0,053$; $\alpha = 0,977$.

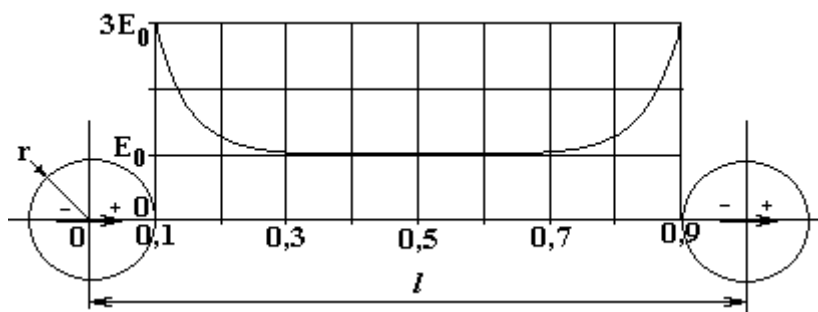


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля вдоль координатной оси X

Как видно из рис. 5, максимальная напряженность $3E_0$ имеет место на поверхности частиц металлического наполнителя. Распределение электрического поля вдоль координатных осей Y и Z имеет вид, представленный на рис. 6:

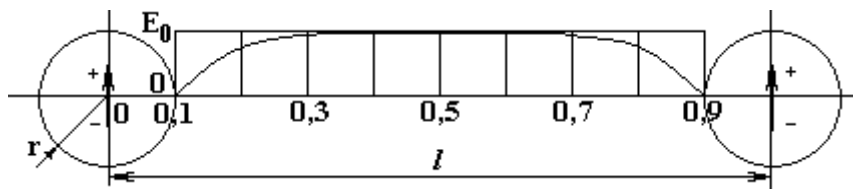


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля вдоль координатной оси Y

Полученные соотношения позволяют находить значения напряженности электрического поля в разных точках внутри металлонаполненной системы. Распределение напряженности на поверхности частиц наполнителя представлено на рис. 7 и аналитически описывается формулой

$$E = 3E_0 \cos \theta \quad (5)$$

С помощью полученных соотношений можно определять значения величины напряженности электрического поля в разных точках внутри полимерной системы. На рис. 8 представлено распределение напряженности электрического поля на плоскости OXY при $\xi = 0,1$.

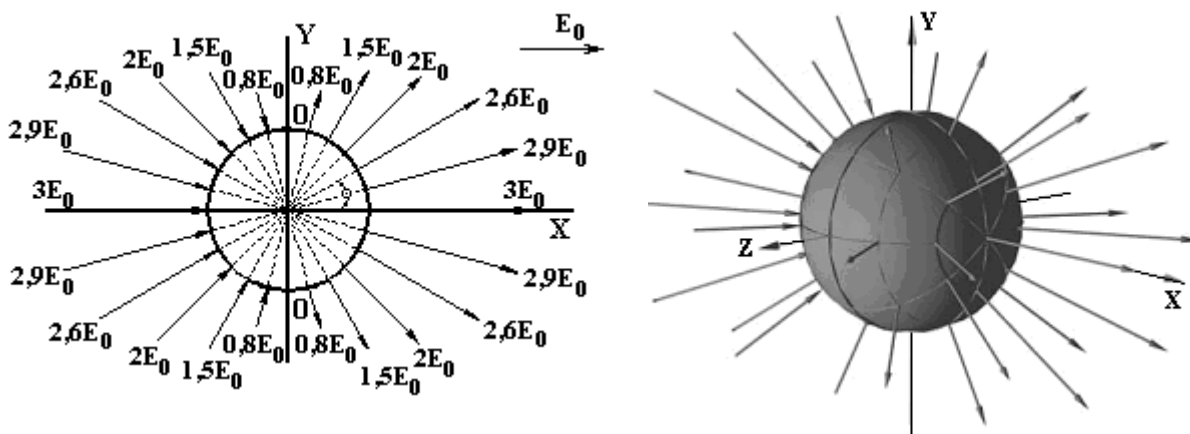


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля на поверхности металлического наполнителя

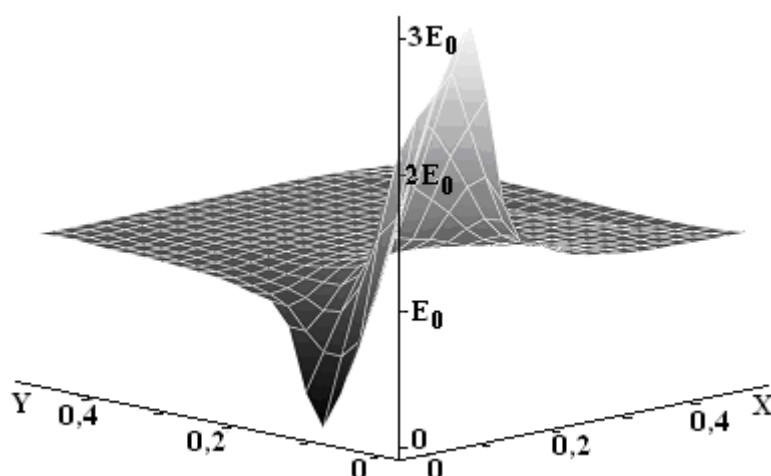


Рис. 8. Распределение напряженности электрического поля на плоскости OXY

Заключение

Таким образом, введение в полимер высокодисперсного металлического наполнителя создает неоднородное электрическое поле в случае формирования композита во внешнем электрическом поле в Т-р режиме. Предложенная модель гетерогенной системы позволяет определять величину напряженности электрического поля в такой системе и указать пути направленного регулирования комплекса свойств ГПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М., 2000.
2. Электреты / Под ред. Г.Сесслера. М., 1983.
3. Луцкейкин Г.А. Полимерные электреты. М., 1984.
4. Френкель С.И., Цыгельный И.М., Колупаев Б.С. Молекулярная кибернетика. Львов, 1990.
5. Липатов Ю.С. Физикохимия многокомпонентных полимерных систем. Киев, 1986.
6. Колупаев Б.С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем. Львов, 1980.
7. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М., 1991.
8. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев, 1980.
9. Мучник В.М., Фишман Б.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. Л., 1982.
10. Саранин В.А. Напряженность электрического поля заряженных проводящих шаров и пробой воздушного промежутка между ними // Успехи физических наук. 2002. № 12. С.1449–1454.
11. Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. Методы расчета электростатических полей. М., 1963.
12. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М., 1958. С.822–838.

Summary

It is investigated the influence of disperse metallic filler on size of intensity of an electric field in heterogeneous polymeric system. The considered model can be used for an estimation of termodepolarizing effects of polymers, reception of termoelectrets, estimation of electric durability of polymeric composite materials.

В.В. Шамко, А.И. Вовченко, Л.А. Каменская, Г.А. Барбашова

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ МОНОИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Октябрьский пр., 43-а, г. Николаев-18, 54018, Украина*

Введение

В разрядноимпульсных технологиях по электровзрывной очистке отливок от формовочных и стержневых смесей и запрессовке труб реализуются, как правило, моноимпульсные режимы разряда (см., например, [1]). Важной технологической задачей при этом является получение в зоне объекта обработки оптимальной по форме и интенсивности волны давления, когда бы обрабатываемый объект смог поглотить максимум излучаемой электровзрывным источником акустической энергии.

Данная работа посвящена численному исследованию возможностей управления гидродинамическими процессами подводного электровзрыва с моноимпульсным энерговодом путем вариации параметров импульса электрической мощности $N(t)$.

В ряде более ранних исследований [2–8] было показано, что форма эпюр давление–время для разрядного канала и окружающей его жидкости не претерпевает существенных изменений при вариации параметров импульса мощности, а амплитуда давления зависит в основном от скорости ввода мощности. Причем аналитические решения задачи [2, 4, 7] предсказывают постоянство давления при неизменной скорости ввода мощности, тогда как по результатам численного решения давление представляется изменяющейся функцией времени [3, 5, 6]. К тому же в отмеченных работах разрядный канал моделировался либо сферическим излучающим источником [6], либо бесконечным цилиндром [2–4, 7, 8], в то время как разряды с моноимпульсным вводом энергии соответствуют в подавляющем большинстве модели короткого либо длинного (но конечного) цилиндра [1, 5]. Поэтому в настоящей работе решалась двумерная гидродинамическая задача.

Математическая постановка задачи

В области, ограниченной контактными разрывом плазма–вода и ударной волной, требуется найти решение системы двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, представляющих собой законы сохранения массы, импульса и энергии [9]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4, \quad (1)$$

где $F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T$; $F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + P, (e + P)v_z]^T$; $F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + P, \rho v_r v_z, (e + P)v_r]^T$; $F_4 = [0, P, 0, 0]^T$; T указывает на то, что матрицу-строку необходимо трансформировать; t – время;

Н.И. Ботошан, М.К. Болога, С.Е. Берзой

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗОМ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Введение

Решающую роль в интенсификации переноса тепла при тепловой обработке биологического сырья играет жидкая фракция. В необработанном состоянии растительное сырье содержит жидкую фракцию, в основном во внутриклеточных вакуолях, закрытую для прямого доступа тепла клеточной мембраной и цитоплазмой, богатой белками. Повышение температуры до значений выше температуры коагуляции белков стабилизирует прямой доступ тепла к внутриклеточной жидкости, однако часть ее остается закрытой в оболочке коагуляции белков цитоплазмы. В таком случае линейное моделирование переноса тепла растительной среды определено составным коэффициентом теплопроводности обоих компонентов сырья, жидкой (λ_a) и твердой изолирующей (λ_m) фаз среды. Теплопроводность растительного сырья для стационарного распределения тепла до и после плазмолиза позволяет оценить эффективность интенсификации теплопереноса. Так как коэффициенты теплопроводности жидкой фракции и термоизоляционной клеточной оболочки – практически постоянные величины ($\lambda_a = 0,58$ Вт/(м·К) и $\lambda_m = 0,1$ Вт/(м·К)), то коэффициенты теплопроводности сырья оценены до и после обработки при помощи полученных в [1] формул. Доля жидкой фракции сырья принята известной для заданного вида сырья, к примеру для томатной пульпы она составляет $x=0,9$.

Предварительный плазмолиз биологической среды при температурах ниже температуры коагуляции белков уравнивает роль теплопроводящих компонентов в отношении переноса тепла, разрушая термоизоляционную преграду к вакуольной жидкости, что способствует увеличению коэффициента теплопроводности от начального значения $\lambda_n = 0,4$ Вт/(м·К) до конечного $\lambda_p = 0,55$ Вт/(м·К). Эффективность интенсификации переноса тепла для томатной массы, подверженной предварительному плазмолизу, выраженная в процентах, равна 27,3.

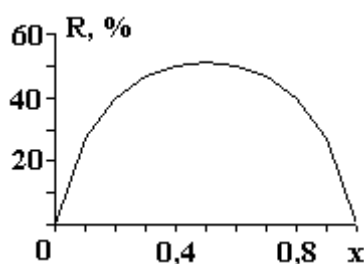


Рис. 1

На рис. 1 представлена диаграмма эффективности интенсификации тепловой обработки в зависимости от доли жидкой фракции в растительном сырье для ассортимента биологических сред, заимствованная из [1]. Максимальный эффект интенсификации ограничен значением жидкой фракции $x=0,5$, с понижением вокруг $x \neq 0,5$. Примечательно, что для растительного сырья с содержанием влаги, равным половине полного объема среды, эффект интенсификации максимальный.

1. Изменение теплопереноса биологической среды плазмолизом

Процесс передачи тепла в биологических средах характеризуется нестационарной теплопро-

водностью. В биологической среде вода является основным переносчиком тепла с коэффициентом теплопроводности примерно равным λ_a . Биологическая составляющая тканей обладает коэффициентом теплопроводности, уступающим по величине жидкой фракции и примерно равным λ_m . Если эти компоненты сырья составляли бы однородную смесь, то теплопроводность была бы стационарной характеристикой среды, которая определялась бы условием параллельного соединения тепловых сопротивлений составляющих:

$$\lambda = \lambda_a x + \lambda_m z,$$

где x и z – доли компонентов в смеси.

Однако роль воды в биологических средах, кроме химически связанной, в процессе передачи тепла неоднозначна [2]. Например, в растительных средах значительная доля воды находится во внутриклеточных вакуолях, и лишь небольшая ее часть составляет внеклеточную жидкость. Таким образом, вклад жидкой фракции в теплопроводность зависит от состояния клеточного строения биологической среды. Свежие овощи и фрукты во внутриклеточных вакуолях содержат до 90% жидкой фракции. По мере разрушения клеточного строения среды высвобождается внутриклеточная жидкость, увеличивая тем самым долю внеклеточной.

Существуют различные способы обработки биологической среды с целью высвобождения внутриклеточной жидкости – начиная с механического и термического и кончая ультразвуковым плазмолизом. Чаще всего применяется термический способ как наиболее эффективный и энергосберегающий. Но и он обладает существенным недостатком, поскольку не позволяет полностью высвободить внутриклеточную жидкость. В определенном интервале температур белковая составляющая клетки – цитоплазма подвержена коагуляции. При этом образуются замкнутые объемы, в которых часть жидкости внутриклеточных вакуолей остается термически изолированной от внеклеточной жидкости в коагулированной оболочке. Поэтому наиболее эффективным способом полного высвобождения внутриклеточной жидкости растительных сред является электроплазмолиз. Предварительная обработка растительного сырья электрическим импульсным током разрушает клеточное строение среды при температуре ниже температуры коагуляции белков [3].

Предложенная аналитическая модель процесса нестационарного переноса тепла позволяет увязать уровень плазмолиза биологической среды с долей высвобожденной внутриклеточной жидкости. Для этого выделим три основные компоненты биологической среды: x – доля внеклеточной жидкости, y – доля внутриклеточной жидкости, z – доля биологических тканей среды. В таком аспекте биологическая среда состоит из трех выделенных составляющих, удовлетворяющих условию полноты: $x + y + z = 1$. Перенос тепла в такой среде осуществляется по двум различным каналам: 1 – через внеклеточную жидкость, 2 – через клеточные ткани и внутриклеточную жидкость. Теплопроводность по второму каналу определяется как в случае последовательного соединения тепловых сопротивлений составляющих:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_a \lambda_m (1-x)}{\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}.$$

Теплопроводность среды нелинейно зависит от содержания внеклеточной жидкости, доля которой определяется уровнем плазмолиза среды. Фактически теплопроводность среды составляется как сумма тепловых сопротивлений параллельно соединенных каналов 1 и 2.

$$\lambda(x, z) = \lambda_a \frac{\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}{\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}.$$

Таким образом, свежей растительной среде соответствует $x = 0$, которая характеризуется коэффициентом теплопроводности

$$\lambda(0, z) = \frac{\lambda_a \lambda_m}{\lambda_m (1-z) + \lambda_a z}.$$

Эта формула указывает на то, что чем меньше доля сухой составляющей, тем ближе значение теплопроводности среды к теплопроводности воды. Это характерно для двух компонентных смесей и является вполне осмысленным результатом.

Интересен случай полного плазмолиза, когда $x = 1 - z$. Как уже отмечалось, полному плазмолизу соответствует гомогенизированная среда, для которой теплопроводность определяется уже известным соотношением для однородной смеси:

$$\lambda(1-z, z) = \lambda_m z + \lambda_a (1-z).$$

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента теплопереноса в биологической среде от уровня внеклеточной высвобожденной жидкости x . Изменение теплопроводности наиболее существенно для биологических сред с большим содержанием сухих веществ. Малое содержание биологических тканей указывает на необходимость разрушения малого их объема, что, естественно, позволяет незначительно интенсифицировать теплоперенос. Основным результатом предварительного плазмолиза является сближение теплопереноса биологической среды с теплопереносом в жидкости. Поэтому в конце плазмолиза различные виды биологического сырья по содержанию уровня биологических тканей имеют почти одинаковый по величине коэффициент теплопереноса. На приведенных графиках принято $\lambda_m = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Доли сухих веществ указаны для каждой кривой в отдельности.

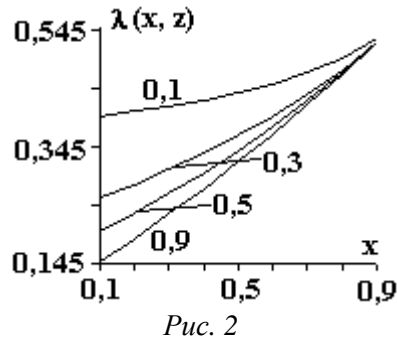


Рис. 2

2. Скорость и эффективность интенсификации теплопереноса электроплазмолизом

Скорость изменения теплопереноса в биологической среде зависит от величины z , характеризующей содержание биологических тканей в клеточном строении среды (см. рис. 2). Эта характеристика позволяет оценить энергетические затраты на предварительную обработку биологического сырья для интенсификации теплопереноса. Скорости изменения теплопереноса среды плазмолизом можно определить, вычисляя производную от теплопроводности $\lambda(x, z)$ по содержанию высвобожденной влаги x .

$$k(x, z) = \lambda_a \frac{z^2 (\lambda_a - \lambda_m)^2}{[\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)]^2}.$$

Любопытно, что в начале предварительного плазмолиза скорость изменения теплопереноса $k(0, z)$ зависит от содержания биологических тканей в среде, а в конце обработки она перестает зависеть от него: $k(1-z, z) = (\lambda_a - \lambda_m)^2 / \lambda_a$. Важно то обстоятельство, что скорость изменения коэффициента теплопереноса зависит от квадрата разности $\lambda_a - \lambda_m$, определяющего целесообразность предварительного плазмолиза для улучшения теплопереноса биологической среды.

Другой значимой характеристикой предварительного плазмолиза биологической среды является эффективность обработки. Естественно, эффективность предварительного плазмолиза зависит от уровня содержания внутриклеточной жидкости в среде перед обработкой. Это обстоятельство накладывает определенные ограничения на уровень содержания биологических тканей – клеточных мембран и протоплазмы. Относительное изменение теплопереноса биологической среды в результате плазмолиза характеризуется отношением разности $\lambda(1-z, z) - \lambda(0, z)$ к теплопроводности среды в конце полного плазмолиза $\lambda(1-z, z)$. Эта характеристика, выраженная в процентах, аналогична случаю стационарной модели [1] и определяет эффективность предварительного плазмолиза при изменении теплопереноса биологической среды:

$$R = \frac{(\lambda_a - \lambda_m)^2 z(1-z)}{(\lambda_a - \lambda_m)^2 z(1-z) + \lambda_a \lambda_m} 100\%.$$

Эффективность плазмолиза как функция содержания сухих веществ биологической среды представлена на рис. 3.

Куполообразная кривая указывает на то, что максимальная эффективность предварительного плазмолиза среды с целью интенсификации теплопереноса присуща биологическим средам с содержанием биологической массы сухих веществ, равным полному содержанию жидкой фракции. Поэтому эффективность интенсификации теплопереноса в производстве томатной пасты не может превышать 30% и определяется первоначальным отношением содержания влаги в сырье.

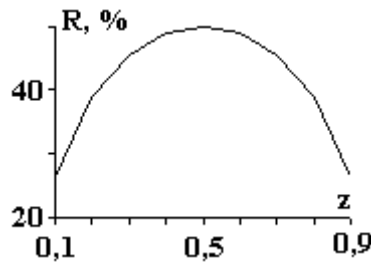


Рис. 3

Оптимизация процесса выпаривания жидкой компоненты из биологической среды

В большинстве случаев термическая обработка биологического сырья используется для удаления части жидкой фракции среды в технологических процессах концентрации и сушки, характерных не только для пищевой промышленности. Разработаны специальные установки, проектирование которых учитывает как термические характеристики сырья, так и параметры режимов обработки. Это особенно важно в случае, когда термическая обработка может пройти с потерей качества конечного продукта. Поэтому интенсификация теплообмена всегда сталкивается с ограничениями режимов обработки и конструктивных параметров установок. Вопрос заключается в том, чем определяется область ограничений для получения высококачественного конечного продукта при максимальной интенсификации процесса термообработки. Кроме того, оптимизация процесса предполагает сведение тепловых потерь к минимуму значения. Эта задача не простая, если учесть сложности при решении уравнения теплопроводности Фурье [4]. Данное уравнение выведено при неявном предположении, что скорость распространения теплоты бесконечно большая. Поэтому для процессов умеренной интенсивности, чаще встречающихся на практике, возможность такого допущения подтверждается расчетами и опытными данными.

Исследование нестационарных процессов высокой интенсивности передачи тепла требует учета конечной скорости распространения теплоты. Впервые это обстоятельство отмечено авторами [5, 6] независимо друг от друга. Была введена гипотеза о конечной скорости распространения теплоты $v_r = \sqrt{a/\tau_r}$, где a – коэффициент температуропроводности среды; τ_r – время релаксации теплового напряжения, которое определяется условием установления квазистационарного режима теплопереноса.

Рассмотрим задачу теплопроводности однородной биологической среды, заключенной в объеме простейшей геометрической формы при наличии внутренних стоков теплоты на испарение части влаги. К контактной поверхности нагрева, определяемый ее геометрической формой, подводится тепловой поток, поддерживающий температуру поверхности T_0 постоянной. Будем считать, что температурное поле нагрева изменяется только вдоль одной пространственной координаты в квазистационарном режиме $\tau_\lambda \gg \tau_r$, где τ_λ – время изменения теплопроводности среды. Этому условию удовлетворяют три одномерные задачи теплопроводности.

Одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{v}{x} \frac{dT}{dx} + \frac{q_v(x)}{\lambda} = 0, x_1 \leq x \leq x_2,$$

где v – коэффициент формы объема среды: $v = 0$ – параллелепипед, $v = 1$ – цилиндр, $v = 2$ – сфера.

Объемная плотность теплового потока при испарении $q_v(x)$ определяется как количество теплоты, потраченное на испарение влаги в объеме V за единицу времени $q_v(x) = dQ_{\text{нап}}/Vd\tau$, где $Q_{\text{нап}} = qm$ – теплота парообразования, m – масса выпаренной влаги, q – удельная теплота парообразования. Однако доля жидкой фракции в среде определена отношением объема жидкости (воды) к полному объему среды: $y = V_a/V$. Поэтому $q_v = -q\rho a$, где ρ – плотность жидкости, $a = -\frac{dy}{d\tau}$ – скорость изменения доли жидкости в среде при испарении. Здесь рассматривается случай линейной зависимости доли жидкости в среде $y = y_0 - a\tau$, учитывающий убыль жидкости в среде при испарении.

В случае прямоугольной плоской поверхности нагрева общие решения для температурного поля и потока тепла имеют вид

$$T(x) = \frac{qpa}{2\lambda}x^2 + C_1x + C_2,$$

$$\Phi(x) = -\lambda\left(\frac{qpa}{\lambda}x + C_1\right).$$

Рассмотрим краевую задачу нагрева с одной поверхности $x = 0$ при граничном условии первого рода $T(0) = T_0$. Затем выполним оптимизацию процесса испарения влаги следующими граничными требованиями: при $x = d$, $T(d) = T_c$, $\Phi(d) = 0$, где T_c – температура кипения жидкой фракции. Здесь применена методика оптимизации процесса испарения жидкости при помощи условия, обеспечивающего на дальней границе области нагрева температуру жидкости, равную температуре кипения с нулевым значением потока излучения. Эти условия минимизируют потери тепла на излучение в окружающем пространстве с открытой поверхности $\Phi(d) = 0$, поддерживая необходимый для эффективного парообразования температурный режим $T(d) = T_c$.

Температурное поле и тепловой поток принимают следующий вид:

$$T(x) = T_0 - \frac{2x}{d}(T_0 - T_c) + \frac{qpa}{2\lambda}x^2,$$

$$\Phi(x) = \frac{2\lambda}{d}(T_0 - T_c) - qpax.$$

Условие $\Phi(d) = 0$ позволяет увязать скорость выпаривания в оптимальном режиме с характеристиками среды и температурами нагрева T_0 и кипения T_c :

$$a_I = \frac{2\lambda(T_0 - T_c)}{qpd^2}.$$

Для обеспечения хорошей скорости выпаривания жидкости из биологической среды необходимо увязать градиент температур $(T_0 - T_c)/d$ с расстоянием между поверхностями нагрева и излучения тепла d . Кроме того, полученное соотношение для скорости нагрева позволяет регулировать процесс нагрева путем переопределения произведения $\lambda(T_0 - T_c)$ по мере изменения коэффициента теплопроводности среды.

Продолжим оптимизацию процесса выпаривания путем модификации конструктивных особенностей тепловой установки. Предположим, что нагрев среды осуществляется с двух сторон при температуре нагрева T_0 , то есть $T(0) = T_0$ и $T(d) = T_0$.

В этом случае температурное поле и тепловой поток принимают вид

$$T(x) = T_0 - \frac{qpdax}{2\lambda}x\left(1 - \frac{x}{d}\right),$$

$$\Phi(x) = \frac{qpa}{2}d\left(1 - \frac{2x}{d}\right).$$

Из выражения для потока видно, что он равен нулю при $x = d/2$, то есть посередине интервала $(0, d)$. Потребуем, чтобы на этой изотермической поверхности температура соответствовала температуре кипения жидкости $T(d/2) = T_c$.

Скорость испарения в случае нагрева с двух поверхностей зависит от характеристик среды, параметров режима и установки следующим образом:

$$a_{II} = \frac{8\lambda(T_0 - T_c)}{qpd^2}.$$

Видно, что скорость испарения возрастает в 4 раза, что является принципиальным для интенсификации процесса выпаривания. Характерно то, что испарение при этих условиях будет проходить в оптимальном режиме $T(d/2) = T_c$ и $\Phi(d/2) = 0$. В этом случае потоки тепла от различных поверхностей нагрева симметричны относительно изотермической поверхности при температуре кипения. Например, на поверхностях нагрева тепловые потоки равны $qpad/2$ и направлены в противоположные стороны. Заметим, что тепловое напряжение на поверхности нагрева, обеспечивающее оптимальный режим испарения, спадает в два раза по сравнению с нагревом с одной поверхности. Здесь не будем останавливаться на решениях одномерных задач для случаев цилиндрической и сферической поверхностей нагрева. Однако отметим, что совершенствование установок, основанных на плоских поверхностях нагрева, предполагает максимально возможное уменьшение разности темпера-

тур ($T_0 - T_c$) с целью улучшение качества готового продукта. Это возможно в случае применения многосекционного нагревателя с узким интервалом между поверхностями нагрева.

Интенсификация и длительность процесса выпаривания влаги из биологической среды

Выпаривание влаги из биологической среды применяется в пищевой промышленности при получении концентрированных соков и паст из овощей и фруктов, а также в целях удаления влаги из различных растворов и смесей. Для получения высококачественного конечного продукта необходимо предостеречь биологическую среду от перегрева с образованием пригара на поверхностях нагревателя. Уязвимым моментом термообработки биологической среды является достижение предела концентрации сухого вещества в продукте, когда уровень содержания влаги очень низкий.

Исходя из определения скорости выпаривания $a = -dy/d\tau$ можно вычислить длительность процесса термообработки для получения необходимой концентрации сухого вещества z в конечном продукте:

$$\tau_{обп} = \frac{q\rho d^2}{k(T_0 - T_c)} \int_{z_0}^z \frac{dz}{\lambda(z)},$$

где $k = 2$ или $k = 8$ в зависимости от способа нагрева – с одной или с двух поверхностей; z_0 и z – начальная и конечная доли содержания сухих веществ. В определение времени обработки для выпаривания влаги входит интеграл, содержащий функцию теплопроводности, которую следует заменить на $\lambda(0, z)$ для необработанного или на $\lambda(1 - z, z)$ для обработанного плазмолизом биологического сырья.

Таким образом, время термической обработки не подверженного плазмолизу биологического сырья определяется соотношением

$$\tau_{обп}^n = \frac{q\rho d^2 (z - z_0)}{k(T_0 - T_c)} \left[1 + \frac{(\lambda_a - \lambda_m)(z + z_0)}{2\lambda_m} \right].$$

Для предварительно обработанного плазмолизом биологического сырья время термической обработки при выпаривании влаги

$$\tau_{обп}^p = \frac{q\rho d^2}{k(T_0 - T_c)(\lambda_a - \lambda_m)} \ln \frac{\lambda_a - z_0(\lambda_a - \lambda_m)}{\lambda_a - z(\lambda_a - \lambda_m)}.$$

Интенсификацию процесса выпаривания электроплазмолизом можно оценить отношением времен обработки, определяя степень интенсификации выпаривания предварительным плазмолизом соотношением

$$I = \frac{\tau_{обп}^n}{\tau_{обп}^p}.$$

Заметим, что при прочих равных условиях эксплуатации установки для выпаривания влаги (режима нагрева и параметров установки) эффект интенсификации выпаривания влаги предварительным плазмолизом среды определяется соотношением:

$$I = \frac{\lambda_a - \lambda_m}{\lambda_m} (z - z_0) \frac{1 + \frac{\lambda_a - \lambda_m}{2\lambda_m} (z + z_0)}{\ln(\lambda_a - z_0(\lambda_a - \lambda_m)) - \ln(\lambda_a - z(\lambda_a - \lambda_m))}.$$

Зависимости интенсификации выпаривания томатной пасты с начальным содержанием сухих веществ $z_0 = 0,01$ и $z_0 = 0,09$ представлены на рис. 4: эффект интенсификации выпаривания зависит от доли содержания сухих веществ в начале термообработки незначительно. Поэтому на рисунке представлены только две крайние кривые: $z_0 = 0,01$ и $z_0 = 0,09$.

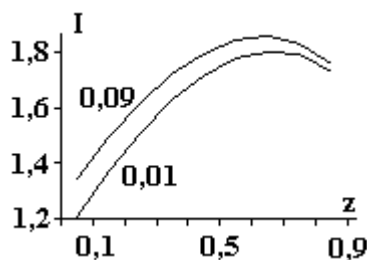


Рис. 4

Динамика процесса для других z_0 приведена в таблице значений степени интенсификации.

z	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
0,1	1,21	1,24	1,28	1,31	1,34
0,2	1,37	1,40	1,43	1,46	1,49
0,3	1,51	1,54	1,57	1,59	1,62
0,4	1,63	1,65	1,68	1,70	1,72
0,5	1,72	1,74	1,76	1,78	1,80
0,6	1,78	1,80	1,81	1,83	1,84
0,7	1,80	1,82	1,83	1,85	1,86
0,8	1,79	1,80	1,81	1,82	1,83
0,9	1,73	1,74	1,75	1,76	1,76

Эффект интенсификации выпаривания до заданной концентрации сухих веществ увеличивается с ростом начального значения z_0 .

Оценки длительности процесса выпаривания при выработке томатной пасты с концентрацией 30% из сырья с начальным содержанием сухих веществ 10% проведены с помощью полученных выражений для времени обработки при следующих параметрах:

$$q = 538,9 \text{ ккал/кг}, \rho = 1000 \text{ кг/м}^3, k = 8,$$

$$\lambda_a = 0,5 \text{ ккал/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{ч)}, \lambda_m = 0,1 \text{ ккал/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{ч)}, z = 0,3, z_0 = 0,1.$$

Длительность процесса выпаривания для необработанного и обработанного плазмолизом сырья определяется выражениями

$$\tau_{обп}^n = 48,50 \cdot 10^3 \frac{d^2}{T_0 - T_c}, \quad \tau_{обп}^p = 32,18 \cdot 10^3 \frac{d^2}{T_0 - T_c}.$$

Технической характеристикой процесса выпаривания является величина γ , равная отношению расстояния d к градиенту температуры $(T_0 - T_c)/d$. Для уменьшения длительности выпаривания необходимо минимизировать отношение $\gamma = d^2/(T_0 - T_c)$. Заметим, что чрезмерное увеличение разности температур невозможно из-за подгорания продукта на поверхностях нагрева, а чрезмерное уменьшение расстояния между ними уменьшает скорость течения вязкого продукта и способствует его прилипанию к стенкам нагревателя. Поэтому конструктивные характеристики выпарных установок должны предусмотреть эти особенности нагреваемого объема сырья. В случае нагрева с двух плоских поверхностей лучше применить многосекционные нагреватели со сравнительно небольшим расстоянием между поверхностями нагрева при умеренном градиенте температур. Представляют интерес и конструктивные особенности выпарных установок с цилиндрическими или сферическими поверхностями нагрева, принцип оптимизации работы которых заслуживает самостоятельного рассмотрения.

Выводы

Проведенный анализ коэффициента теплопроводности подтверждает целесообразность применения предварительного плазмолиза для эффективной интенсификации теплопереноса в биологической среде.

Интенсификация термообработки биологической среды при выпаривании влаги основывается на изменении коэффициента теплопроводности. В биологической среде жидкая фракция содержится в клеточном и межклеточном объемах, поэтому доступ теплового потока к ней неоднозначен и зависит от места локализации. Преодоление термоизоляционного барьера тепловым потоком к части внутриклеточной жидкости, а также замкнутость внутриклеточного объема требуют дополнительных затрат тепловой энергии и повышения градиента температуры.

Принят принцип оптимизации путем поддержания фиксированной температуры и нулевого потока тепла на самой отдаленной изотермической поверхности от поверхностей нагрева. Используемая методика исследований процесса выпаривания позволяет увязать основные характеристики - степени интенсификации и продолжительности термической обработки для достижения заданного процента содержания сухих веществ с тепловыми характеристиками среды, режимом нагрева и параметрами установки. Результаты представляют основу для улучшения конструктивных параметров выпарных установок и являются методической основой новых исследований.

Производственные оценки характеристик интенсификации теплопереноса подтверждаются результатами аналитической модели. Модельные характеристики позволяют прогнозировать как эффективность предварительного плазмолиза для интенсификации теплопереноса, так и энергетические затраты на предварительную обработку сырья.

Результаты основываются на решении квазистационарного уравнения теплопроводности. Критерием обоснованности приближения служит различие времен изменения тепловых характеристик и распространения теплоты, а также адекватность полученных результатов с данными опытов. Применительно к процессу выпаривания при производстве томатной пасты точность расчетов отличается от экспериментальных данных не более чем на 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К., Ботошан Н.И., Берзой С.Е.* Интенсификация переноса тепла электроплазмолитом. Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 4. С. 290–292.
2. *Нобел П.* Физиология растительной клетки. М., 1973.
3. *Берзой С.Е., Ботошан Н.И., Болога М.К.* Электроплазмолит – состояние развития и некоторые перспективы // Электронная обработка материалов. 2000. № 5. С. 126–132.
4. *Беляев Н.М., Рядно А.А.* Методы теории теплопроводности. М., 1982.
5. *Vernotte P.* Le depouillement des mesures sans hypothese prealable. Comptes. Redus Hebdomadaires des seances de l'Academie de sciences. Paris. 1958. 246. N 3. P. 339–401.
6. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М., 1967.

Поступила 17.06.04

Summary

Technique of heat transfer optimization for electroplasmolysed biological raw materials have been developed on the basis of results of simulation of the coefficient of heat conduction. Criteria of optimization are conditions of minimum heat consumption at effective simulated by electroplasmolysis coefficient of heat conduction. Conditions, at which for selected one-dimensional Fourier problem, designing characteristics of installation for moisture vaporization promote further heat transfer enhancing, are considered.

В.П. Усенко, И.П. Кундев, В.П. Калиновский, П.В. Левченко

МЕДИЦИНСКИЙ СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ ОСВЕТИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ СУПЕРЯРКИХ СВЕТОДИОДОВ

НИИП ЦМТ “Техмед”,
ул. Академическая, 3/3, г. Кишинев, MD-2028, Молдова

Введение

Использование стробоскопических осветителей при диагностике голосовых складок определяется тем, что они позволяют генерировать короткие импульсы света синхронно с движением связок. Тем самым движущиеся складки визуально воспринимаются как неподвижные, а регулировка фазы позволяет наблюдать неподвижную картину различной фазы их движения. Это дает возможность отличать опухоли от воспалительных изменений, диагностировать нарушения голоса при внешне нормальной гортани [1].

Техническая реализация

С технической точки зрения импульсное освещение можно осуществить импульсными ксеноновыми или импульсными водородными лампами, а также теми или иными модуляторами светового потока с помощью галогенных ламп или дуговых ксеноновых ламп. По оптическим характеристикам предпочтительными являются ксеноновые лампы, однако такие устройства сложны и дорогостоящи.

Привлекательный вариант использования фотографических ксеноновых ламп – вспышек (хороший спектральный состав, высокий КПД), однако осложняется низкими рабочими частотами, не превышающими десятка герц [2]. Это приводит к применению импульсных водородных ламп в устаревшем и неудобном в применении ларингостробоскопе типа ЭЛС-02 [3].

Проблемы возникают и при использовании видеокамер или импульсных ксеноновых ламп в режиме дежурной дуги, что усложняет и удорожает оборудование.

Вместе с тем появление доступных суперярких светодиодов с белым излучением позволяет существенно упростить схемотехнику и конструкцию стробоскопического осветителя, создать простой и удобный в эксплуатации ларингостробоскоп с автономным электропитанием.

Функционально такой осветитель состоит из следующих узлов: предварительного усилителя, перестраиваемого фильтра, компаратора, регулятора фазового сдвига и токового ключа-формирователя (см. рисунок).

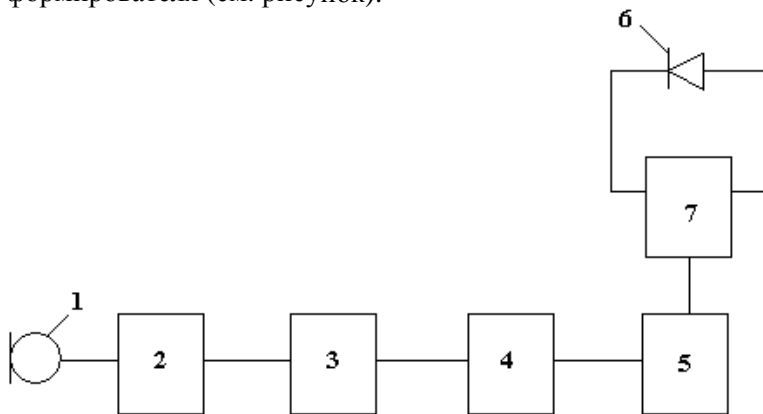


Схема осветителя: 1 – микрофон (ларингофон), 2 – предварительный усилитель, 3 – перестраиваемый фильтр, 4 – компаратор-формирователь, 5 – регулятор временной задержки, 6 – суперяркий светодиод, 7 – блок питания

Работа рассматриваемого ларингостробоскопа осуществляется следующим образом. При произнесении гласных звуков в ларингофоне (микрофоне) М1, укрепленном на горле пациента, возникает сложный сигнал в диапазоне частот до 1 кГц, синхронизированный с колебаниями голосовых связок. Этот сигнал подвергается предварительному усилению и спектральной фильтрации, что позволяет врачу при корректном выборе доминантной частоты получить почти синусоидальный сигнал. Компаратор формирует запускающие импульсы в момент перехода синусоиды через ноль, а регулятор фазового сдвига производит регулируемую временную задержку этих импульсов. Токовый ключ по приходу запускающих импульсов формирует короткие (~5 мкс) импульсы стабильного тока для включения суперяркого светодиода. Излучение светодиода вводится в гибкий световод, что позволяет врачу использовать при работе обычный медицинский инструментарий.

Подготовительные работы, особенно при затруднениях с голосом, могут выполняться в режиме с непрерывным излучением светодиода, что обеспечивается при помощи переключателя в токовом ключе.

Технические характеристики

Диапазон перестройки доминантной частоты, Гц	100–1000
Средняя мощность излучения, ВА	не менее 1
Напряжение питания, В	220 + 10%
Потребляемая мощность, ВА	не более 15
Габаритные размеры, мм×мм×мм	180 x 85 x 160
Масса, кг	1,5

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильсон Д.К. Нарушение голоса у детей. М., 1990.
2. Телелаева Л.М. Двигательные нарушения гортани. М., 1984.
3. Ларингостробоскоп ЭЛС–02, Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л., 1982.

Поступила 06.09.04

Summary

The medical requirements to medical laringostroboscope is as soon as possible, as existing technical methods. The simple and chip solution on the base of superlight LED is proposed.

В.В. Паршутин, В.Г. Ревенко, Н.С. Шолтоян

ИНГИБИРУЮЩАЯ КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ВО ВРЕМЯ ОСТАНОВА

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

Паровые котлы – один из основных компонентов системы теплоэнергетического оборудования. При их эксплуатации на электростанциях обычно решаются две задачи: во-первых, не допускается уменьшение теплоотдачи за счет осаждения на стенках аппаратов пленок из карбонатов и оксидов; во-вторых, снижается скорость коррозии поверхности котла во время его останова. Эти задачи решаются не одновременно, а последовательно. Первая – вследствие обессоливания и умягчения питательной воды (хотя при этом возрастает коррозионная активность среды), вторая – благодаря ингибированию среды, заливаемой в котел во время останова. При этом противокоррозионные мероприятия должны быть универсальными, то есть обеспечивать надежность работы не только котла, но и всех элементов водоочистки и оборудования тракта питательной воды, а также конденсаторопроводов, при коррозии которых питательная вода обогащается оксидами железа и меди – стимуляторами большинства видов коррозии [1]. Оксиды поступают из питательного тракта и накапливаются в котлах в результате стояночной коррозии, что является предпосылкой процесса подшламовой коррозии [1]. Поэтому предупреждение подшламовой коррозии должно предусматривать борьбу как с коррозией до котлового тракта, так и со стояночной коррозией.

Консервация котлов во время останова производится с целью уменьшения или полного исключения стояночной коррозии металлов, характерной особенностью которой являются образование на поверхности металла язвин и накопление большого количества оксидов железа и меди. Это приводит к развитию коррозионных процессов при дальнейшей эксплуатации оборудования, ухудшению теплообмена и перерасходу тепла, уменьшению прочности трубных систем и, как следствие, – к необходимости их преждевременной замены.

Обычно в качестве ингибирующих композиций при консервации котлов во время их простаивания используют аммиачный раствор нитрита натрия, гидразин и аммиак, сульфит натрия и др. [1–7].

Использование гидразина в теплоэнергетике объясняется его способностью удалять из воды растворенный или химически несвязанный кислород в котлах и системах отопления. При этом молекула гидразина взаимодействует с находящимся в растворенном состоянии кислородом в соответствии с уравнением



Однако скорость реакции гидразина с кислородом при обычной температуре (например, ниже 60°C) невелика. Поэтому гидразин применяют с добавками (акриламидами, металлоорганическими комплексами и др.), ускоряющими его реакцию при невысоких температурах. Преимущество гидразина перед другими восстановителями, в частности сульфитом натрия, состоит в том, что побочным продуктом его окисления чаще всего является азот, легко удаляемый из воды и не являющийся коррозионно-активным компонентом. При окислении же сульфита образуются сульфаты, являющиеся агрессивными агентами, и накопление их в воде нежелательно [8, 9]. Кроме того, добавление в воду гидразина уменьшает содержание кислорода в большей степени, чем введение сульфата [7].

Конкурирующей реакцией, которая может привести к возникновению нежелательных продук-

тов, является каталитическое или термическое разложение гидразина [3]:



или



Образующийся при этом аммиак может вызывать коррозию цветных металлов. Следует помнить, что гидразин ядовит и работать с ним нужно осторожно.

Что касается сульфита натрия, то для увеличения эффективности действия его используют совместно с катализаторами. Однако последние могут отложиться на котловых трубках и тем самым способствовать возникновению питтинговой коррозии [3].

Используемые в практике композиции на основе нитрита натрия [4, 5] содержат его в большом количестве, что небезопасно с экологической точки зрения. Кроме того, они не защищают от коррозии медь и латунь. Медь и ее сплавы обычно защищают композициями с бензотриазолом [2].

Следует отметить, что применяемые ингибирующие композиции обычно обеспечивают защиту от коррозии только одного металла – стали или меди и сплавов на ее основе.

Была поставлена цель разработать ингибирующую композицию, которая, с одной стороны, осуществляла бы одновременную полную защиту таких разнородных металлов, как железо и медь, с другой – позволила существенно снизить концентрацию экологически опасного компонента – нитрита-натрия.

Методика

Проводили оптимизацию состава ингибирующей композиции. После предварительных экспериментов в качестве компонентов композиции выбраны нитрит натрия, уротропин (гексаметилентетрамин) $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ и бензотриазол $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_3$ (БТА). Они выбраны по следующему признаку. Нитрит натрия часто используется для подавления коррозии железа и сталей в нейтральных водных растворах. Однако следует иметь в виду, что неправильно выбранная концентрация NaNO_2 может привести к локальной коррозии и быстрому выходу из строя оборудования. Кроме того, нитрит натрия не защищает, а даже может вызвать коррозию алюминия, меди, цинка и кадмия [2, 6]. Уротропин, являясь поверхностно-активным веществом, значительно улучшает смачиваемость металлической поверхности. Он хорошо растворим в воде [10], используется в составе ингибирующих композиций, подавляющих кислотную коррозию стали. Бензотриазол – хорошо кристаллизующееся бесцветное соединение, очень устойчивое к кислотам и щелочам, по химическим свойствам представляет чрезвычайно слабое основание, которое, однако, образует стойкие металлические соли [11]. Он обладает ограниченной растворимостью в воде, но его 1% раствор можно получить сравнительно легко, особенно в теплой или горячей воде.

Коррозионные испытания проводили в воде, химический состав которой с учетом некоторых сезонных отклонений соответствовал (мг/л): $\text{CO}_3^{2-} - < 6$, $\text{HCO}_3^- - 98,0$; $\text{Cl}^- - 57,0$; $\text{SO}_4^{2-} - 204,0$; $\text{Ca}^{2+} - 72,5$; $\text{Mg}^{2+} - 19,5$. При этом значение pH изменялось в пределах 7,2–7,6, а общая жесткость равнялась 3,82 мг-экв/л. По индексу Ланжелье (–0,08) вода характеризуется состоянием, близким к равновесному. По суммарному содержанию хлорид- и сульфат-ионов (150 мг/л) вода по классификации И.Л. Розенфельда [2] относится к сильно агрессивным средам. Время испытаний варьировали в пределах 120–500 часов. Температура поддерживалась $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Использовали образцы из стали 20 состава, вес.%: С 0,17–0,24; Мн 0,35–0,65; Si 0,17–0,37; Ст $\leq 0,25$; Ni $\leq 0,25$, остальное – железо, а также из меди МО (99,5% Cu) и монофазной латуни Л80 (80% Cu и 20% Zn). При коррозионных испытаниях образцы размером 50x25x3 мм полностью погружали в раствор на одинаковую глубину при свободном доступе воздуха. Их исходная шероховатость соответствовала обработке шлифованием. Потери от коррозии регистрировались гравиметрически. Эффект действия ингибитора количественно оценивался по критерию степени защиты, определяемому по формуле $Z = (k - k_1)/k$, где k и k_1 – скорости коррозии металла с применением ингибитора и без него. Степень защиты характеризует полноту подавления коррозии. Для оценки эффективности ингибиторов использовали коэффициент торможения $\gamma = k/k_1$, показывающий, во сколько раз снижается скорость коррозии в результате действия ингибитора. Оценку результатов коррозионных испытаний проводили по площади коррозионных поражений (%) и времени появления первых очагов коррозии (ч).

Перед опытом образцы тщательно обезжировали венской известью, промывали дистиллированной водой и высушивали фильтрованной бумагой. После испытаний их вынимали, высушивали вначале на воздухе, а затем в эксикаторе над слоем прокаленного CaCl_2 . Боковую поверхность образца изолировали лаком. Удаление продуктов коррозии со стальных образцов осуществляли в 0,5М растворе HCl с добавлением 0,5% уротропина, а с медных – в 5% растворе H_2SO_4 .

Фазовый состав продуктов коррозии изучали методом рентгенофазового анализа на универсальных дифрактометрах HZG – 4В и ДРОН-3М при кобальтовом или медном излучении. Использовали обычную рентгеновскую дифракцию по схеме $\Theta - 2\Theta$, а также методику со скользящей геометрией падения рентгеновского луча.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Из анализа результатов исследований (табл. 1) следует, что наименьшей стойкостью в воде обладает сталь. Первые очаги коррозии появляются на ней уже через четверть часа, тогда как медь и латунь начинают корродировать через два часа. Скорость коррозии стали (без контакта с медью) и ее сплавами на порядок больше, чем у меди. Латунь подвергается коррозии в два раза медленнее меди. Однако известно [3], что при испытании меди и латуни отмечена явная зависимость скорости коррозии от содержания кислорода, влияние которого на коррозию других металлов значительно меньше. Продукты коррозии меди и ее сплавов могут ускорять растворение стали, а при наличии гальванических пар положение усугубляется.

Таблица 1. Влияние среды на коррозию металлов (продолжительность испытаний 240 ч)

Состав коррозионной среды, г/л	Материал образца	Время до появления первых очагов коррозии, ч	Скорость коррозии, г/(м ² ·сут)	Коэффициент торможения γ	Степень защиты z , %
H ₂ O	Ст. 20	0,25	1,45	–	–
	МО	2	0,15	–	–
	Л80	2	0,06	–	–
H ₂ O+NaNO ₂ 200 [4]	Ст. 20	Нет поражений	0,0	–	100,0
	МО	0,5	1,02	-6,8	–
	Л80	1	0,38	-6,3	–
H ₂ O+NaNO ₂ 200+сульфатцеллюлозный щелок 100 + малярный клей 30 [5]	Ст. 20	Нет поражений	0,0	0,0	100,0
	МО	1	1,41	-9,4	–
	Л80	1	0,53	-8,8	–
H ₂ O+N ₂ H ₄ [2]	Ст. 20	40	0,15	9,7	89,7
	МО	2	0,153	-1,02	–
	Л80	2	0,063	-1,05	–
H ₂ O+NaNO ₂ 10	Ст. 20	48	0,01	145,0	99,3
	МО	4	0,71	-4,7	–
	Л80	4	0,21	-3,5	–
H ₂ O+NaNO ₂ 20	Ст. 20	Нет поражений	0,0	–	100,0
	МО	4	0,75	-5,0	–
	Л80	4	0,26	-4,3	–
H ₂ O+БТА 0,1	Ст. 20	1	1,82	-1,26	–
	МО	20	0,05	3,00	66,7
	Л80	22	0,016	3,75	73,3
H ₂ O+БТА 0,5	Ст. 20	1	0,86	1,69	40,7
	МО	Нет поражений	0,0	–	100,0
	Л80	То же	0,0	–	100,0
H ₂ O+БТА 0,75	Ст. 20	4	0,68	2,1	53,1
	МО	Нет поражений	0,0	–	100,0
	Л80	То же	0,0	–	100,0
H ₂ O+уротропии 10	Ст. 20	5	1,10	1,3	24,1
	МО	2	0,22	-1,5	–
	Л80	2	0,08	-1,3	–
H ₂ O+уротропии 20	Ст. 20	6	1,05	1,4	27,6
	МО	2	0,18	-1,2	–
	Л80	2	0,07	-1,2	–
H ₂ O+ NaNO ₂ 20+уротропии 20	Ст. 20	Нет поражений	0,0	–	100,0
	МО	6	0,24	-1,6	–
	Л80	12	0,09	-1,5	–

Состав коррозионной среды, г/л	Материал образца	Время до появления первых очагов коррозии, ч	Скорость коррозии k , г/(м ² ·сут)	Коэффициент торможения γ	Степень защиты z , %
H ₂ O+ NaNO ₂ 1+уротропии 1	Ст. 20	16	0,014	103,6	99,0
	МО	10	0,23	-1,5	–
	Л80	12	0,08	-1,3	–
H ₂ O+ NaNO ₂ 1+уротропии 1+ +БТА 0,5	Ст. 20	18	0,013	111,5	99,1
	МО	Нет поражений	0,0	–	100,0
	Л80	То же	0,0	–	100,0
H ₂ O+ NaNO ₂ 20+БТА 0,5	Ст. 20	Нет поражений	0,0	–	100,0
	МО	5	0,25	-1,7	–
	Л80	5	0,08	-1,3	–
H ₂ O+ NaNO ₂ 5+уротропии 5+ +БТА 0,5	Ст. 20	96	0,005	290,0	99,66
	МО	Нет поражений	0,0	–	100,0
	Л80	То же	0,0	–	100,0
H ₂ O+ NaNO ₂ 20+уротропии 20+ +БТА 0,5	Ст. 20	Нет поражений	0,0	–	100,0
	МО	То же	0,0	–	100,0
	Л80	“ – ”	0,0	–	100,0
H ₂ O+ NaNO ₂ 10+уротропии 10+ +БТА 1,0	Ст. 20	То же	0,0	–	100,0
	МО	“ – ”	0,0	–	100,0
	Л80	“ – ”	0,0	–	100,0
H ₂ O+ NaNO ₂ 10+уротропии 10+ +БТА 0,75	Ст. 20	То же	0,0	–	100,0
	МО	“ – ”	0,0	–	100,0
	Л80	“ – ”	0,0	–	100,0

При коррозии стали содержание железа в воде с увеличением времени испытаний растет, при этом наблюдается медленное подщелачивание коррозионной среды. В первые часы испытаний образовывалась рыхлая бледно-зеленая пленка Fe(OH)₂, которая, медленно окисляясь на границе контакта с водой, переходила в красно-коричневую или бурую Fe(OH)₃, временами отслаивающуюся и падающую на дно. Под ними формировалась более плотная пленка с лучшей адгезией к поверхности металла, покрывавшая уже всю корродирующую поверхность металла при большой выдержке образцов в коррозионной среде. В ее составе отмечены – FeOOH, γ -FeOOH, γ -Fe₂O₃ и γ -Fe₂O₃·H₂O.

При коррозии в воде на меди наблюдались двухслойные продукты коррозии. Непосредственно на металле образовывалась практически не растворимая в воде закись Cu₂O. Внешний слой в основном состоял из синей гидроокиси Cu(OH)₂, однако были зафиксированы слабые рефлекссы от окиси меди CuO. На латуни формировались тоже два слоя. Внутренний содержал только закись меди, оксида цинка не было, а во внешнем кроме Cu(OH)₂ отмечены рефлекссы Zn(OH)₂. Хлориды и сульфаты меди (несмотря на высокое содержание ионов Cl⁻ и SO₄²⁻ в воде) не найдены. Если они и образовывались на поверхности металла, то легко растворялись в воде.

Известный ингибитор [4], содержащий 200 г/л NaNO₂, обеспечивает стопроцентную защиту котловой стали, однако скорость коррозии меди и латуни при этом по сравнению с коррозией в воде увеличивается более чем в шесть раз, а первые очаги поражений появляются на меди через полчаса, на латуни – через час. Однако раствор плох и тем, что котел перед пуском в эксплуатацию надо тщательно промыть от остатков NaNO₂ [2].

Другой известный ингибитор [5], содержащий (г/л) NaNO₂ 200, сульфатцеллюлозного щелоча 100 и малярного клея 30, обеспечивает полную защиту стали в воде, создавая довольно плотную защитную пленку с улучшенной адгезией к поверхности металла. Однако для меди и латуни он является стимулятором коррозии, ускоряя ее более чем в восемь раз по сравнению с водой. Первые очаги поражений на них появляются через час после испытаний. Кроме того, после завершения консервации этим составом необычайно сложно вывести с обрабатываемой поверхности химикаты, чтобы их наличие впоследствии не оказало вредного влияния на состояние агрегата в процессе эксплуатации.

Гидразин в концентрации 1 г/л [2] в 9,7 раза уменьшает коррозию стали (при $Z = 89,7\%$). Однако медь и латунь корродируют в этой среде со скоростью, несколько превышающей скорость их коррозии в воде. Первые очаги поражения появляются через два часа. Из-за токсичности гидразина работать с этим раствором надо очень осторожно.

Нитрит натрия даже при на 1–2 порядка меньших концентрациях, чем в [4, 5], защищает сталь от коррозии, уменьшая коррозионные потери в 72,5 раза ($Z = 98,6\%$) при содержании NaNO_2 , равном 1 г/л, и обеспечивая полную защиту при 20 г/л (табл. 2). В этом случае методикой со скользящей геометрией падения рентгеновского луча в поверхностном слое стали была обнаружена тонкая пассивирующая пленка, состоящая из $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, появление которой на анодных участках, вероятно, обусловлено окислительной способностью иона NO_2^- [2]:



Вероятно, снижение скорости коррозии стали связано и с замедлением реакции ионизации железа благодаря адсорбции ионов NO_2^- на поверхности металла [2, 12].

Таблица 2. Влияние среды на коррозию стали 20 (продолжительность испытаний 240 ч)

Состав коррозионной среды, г/л	Площадь коррозионных поражений, %	Время до появления первых очагов коррозии, ч	Скорость коррозии k , г/(м ² ·сут)	Коэффициент торможения γ	Степень защиты z , %	
H_2O	100	0,25	1,45	–	–	
$\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_2$	1	2,5	4	0,02	72,5	98,6
	2	2,0	15	0,014	103,6	99,03
	5	0,7	24	0,011	131,8	99,24
	10	0,4	48	0,01	145,0	99,31
	20	0,0	Нет поражений	0,0	–	100,0
$\text{H}_2\text{O} + \text{уротропии}$	1	95,0	1	1,4	1,04	3,44
	2	87,0	1,5	1,3	1,12	10,3
	5	50,0	3	1,19	1,22	17,9
	10	38,0	5	1,1	1,32	24,14
	20	28,0	6	1,05	1,40	27,6
$\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_2 0,5 + \text{уротропии} 0,5$	2,0	7	0,03	48,30	97,93	
	1 1,0	0,2	16	0,014	103,6	99,03
	2 2,0	0,16	42	0,01	145,0	99,31
	5 5,0	0,08	56	0,008	181,25	99,45
	10 10	0,02	96	0,006	241,7	99,59
	20 20	0,0	Нет поражений	0,0	–	100,0
$\text{NaNO}_2 + \text{БТА} 0,01$	100,0	1	2,21	-1,50	–	
	0,05	100,0	1	1,86	-1,30	–
	0,10	98,0	1	1,72	-1,19	–
	0,20	87,0	1	1,60	-1,10	–
	0,40	64,0	1	0,99	1,46	31,7
	0,50	43,0	1	0,86	1,69	40,7
	0,75	25,0	1	0,68	2,10	53,1
	1,00	21,0	1	0,46	3,15	68,3
$\text{NaNO}_2 + \text{NaNO}_2 2 + \text{БТА} 0,1 + \text{уротропии} 1$	10,0	42	0,08	18,13	98,48	
	5 0,25 5	0,0	Нет поражений	0,0	–	100,0
	10 0,25 2	0,0	То же	0,0	–	100,0
	1 0,5 1	0,0	“ – ”	0,0	–	100,0

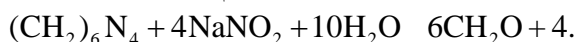
Следует отметить, что из-за наличия в кишиневском водопроводе значительного количества агрессивных Cl^- и SO_4^{2-} -ионов концентрация нитрита, необходимая для подавления коррозии, существенно выше, чем для дистиллированной воды ($1,38 \cdot 10^{-2}$ г/л [2]).

Однако для меди и латуни нитрит натрия даже при этих невысоких концентрациях является стимулятором коррозии и увеличивает скорость процесса в три–пять раз (табл. 1).

Уротропин, будучи поверхностно-активным веществом, в нейтральных средах значительно улучшает смачиваемость металлической поверхности, способствуя тем самым получению ровной однородной поверхности металла, что несколько повышает коррозионную стойкость последней. К тому же уротропин, выборочно адсорбируясь на металлической поверхности [2], способствует зале-

чиванию дефектов оксидной пленки, способствуя более полной пассивации. Хотя это влияние не слишком велико. Так, при концентрации уротропина в 20 г/л скорость коррозии стали уменьшается в 1,4 раза при степени защиты $Z = 27,6\%$ (табл. 2). Первые очаги поражений появляются через час испытаний. Для меди и латуни влияние уротропина негативное. Он является стимулятором коррозии, ускоряя ее в 1,2–1,4 раза (табл. 1).

Однако видно, что совместное влияние нитрита натрия и уротропина на коррозию стали в воде более существенно, чем действие каждого компонента в отдельности. В нейтральной среде, какой является вода, добавление уротропина к нитриту натрия приводит к усилению пассивирующего действия последнего за счет синергетического взаимодействия его с уротропином [2, 12, 13]. В результате появляются обладающий противокоррозионными свойствами аммиак и окислитель – азотистая кислота, способствующие большей пассивации стали:



Из данных табл. 2 видно, что даже при малых концентрациях компонентов в смеси (например, по 0,5 г/л каждого) скорость коррозии уменьшается более чем в 48 раз при степени защиты Z почти 98%. С дальнейшим повышением концентрации компонентов коррозионные потери уменьшаются еще больше, а при их концентрациях по 20 г/л каждого коррозия стали полностью прекращается. Однако эта же смесь компонентов для меди и латуни является стимулятором коррозии, увеличивая ее скорость в 1,3–1,5 раза, что значительно меньше, чем в растворе NaNO_2 (табл. 1).

Бензотриазол подавляет коррозию меди и латуни в воде. Так, уже при его концентрации 0,1 г/л коррозионные потери меди снижаются в три раза (при $Z = 66,7\%$), а латуни – в 3,75 раза (при $Z = 73,3\%$) (табл. 1). При концентрации БТА, равной 0,5 г/л, коррозия этих металлов прекращается полностью. Литературные данные по влиянию БТА на коррозию меди противоречивы. Так, в [11] утверждается, что БТА является замедлителем, при концентрации 1% не полностью останавливающим процесс коррозии. Коэффициент торможения γ при этом равен 16, а степень защиты $\gamma - Z = 97,3\%$. Но те же авторы в работе [14] утверждают, что уже концентрация БТА 0,001% является достаточной для полной защиты меди в воде.

Пленка, образованная на меди и латуни, чрезвычайно тонка и не удаляется ни водой, ни органическими растворителями. Механизм защитного действия бензотриазола связывают в первую очередь с усовершенствованием естественной оксидной пленки толщиной 50 Å, находящейся на поверхности меди, за счет образования в ее дефектах труднорастворимых комплексных соединений БТА с одно- и двухвалентной медью [2, 12]. Для образования устойчивой связи меди с БТА большую роль играет как подвижный водород, так и атом азота. С первым медь связывается за счет ковалентной связи, со вторым – координационной связью, образующейся вследствие спаривания электронов атома азота.

Для стали БТА до концентрации, равной 0,2 г/л, является стимулятором коррозии, увеличивая ее скорость в 1,2–1,8 раза (табл. 2). На корродирующей поверхности образуется большое количество видимых фазовых соединений, покрывающих поверхность металла равномерным слоем. Продукты коррозии не имеют прочной связи с поверхностью металла и легко смываются водой. Поверхность стали под ними равномерно потемневшая, язвенная коррозия отсутствует.

Однако концентрация 0,4 г/л БТА благоприятно действует на сталь, подавляя коррозионный процесс. Так, по нашим данным, при концентрации 1,0 г/л скорость коррозии стали уменьшается в 3,15 раза при степени защиты $Z = 68,3\%$, хотя есть сведения [6], что при этой концентрации БТА достигается эффективная защита стали в контакте с медью.

Если композиция содержит сразу три компонента, то даже при малых концентрациях обеспечивается существенная одновременная защита стали, меди и латуни (табл. 1). При определенных соотношениях компонентов коррозия этих металлов подавляется полностью. Синергетический эффект взаимодействия, возможно, вызван следующим. Наличие серы, азота, кислорода со свободными электронными парами у бензотриазола приводит к образованию на защищаемых поверхностях разнородных металлов нерастворимой хемосорбционной пленки [11]. Присутствие в смеси поверхностно-активного вещества уротропина, его взаимодействие с БТА и NaNO_2 способствует росту толщины и защитной способности хемосорбционной пленки, предохраняя металлы от разрушения.

Таким образом показано, что использование каждого из компонентов в отдельности не решает окончательно вопрос одновременной полной защиты разнородных металлических поверхностей и только ингибирующая композиция, состоящая г/л: NaNO_2 – 1–20, уротропин – 1–20, бензотриазол – 0,5–1,0, вода – остальное [15] – защищает внутреннюю поверхность паровых котлов во время консервации.

Нижние пределы концентраций компонентов выбраны из расчета снижения коррозионных поражений на уровне аналогов, а верхние – из стабильности противокоррозионной защиты, когда увеличение концентрации компонентов уже не влияет на характер процессов, происходящих на защищаемой поверхности металлов.

Эта композиция выгодно отличается от ранее применяемой гидразинно-аммиачной, которая, во-первых, не является универсальной, так как не защищает одновременно медь и сталь, что приводит к разрушению латунных и медных поверхностей в конденсаторах и бойлерах, во-вторых, не обеспечивает стопроцентной защиты даже самой стали от коррозии. Кроме того, проведение гидразинно-аммиачного способа консервации требует больших энергетических затрат за счет существенного разогрева смеси и обеспечивает гарантийный срок защиты от коррозии на один месяц. Останов котла на более длительный срок приводит к необходимости повторной консервации. Предлагаемая композиция значительно надежней и удобней тех, в которых используются высокие концентрации нитрита натрия. Она позволяет на порядок снизить концентрацию экологически опасного нитрита натрия и одновременно обеспечить полную защиту в котлах во время останова таких различных металлов, как сталь, с одной стороны, и медь и латунь – с другой. Разработанная композиция позволяет облегчить дальнейшую эксплуатацию паровых котлов, поскольку не требует проведения дополнительной промывки после слива консервирующего раствора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухотин А.М., Богачев А.Ф., Пальмский В.Г. и др. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Коррозия под действием теплоносителей, хладагентов и рабочих тел. Л., 1988.
2. Розенфельд И.Л. Ингибиторы коррозии. М., 1977.
3. Брегман Дж. Ингибиторы коррозии. М.-Л., 1966.
4. Ингибиторы // Химическая энциклопедия. М., 1963. Т. 2. С. 228–234.
5. А.с. СССР. №245516. Кл.С23 F 11/06. Бюл. изобр. № 19. 1969.
6. Алцыбеева А.И., Левин С.З. Ингибиторы коррозии металлов. Л., 1968.
7. Робинсон Дж.С. Ингибиторы коррозии. М., 1983.
8. Герасимов В.В. Коррозия сталей в нейтральных водных средах. М., 1981.
9. Паршутин В.В., Шолтоян Н.С. Коррозия стали в модельных средах, природных и технологических водах // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 32 – 52.
10. Гексаметилтетрамин // Химическая энциклопедия. Т. 1. М., 1988. С. 507.
11. Незиимова Т.Г., Добровольская В.П., Баранник В.П. Исследование защитного действия бензолтриазола в нейтральных и кислых средах // Укр. хим. журнал. 1965. Т. 31. № 12. С. 1337–1342.
12. Розенфельд И.Л., Персианцева В.П. Ингибиторы атмосферной коррозии. М., 1985.
13. Singh D.D.N., Banerjee M.K. Vapour phase corrosion inhibitors – a revive // Anti – Corros. Meth. and Mater. 1984. V. 31. № 6. P. 4–8, 22.
14. Незиимова Т.Г., Добровольская В.П., Баранник В.П. Исследование защитного действия бензотриазола в нейтральных и кислых растворах // Журнал прикладной химии. 1965. Т. 38. № 10. С. 2388–2390.
15. Патент Молдовы № 1690 от 15.06.1998 г. Кл. С23 F 11/00.

Поступила 16.04.04

Summary

The new composition of inhibitors for effective protection black and color metals from corrosion by rust-preventive treatment of steam boilers was proposed. The inhibiting composition was prepared by addition of urotropinum and benzotriazol in the solution of sodium nitrite. Inhibiting by means of this composition is preferable to drastic refining of boilers and has made it possible to decrease expenses in its fether exploitation and to improve condition of work also. As the result 100% inhibition of protection steel, copper and brass from corrosion simultaneously is supported.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА СВОЙСТВА КРАХМАЛЬНОЙ ШЛИХТЫ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Введение

Качество ошлихтованной пряжи зависит от многочисленных факторов, среди которых можно отметить тип и качество клеящих материалов, рецепт шлихты, методику ее приготовления, характеристики шлихты и др. [1; 2]. Хотя все более расширяется область использования синтетических клеящих материалов, для хлопкобумажной пряжи и близких к ней материалов главными остаются натуральный и модифицированный крахмал или смесь клеящих материалов. На характеристики шлихты, изготовленной из указанных типов клеящих материалов, большое влияние оказывает технологический метод ее приготовления. Качество шлихты, изготовленной из натурального крахмала, в большой степени зависит от используемого метода расщепления.

Среди нетрадиционных методов упоминается и технология расщепления крахмала под воздействием ультразвука, которая обеспечивает быстрое уменьшение макромолекулярных натуральных связей, без использования химических реагентов расщепления [2]. В этой работе излагаются полученные результаты по воздействию ультразвуковой кавитации на процесс приготовления крахмальной шлихты.

Экспериментальные условия

Главными технологическими параметрами при обработке шлихты с расщеплением крахмала ультразвуковой кавитацией являются: амплитуда ультразвуковых колебаний; температура шлихты; средняя скорость расщепления; время обработки шлихты ультразвуковой кавитацией.

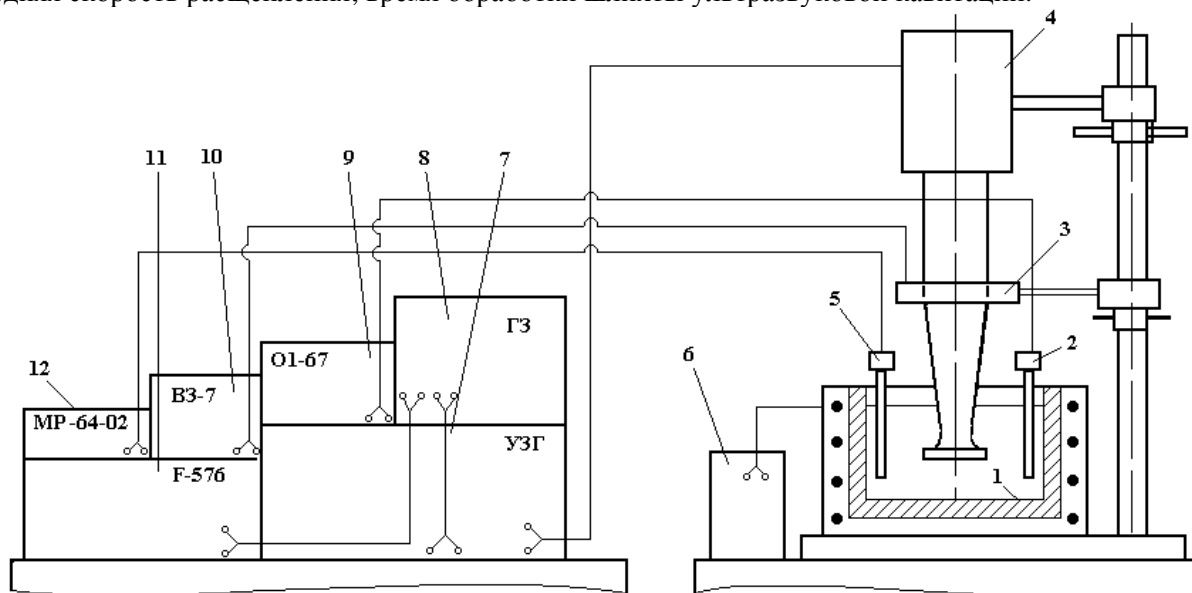


Рис. 1. Схема установки для расщепления крахмала ультразвуковой кавитацией.

1 – ванна для приготовления крахмальной шлихты; 2 – датчик-индикатор кавитации; 3 – датчик для измерения амплитуд колебаний; 4 – преобразователь пьезокерамический; 5 – датчик для измерения температуры; 6 – стабилизатор напряжения; 7–8 – генераторы ультразвука; 9 – осциллограф; 10 – вольтметр; 11 – частотомер; 12 – реле температуры

Полученная шлихта характеризуется: концентрацией C , %; вязкостью η , с; приклеем пряжи шлихтой $P_{ш}$, %.

На лабораторной установке (рис. 1) готовилась крахмальная шлихта в следующих вариантах: концентрация C , %: 4–5; амплитуда ультразвуковых волн ξ , мкм: 3; 6; 9; 12; 15; температура приготовления шлихты $T^{\circ}\text{C}$: 70; 75; 80; 85.

Метод обработки шлихты включает в себя нагрев воды до 25–30 $^{\circ}\text{C}$, загрузку крахмала и гомогенизацию полученной дисперсии ультразвуковой кавитацией до достижения программированной температуры и относительно постоянной минимальной вязкости. Вязкость определялась временем истечения одного литра шлихты через отверстие диаметром 5 мм, а доля расщепленного крахмала и соответственно средняя скорость расщепления – расчетом в процентном отношении крахмала, растворенного в дистиллированной воде.

При выполнении необходимых расчетов для установления уравнения регрессии коэффициента и критерии подтверждения математической модели использовалась специализированная программа Текспро [3].

Результаты и их технологическая интерпретация

Проведенными исследованиями преследовалось определение изменения постоянной средней вязкости и времени обработки ультразвуковой кавитацией соответственно средней скорости расщепления и изменения приклея пряжи с шлихтой в зависимости от амплитуды колебания для различных концентраций и температур шлихты (табл. 1–4).

Таблица 1. Минимальная вязкость шлихты t_c в (с) в зависимости от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ для различных концентраций C и температур T

Амплитуда ξ , мкм	Время истечения 1000 см ³ шлихты t_c , с											
	$C = 4\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 5\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 6\%; T, ^{\circ}\text{C}$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	31	30	28	27	31	30	28	27	32	31	29	28
6	29	27	26	24	30	29	26	25	31	29	28	27
9	28	26	25	24	29	27	25	24	29	29	28	26
12	28	26	25	24	29	28	25	24	30	29	28	26
15	29	26	25	24	30	27	25	24	30	29	28	26

Таблица 2. Время обработки ультразвуковой кавитацией $t_{узк}$ для понижения вязкости до постоянно-го значения в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Амплитуда ξ , мкм	Время обработки $t_{узк}$, мин											
	$C = 4\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 5\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 6\%; T, ^{\circ}\text{C}$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	20	22	17	16	19	19	18	17	20	21	20	18
6	13	18	12	11	16	14	12	12	16	16	14	12
9	12	10	10	8	12	11	10	9	15	15	12	10
12	10	10	9	8	11	10	9	8	14	14	12	10
15	9	9	9	8	11	10	9	8	14	14	11	9

Таблица 3. Средняя скорость расщепления крахмала V_p в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Амплитуда ξ , мкм	Скорость расщепления V_p , %/мин											
	$C = 4\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 5\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 6\%; T, ^{\circ}\text{C}$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	3	3	5	5	4	4	4	5	3	4	4	4
6	6	5	7	8	5	5	7	7	4	5	6	7
9	7	8	9	12	6	7	9	10	5	6	7	9
12	9	9	9	12	8	8	10	12	5	6	8	9
15	10	10	10	12	7	8	10	12	5	6	8	11

Таблица 4. Приклей пряжи $P_{ш}$ в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Амплитуда ξ , мкм	Приклей $P_{ш}$, %											
	$C = 4\%; T, ^\circ C$				$C = 5\%; T, ^\circ C$				$C = 6\%; T, ^\circ C$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	6
6	5	5	4	4	6	5	5	5	7	6	6	6
9	5	5	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6
12	5	5	4	4	5	5	5	5	6	6	5	5
15	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6

В результате математической обработки результатов получены уравнения технологических параметров (табл. 5–8), графически представленные на рис. 2–5. Из анализа данных таблиц, уравнений и графиков вырисовываются некоторые технологические выводы, касающиеся влияния параметров расщепления на свойства и характеристики шлихты. Известно, что уменьшение вязкости шлихты – это отражение эффекта расщепления крахмала, а стабилизация вязкости свидетельствует о прекращении процесса расщепления крахмала. Минимальная вязкость, относительно стабильная, достигнутая шлихтой, полученной из расщепленного крахмала под воздействием ультразвуковой кавитации, изменяется в зависимости от концентрации, температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний.

Таблица 5. Уравнения времен истечения шлихты t_u (минимальная вязкость) в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ C$	Уравнение времени t_u , сек, в функции от ξ , мкм
4	70	$t_u = (0,035 - 0,025/\xi^2)^{-1}$ $C r^2 = 0,894$
	75	$t_u = 26,054 + 36,475/\xi^2$ $C r^2 = 0,987$
	80	$t_u = (0,039 - 0,046/\xi^2)^{-1}$ $C r^2 = 0,986$
	85	$t_u = (4,878 + 3,381/\xi^2)^2$ $C r^2 = 0,994$
5	70	$t_u = (874,93 + 1138,52/\xi^2)^{0,5}$ $C r^2 = 0,726$
	75	$t_u = (748,848 + 1052,238/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,931$
	80	$t_u = 23,87 + 14,26/\xi$ $C r^2 = 0,969$
	85	$t_u = (570,95 + 827,74/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,985$
6	70	$t_u = 30,119 + 19,695/\xi^2$ $C r^2 = 0,72$
	75	$t_u = (850,579 + 1052,872/\xi^2)^{0,5}$ $C r^2 = 0,918$
	80	$t_u = (0,036 - 0,006/\xi)^{-1}$ $C r^2 = 0,976$
	85	$t_u = (674,84 + 350,59/\xi)^{0,5}$ $C r^2 = 0,929$

Таблица 6. Уравнения времени обработки ультразвуковой кавитацией $t_{узк}$ для достижения минимальной постоянной вязкости в функции от амплитуды ξ для различных концентраций и температур

Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ C$	Уравнение времени обработки ультразвуковой кавитацией $t_{узк}$, мин в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ , мкм
4	70	$t_p = 6,753 + 39,725/\xi$; $C r^2 = 0,987$
	75	$t_p = 107,664 - 77,047/\xi^{0,095}$ $C r^2 = 0,969$
	80	$t_p = (56,398 + 1217,198/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,997$
	85	$t_p = (35,815 + 1136,987/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,977$
5	70	$t_p = (0,0175 + 0,0198/\xi^{0,5})^{-1}$ $C r^2 = 0,954$
	75	$t_p = (2,062 + 3,987/\xi^{0,5})^2$ $C r^2 = 0,988$
	80	$t_p = (2,643 + 4,807/\xi)^2$ $C r^2 = 0,997$
	85	$t_p = (1,643 + 4,308/\xi^{0,5})^2$ $C r^2 = 0,988$
6	70	$t_p = (3,54 + 2,79/\xi)^2$ $C r^2 = 0,996$
	75	$t_p = (0,077 + 0,09/\xi)^{-1}$ $C r^2 = 0,997$
	80	$t_p = 10,409 + 50,038/\xi^{1,5}$ $C r^2 = 0,994$
	85	$t_p = (0,152 - 0,167/\xi^{0,5})^{-1}$ $C r^2 = 0,994$

Таблица 7. Уравнения скорости расщепления крахмала V_p в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ для различных концентраций и температур

Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Уравнение скоростей расщепления, $V_p, \%/мин$
4	70	$V_p = (-54,179 + 39,482 \xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,984$
	75	$V_p = -6,316 + 6,66 \xi^{0,343}; \quad C r^2 = 0,938$
	80	$V_p = (-43,406 + 40,190 \xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,992$
	85	$V_p = (0,067 + 0,574/\xi^{1,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,923$
5	70	$V_p = (0,096 + 0,469/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,853$
	75	$V_p = (0,08 + 0,468/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,972$
	80	$V_p = (0,062 + 0,413/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,989$
	85	$V_p = (0,051 + 0,393/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,964$
6	70	$V_p = (0,175 + 0,75/\xi^2)^{-1}; \quad C r^2 = 0,921$
	75	$V_p = (0,147 + 0,541/\xi^{1,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,998$
	80	$V_p = (0,11 + 0,605/\xi^{1,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,99$
	85	$V_p = (4,239 - 3,632/\xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,985$

Таблица 8. Уравнения приклея пряжи шликтой $\Pi_{ш}$ (в %) в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ (в мкм)

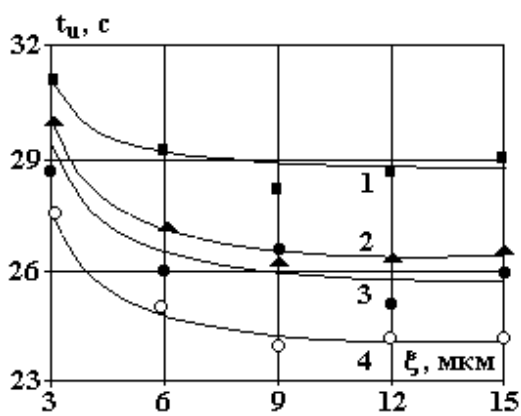
Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Уравнение приклея пряжи шликтой – $\Pi_{ш}, \%$
4	70	$\Pi_{ш} = (0,21 - 0,113/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,992$
	75	$\Pi_{ш} = 6,36 - 0,578 \xi^{0,376}; \quad C r^2 = 0,947$
	80	$\Pi_{ш} = 4,79 + 4,57/\xi^2; \quad C r^2 = 0,978$
	85	$\Pi_{ш} = (16,02 + 17,386/\xi^{0,5})^{0,5}; \quad C r^2 = 0,99$
5	70	$\Pi_{ш} = 6,97 - 0,675/\xi^{0,221}; \quad C r^2 = 0,845$
	75	$\Pi_{ш} = 12,975 - 5,8 \xi^{0,105}; \quad C r^2 = 0,988$
	80	$\Pi_{ш} = (20,494 + 31,758/\xi^{0,5})^{0,5}; \quad C r^2 = 0,953$
	85	$\Pi_{ш} = (1,956 + 1,036/\xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,962$
6	70	$\Pi_{ш} = (33,949 + 85,584/\xi)^{0,5}; \quad C r^2 = 0,991$
	75	$\Pi_{ш} = (0,1222 + 0,011/\xi^{0,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,827$
	80	$\Pi_{ш} = (20,936 + 50,315/\xi^{0,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,774$
	85	$\Pi_{ш} = 5,644 + 3,784/\xi; \quad C r^2 = 0,946$

Данные табл. 1, уравнения (табл. 5) и кривые рис. 2 изображают зависимость минимальной вязкости, которую возможно достигнуть в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных температур и концентраций. Изменение минимальной вязкости относительно постоянной величины, достигнутой при обработке ультразвуковой кавитацией, имеет следующие характеристики:

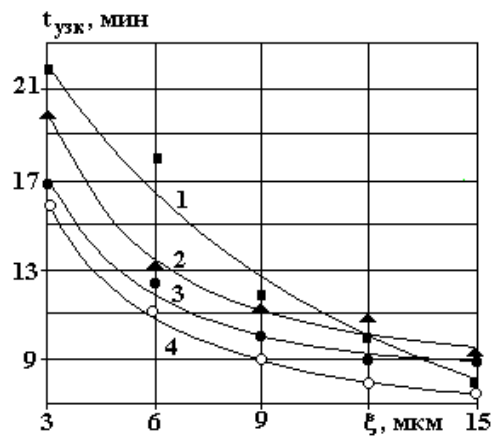
1. Уменьшается с повышением температуры для всех концентраций и амплитуд ультразвуковых колебаний. Например, при возрастании температуры от 70 до 85 $^\circ\text{C}$ вязкость снижается от 32,3 до 28,15 с, для $C = 6\%$ и $\xi = 3$ мкм и от 30,8 до 26,6 с для $C = 6\%$ и $\xi = 15$ мкм.

2. Возрастает с повышением концентрации шликты для всех температур и амплитуд ультразвуковых колебаний. Например, при возрастании концентрации шликты от 4 до 6% минимальная вязкость, которую возможно достигнуть, возрастает от 24,8 до 27,2 с при амплитуде колебаний $\xi = 6$ мкм и температуре 85 $^\circ\text{C}$.

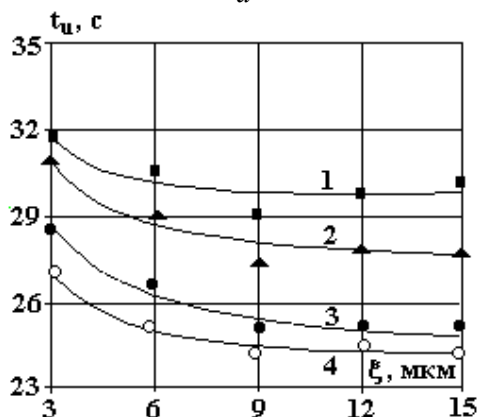
3. Уменьшается с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний при мало отличающихся минимальных значениях вязкости. Например, при возрастании амплитуды колебаний от 3 до 15 мкм достигнутая минимальная вязкость при ультразвуковой кавитационной обработке уменьшалась от 31 до 29 с, соответствующая концентрации $C = 4\%$ и температуре 70 $^\circ\text{C}$.



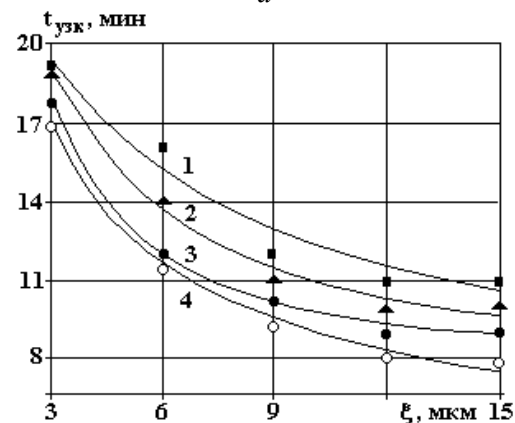
а



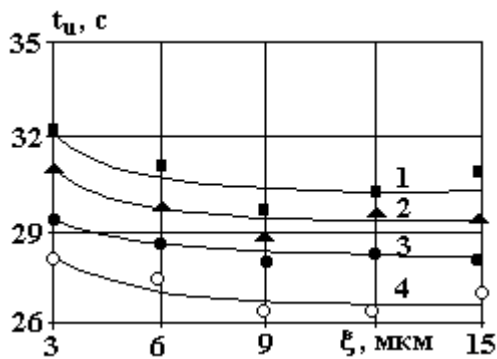
а



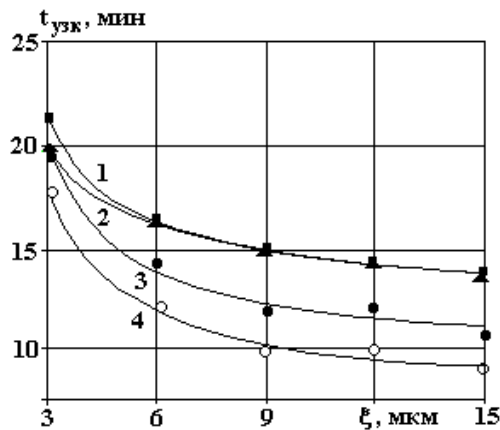
б



б



в



в

Рис. 2. Время истечения шликты (вязкость) в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний. а – $C = 4\%$; б – 5% ; в – 6% . $T, ^\circ\text{C}$: 1 – 70; 2 – 75; 3 – 80; 4 – 85

Рис. 3. Время ультразвуковой кавитационной обработки шликты для достижения постоянной минимальной вязкости. а – $C = 4\%$; б – 5% ; в – 6% . $T, ^\circ\text{C}$: 1 – 70; 2 – 75; 3 – 80; 4 – 85

Время обработки крахмального коллоида под воздействием ультразвука есть другой важный технологический параметр, в функции от которого можно установить необходимую продолжительность процесса расщепления и, следовательно, периода для получения крахмальной шликты. Уравнения из табл. 6 и графические зависимости (рис. 3) воспроизводят влияние амплитуды ультразвуковых колебаний, концентрации и температуры при обработке крахмального коллоида. Из табл. 2, уравнения (табл. 6) и кривых рис. 3 выделяются следующие возможные изменения времени обработки ультразвуковой кавитацией для уменьшения вязкости до минимально возможного технологического значения для конкретной концентрации и температуры шликты:

1. Уменьшается с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний при всех экспериментальных концентрациях и температурах. При концентрации 4% и температуре 70°C время обра-

ботки ультразвуковой кавитацией уменьшается от 20 до 9 мин, соответственно повышению амплитуды колебаний от 3 до 15 мкм.

2. Возрастает с увеличением концентрации при всех температурах и амплитудах колебаний. Например, продолжительность ультразвуковой кавитационной обработки увеличилась от 9 до 14 мин при повышении концентрации от 4 до 6%, температуре 70°C и амплитуде ультразвуковых колебаний 15 мкм.

3. Уменьшается с повышением температуры шлихты при всех концентрациях и амплитудах ультразвуковых колебаний. Например, время кавитационной обработки уменьшилось от 20 до 16 мин при повышении температуры крахмальной шлихты от 70 до 85°C и амплитуде колебаний 3 мкм.

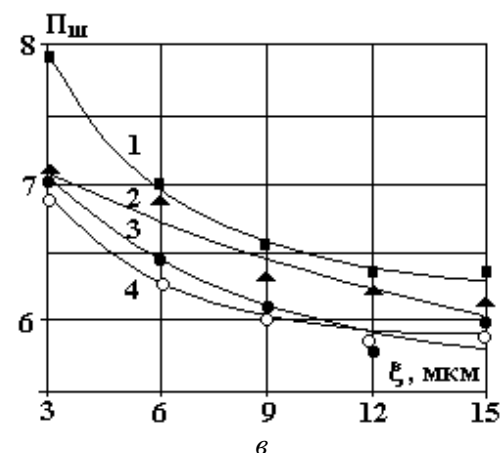
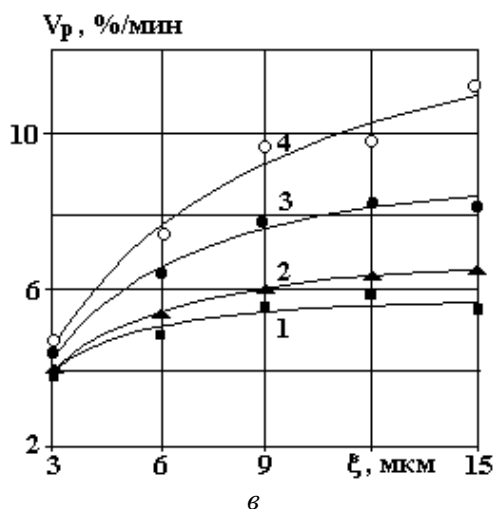
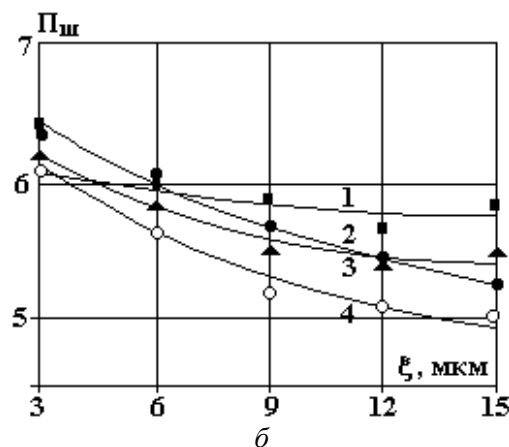
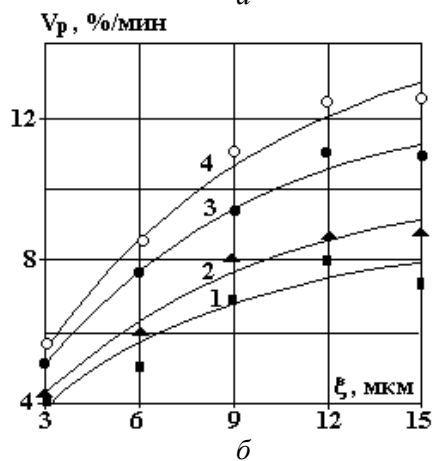
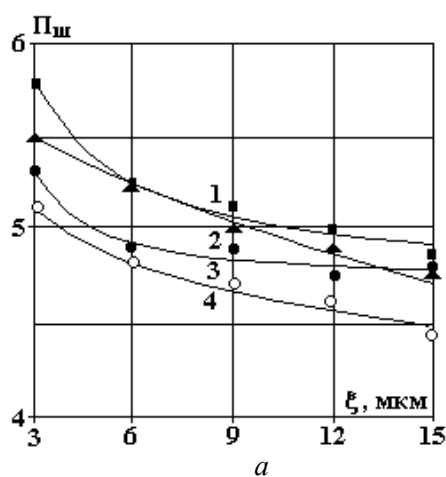
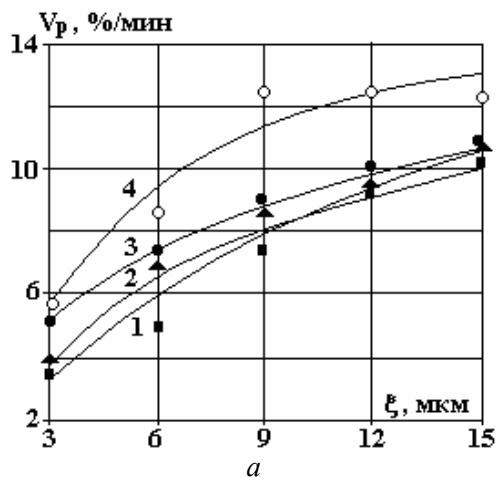


Рис. 4. Средняя скорость расщепления в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний. а - $C = 4\%$; б - 5% ; в - 6% . $T, ^{\circ}\text{C}$: 1 - 70; 2 - 75; 3 - 80; 4 - 85

Рис. 5. Приклей пряжи шлихтой в функции от амплитуды ультразвуковой колебаний. а - $C = 4\%$; б - 5% ; в - 6% . $T, ^{\circ}\text{C}$: 1 - 70; 2 - 75; 3 - 80; 4 - 85

Время расщепления под воздействием ультразвуковой кавитации и процент расщепленного крахмала дают возможность определить среднюю скорость расщепления крахмала, которая является другим важным параметром предлагаемой технологии. Средняя скорость расщепления, определяемая долей расщепленного крахмала в минуту, исследовалась в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур. Экспериментальные данные табл. 3, уравнения (табл. 7) и кривые, изображенные на рис. 4, показывают влияние амплитуды колебаний на скорость расщепления крахмала при различных концентрациях и температурах крахмальной шликты. Скорость расщепления крахмала характеризуется следующими изменениями:

1. Растет с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний для любой исследуемой концентрации и температуры. Например, средняя скорость расщепления растет от 3,75 до 10,22%/мин соответственно росту амплитуды ультразвуковых колебаний от 3 до 15 мкм при 4% концентрации и температуре 70⁰С.

2. Уменьшается с ростом концентрации крахмала в коллоидной крахмальной смеси независимо от температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний. Например, средняя скорость расщепления уменьшается от 10,22 до 5,33 %/мин соответственно росту концентрации от 4 до 6% при температуре крахмального коллоида 70⁰С и амплитуде ультразвуковых колебаний 15 мкм.

3. Растет с ростом температуры крахмального коллоида при всех концентрациях и амплитудах ультразвуковых колебаний. Например, средняя скорость расщепления крахмала растет с 3,75 до 5,56%/мин соответственно росту температуры от 70 до 85⁰С при 4% концентрации и амплитуде ультразвуковых колебаний 3 мкм.

Приклея пряхи шликтой существенно зависит от вязкости шликты и от степени расщепления крахмала. В этих условиях технологические параметры расщепления ультразвуковой кавитацией могут существенно повлиять и на приклея пряхи шликтой. Экспериментальные данные, касающиеся приклея пряхи шликтой в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний при различных концентрациях и температурах, а также уравнения кривых представлены в табл. 4, 8 и на рис. 5. Из этих результатов можно констатировать, что приклея пряхи шликтой имеет следующие зависимости:

1. Уменьшается с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний как следствие повышения степени расщепления и текучести шликты при всех исследованных концентрациях и температурах.

2. Уменьшается с ростом температуры как следствие роста текучести шликты.

3. Растет с повышением концентрации как следствие увеличения вязкости при неизменных условиях расщепления ультразвуковой кавитацией.

Заключение

В порядке обобщения результатов можно отметить:

1. Время ультразвуковой кавитационной обработки крахмальной шликты при уменьшении вязкости до минимальных относительно постоянных значений уменьшается с ростом амплитуды колебаний, температуры и растет с увеличением концентрации.

2. Постоянная минимальная вязкость шликты из расщепленного крахмала под воздействием ультразвуковой кавитации зависит как от концентрации и температуры шликты, так и от амплитуды ультразвуковых колебаний.

3. Средняя скорость расщепления крахмала под воздействием ультразвуковой кавитации растет с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний и температуры шликты и уменьшается с ростом концентрации.

4. Приклея пряхи шликтой из крахмала, расщепленного ультразвуковой кавитацией, уменьшается с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний и температурой расщепления и растет с увеличением концентрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Liuțe D.* Procese și mașini de prelucrat fire. Vol. II. Editura tehnica. București, 1992.

2. *Андреева Н.В.* Текстильное производство. М., 1988.

3. *Ciociu M.* Modelarea matematică a procesului de încleiere. Industria Ușoară, România, nr. 10, 1983.

Поступила 09.07.04

Summary

The results of investigations of the ultrasonic cavitation influence on the process of starch decomposition with the aim to obtain the gluing mass for textile yarn sizing are presented. It is found that the using of ultrasonic cavitation allows excluding the application of chemical reagents and the process becomes ecological friendly. The results can be used at the development of technological process of sizing preparation in the industrial conditions.

НАГРЕВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЛУЧОМ

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
Московский пр., 26, Санкт-Петербург, 190013, Россия*

Введение

СВЧ-нагрев позволяет по-новому решать проблемы термической обработки и сушки материалов, а в ряде случаев – реализовать на практике новые технологические процессы и операции. К ним относится СВЧ-термообработка, цель которой – уничтожение вредителей (грибков, жучков, термитов) в материалах строительных конструкций. Хотя принцип действия лучевых СВЧ-камер известен [1, 2], технология указанного назначения не разработана. Во-первых, к числу причин такого состояния вопроса следует отнести прежде всего ограниченность имеющихся сведений об электрофизических свойствах влажных строительных материалов в диапазоне СВЧ [2–5]. Во-вторых, материалы в строительных конструкциях (стены, перегородки, перекрытия, полы), как правило, являются неоднородными (двуслойными), что существенно усложняет теоретическое рассмотрение задачи об их СВЧ-нагреве. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию распределения температуры в толще однослойных и двуслойных влажных строительных материалов при одностороннем СВЧ-облучении.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой СВЧ-генератор (выходная мощность $P_0 = 750$ Вт, частота электромагнитного поля $f = 2,45$ ГГц) с рупорным излучателем (рупорной антенной), опущенным внутрь технологического устройства. Исследуемый образец размещается на приспособлении, конструкция которого позволяет изменять расстояние до излучателя. Образцы материалов во всех случаях по площади в 1,5–2 раза больше площади раскрытия рупора ($S_{\text{руп}} = 150 \times 150$ мм) и составляют для гипсовой штукатурки $230 \times 190 \times 30$ (46) мм, древесины (ель) – $330 \times 200 \times 220$ мм, кирпичной кладки (кирпич красный) – $250 \times 180 \times 120$ мм. Двуслойные структуры получали наложением соответствующих материалов друг на друга. Температуры в толще измерялись по окончании каждого эксперимента с помощью термопар, введившихся в заранее просверленные отверстия в центральном сечении образца. Температуры лицевой и обратной поверхностей образца измеряли дистанционно с помощью ИК-термометра модели М8866. Начальное влагосодержание образцов контролировали с помощью кондуктометрического (древесина) и диэлькометрического (кирпич) влагомеров, а также весовым методом. Результаты экспериментов приведены на рис. 2–7.

Обсуждение результатов

Гипсовая штукатурка даже в сухом состоянии (рис. 2) представляет собой непрозрачный для данной частоты материал и активно нагревается. Низковлажный материал закономерно прогревается до заданной глубины быстрее, чем сухой (рис. 3, кривые 2, 3). Однако за одно и то же время поверхность материала с влагосодержанием 4,5% (рис. 3, кривая 3) нагревается до более высокой температуры, чем поверхность материала с влагосодержанием 8% (рис. 3, кривая 4). По-видимому, это связано с влиянием начальной температуры T_n , к которой штукатурка (материал небольшой толщины) оказывается очень чувствительной при СВЧ-облучении.

Сравнительно более прозрачным материалом, чем штукатурка, является кирпичная кладка (рис. 4). Влияние малых влагосодержаний для кирпичной кладки оказалось несущественным в отношении скорости нагревания. Влияние же средних влагосодержаний проявляется более контрастно. Так, из сопоставления кривых 3 и 4 (рис. 4) следует, что СВЧ-нагрев кирпичной кладки с влагосодержанием 10% в глубине происходит интенсивнее, чем того же материала с влагосодержанием 17% (за одно и то же время на глубине $x = 40$ мм достигается большая температура). Это можно объяснить

превалирующим для данной области изменения влагосодержаний ростом теплоемкости кирпичной кладки и одновременно – коэффициента отражения при увеличении влагосодержания над тенденцией роста фактора диэлектрических потерь (коэффициента затухания). Аналогичная тенденция наблюдается и для древесины (рис. 5, кривые 1, 2).

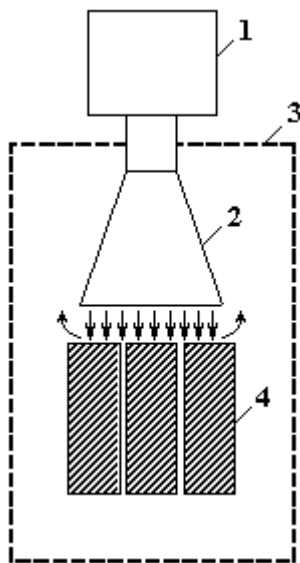


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – СВЧ-генератор, 2 – рупорная антенна, 3 – технологическое устройство, 4 – исследуемый материал

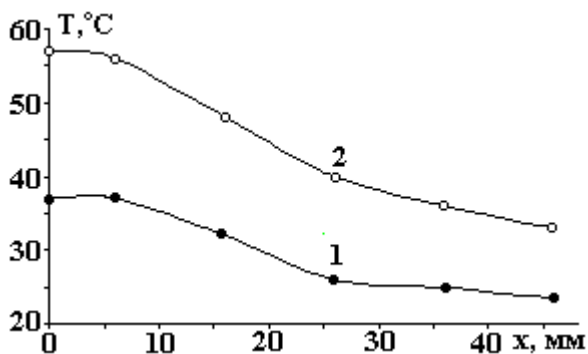


Рис. 2. СВЧ-нагрев гипсовой штукатурки (равновесно-сухая), $T_n = 20^\circ\text{C}$, $\tau, \text{с}$: 1 – 30; 2 – 60

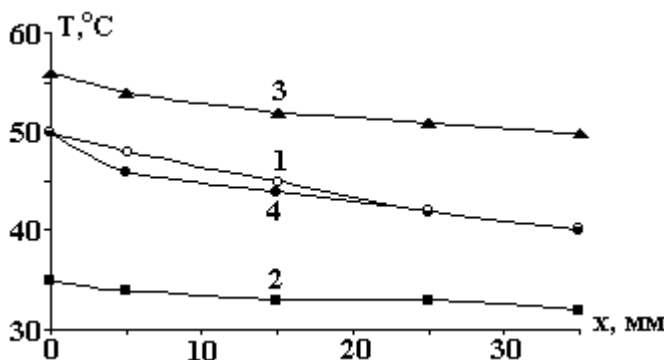


Рис. 3. СВЧ-нагрев гипсовой штукатурки: 1 – $W_n = 10,37\%$, $T_n = 17^\circ\text{C}$, $\tau = 60 \text{ с}$; 2 – $W_n = 0$, $T_n = 16^\circ\text{C}$, $\tau = 90 \text{ с}$; 3 – $W_n = 4,52\%$, $T_n = 23^\circ\text{C}$, $\tau = 90 \text{ с}$; 4 – $W_n = 8\%$, $T_n = 17^\circ\text{C}$, $\tau = 90 \text{ с}$

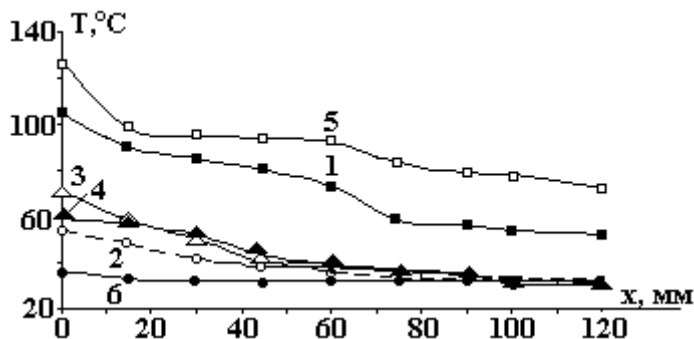


Рис. 4. СВЧ-нагрев кирпичной кладки: 1 – $W_n = 0,1\%$, $T_n = 20^\circ\text{C}$, $\tau = 300 \text{ с}$; 2 – $W_n = 7\%$, $T_n = 19^\circ\text{C}$, $\tau = 120 \text{ с}$; 3 – $W_n = 17\%$, $T_n = 19^\circ\text{C}$, $\tau = 120 \text{ с}$; 4 – $W_n = 10,1\%$, $T_n = 19^\circ\text{C}$, $\tau = 120 \text{ с}$; 5 – $W_n = 7\%$, $T_n = 19^\circ\text{C}$, $\tau = 480 \text{ с}$; 6 – $W_n = 1\%$, $T_n = 19^\circ\text{C}$, $\tau = 120 \text{ с}$

Отличие характера некоторых зависимостей от экспоненциального (согласно теории [5], электромагнитная волна в диэлектрике затухает по экспоненте), по всей вероятности, вызвано неодно-

родным распределением влагосодержания по толщине (кривые 1, 5 рис. 4; кривые 3, 6 рис. 5; кривая 2 рис. 6). В ряде случаев кривые распределения температуры имеют весьма сложный характер. Так, в древесине (кривая 5 на рис. 5) в поверхностных слоях идет сушка при температуре, близкой к 100°C . В более глубоких слоях происходит затухание электромагнитной волны и, как следствие, имеет место резко спадающая температурная характеристика. В противовес этому, при сравнительно низких температурах влияние сушки незначительно, и ход температурных кривых монотонно убывающий (кривые 1, 4 рис. 5; кривая 1 рис. 6; кривые 1, 2 рис. 7). В составной структуре штукатурка–древесина (рис. 6, кривая 3) происходит сквозной прогрев штукатурки с одновременной ее подсушкой. В точке перехода к древесине температура резко меняется, что обусловлено различием электрофизических (ЭФ) свойств влажной штукатурки и влажной древесины. То же наблюдается и для составной структуры штукатурка–кирпичная кладка (рис. 7), причем даже с течением времени (при большой экспозиции – кривая 4 рис. 7) различие ЭФ-свойств материала все продолжает сказываться.

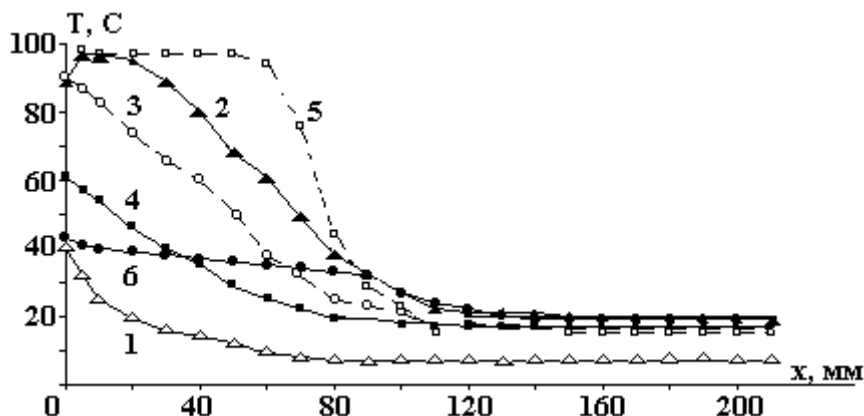


Рис. 5. СВЧ–нагрев древесины (ель): 1 – $W_n \geq 70\%$, $T_n, ^{\circ}\text{C}$: 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 7, 7... (по слоям), $\tau = 30$ с; 2 – $W_n = 25\%$, $T_n = 17^{\circ}\text{C}$, $\tau = 30$ с; 3 – $W_n \geq 70\%$, $T_n = 16^{\circ}\text{C}$, $\tau = 120$ с; 4 – $W_n = 20\%$, $T_n = 19^{\circ}\text{C}$, $\tau = 90$ с; 5 – $W_n = 25\%$, $T_n = 15^{\circ}\text{C}$, $\tau = 300$ с; 6 – $W_n = 8\%$, $T_n = 17^{\circ}\text{C}$, $\tau = 30$ с

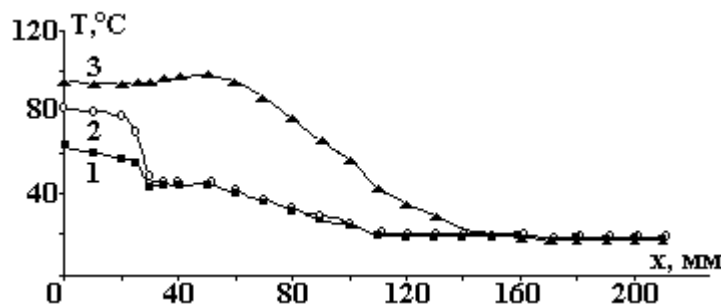


Рис. 6. СВЧ–нагрев составной структуры гипсовая штукатурка – дерево (ель): 1 – $W_{шт} = 15\%$, $W_{дер} = 25\text{--}40\%$ (по слоям), $T_n = 18^{\circ}\text{C}$, $\tau = 90$ с; 2 – $W_{шт} = 15\%$, $W_{дер} = 25\text{--}40\%$ (по слоям), $T_n = 18^{\circ}\text{C}$, $\tau = 120$ с; 3 – $W_{шт} = 15\%$, $W_{дер} = 25\text{--}40\%$ (по слоям), $T_n = 18^{\circ}\text{C}$, $\tau = 240$ с

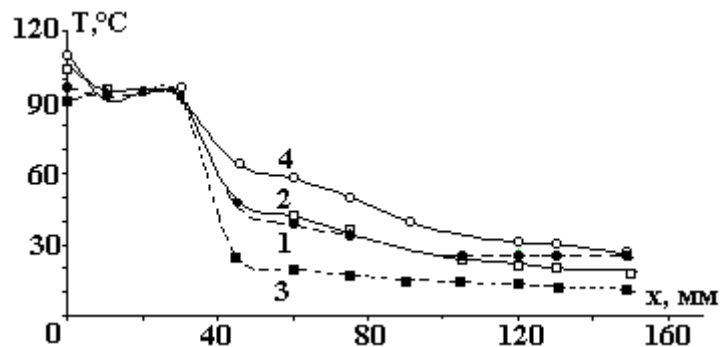


Рис. 7. СВЧ–нагрев составной структуры гипсовая штукатурка – кирпичная кладка: 1 – $W_{шт} = 5\%$, $W_{кир} = 4\%$, $T_n = 16^{\circ}\text{C}$, $\tau = 240$ с; 2 – $W_{шт} = 14\%$, $W_{кир} = 10,1\%$, $T_n = 10^{\circ}\text{C}$, $\tau = 180$ с; 3 – $W_{шт} = 15\%$, $W_{кир} = 10,1\%$, $T_n = 18^{\circ}\text{C}$ (штукатурка), $T_n = 14^{\circ}\text{C}$ (кирпич), $\tau = 90$ с, 4 – $W_{шт} = 15\%$, $W_{кир} = 10,1\%$, $T_n = 13^{\circ}\text{C}$, $\tau = 15$ мин

В целом картина температурного распределения с учетом влияния сушки соответствует известному в СВЧ-энергетике эффекту самовыравнивания влажностей [1, 6]. Наиболее влажные слои материала всегда нагреваются быстрее, но быстрее и сохнут. При длительном СВЧ-нагреве поверхностные слои высыхают и их дальнейший разогрев затрудняется (кривая 4 рис. 7). Вместе с тем глубинные слои по-прежнему продолжают интенсивно выделять СВЧ-энергию и поэтому разогреваются иногда в большей степени, чем поверхностные (кривая 5 рис. 4, кривая 3 рис. 6). Об эффекте самовыравнивания влажностей при СВЧ-энергоподводе косвенно свидетельствуют и данные рис. 4, 5. Так, кривая 4 рис. 5 (древесина $W_n = 20\%$) носит гладкий характер, поскольку данный эксперимент проводился после снятия кривых 1, 2, 5 (рис. 5), то есть на одном и том же образце. Иначе говоря, перед постановкой эксперимента № 4 (кривая 4 рис. 5) образец уже претерпел СВЧ-высушивание, и распределение его влагосодержания по толщине стало более однородным. Эффектом самовыравнивания влажностей объясняется и гладкий характер кривой 2 рис. 4 (кирпичная кладка, $W_n = 7\%$).

Результаты

В целом полученные результаты дают возможность задать временные режимы процесса СВЧ-термообработки строительных материалов, обеспечивающие уничтожение вредителей. Согласно [1, 7], для уничтожения домового гриба в толще древесины и кирпичной кладки требуется осуществить подъем температуры до 40°C и далее выдержать материал при этой температуре в течение 10 мин. Для уничтожения жучка-точильщика температура в толще древесины должна быть доведена до 65°C , а выдержка составлять 3–4 мин. Задавшись глубиной прогрева кирпичной кладки 30 мм при стандартной толщине слоя штукатурки (30 мм), из приведенных экспериментальных данных находим требуемое время СВЧ-термообработки структуры гипсовая штукатурка–кирпичная кладка, необходимое для уничтожения домового гриба: $\tau_{\text{нагр}} = 3\text{--}4$ мин при $T_n = 16\text{--}18^\circ\text{C}$, $W_{\text{шт}} = 5\text{--}15\%$, $W_{\text{кир}} = 4\text{--}10\%$. Время СВЧ-термообработки, необходимое для уничтожения жучка-точильщика в слое штукатурки и в толще древесины (на глубине вплоть до 60 мм), в структуре гипсовая штукатурка – древесина составит (при толщине штукатурки 30 мм): $\tau_{\text{нагр}} = 4$ мин при $T_n = 18^\circ\text{C}$, $W_{\text{шт}} = 15\%$, $W_{\text{дер}} = 25\text{--}40\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса. Т. 2. М., 1971.
2. *Архангельский Ю.С.* СВЧ-электроотермия. Саратов, 1998.
3. *Tinga W.R., Nilson S.O.* Dielectric properties of materials for Microwave procesing – tabulated // J. of Microwave Power. 1973. V. 8. № 1. P. 27–33.
4. *Hasted J.B., Shan M.A.* Microwave absorption by water in building materials // Brit. J. Appl. Phys., 1964. № 5. P. 825–836.
5. *Дуденко А.Н., Зверев Б.В.* СВЧ-энергетика. М., 2000.
6. *Williams N.H.* Moisture leveling in paper, wood, textiles and other mixed dielectric sheets // J. of Microwave Power. 1966. V.1. P. 73–80.
7. *Bletchly J.D.* Very high frequency radio waves and wood boring insect control // *Holzforschung*, 1965. V.19. P. 47–52.

Поступила 20.05.04

Summary

In regard to boring insect neutralization process temperature distributions in moist building materials being heated with the help of microwave apparatus are investigated and discussed. The objects of investigation were as follows: gypsum plaster, wood, red brick and also their compositions: gypsum – wood, gypsum plaster – red brick. Under the results of experimental research work there're proposed the time regimes to microwave heating process as applied to domestic mushroom, and Anobiidae beetle neutralization.

ВЛИЯНИЕ ДЕГАЗАЦИИ НА КОНВЕКЦИЮ ЖИДКОСТИ В НИЗКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Башкирский государственный педагогический университет
ул. Октябрьской Революции, 3а, г. Уфа, 450000, Башкортостан, Россия*

В последние годы весьма интенсивно изучаются вопросы воздействия внешних электромагнитных, в том числе электрических и магнитных полей на такие явления, как тепло- и массоперенос, фильтрация и перемешивание, перекачка жидкостей, увлажнение, сушка и т.д., которые являются основными во многих технологических процессах. Представляет огромный практический интерес исследование особенностей конвекции жидкостей при взаимодействии их с низкочастотными электрическими полями в вертикальных трубах. Такие системы широко используются в различных устройствах, в частности, нефтегазодобывающих, нефтеперерабатывающих и химических производств.

Для изучения конвекции диэлектрической жидкости в вертикальном цилиндрическом сосуде, в котором создано низкочастотное (НЧ) электрическое поле (50 Гц), была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1), которая включает в себя мерный цилиндрический сосуд, подогреваемый электронагревателем. Напряжение подается от сети через регулировочный автотрансформатор, контролируемый вольтметром. Цилиндрический сосуд заполняется исследуемой жидкостью, температура которой измеряется термометром.

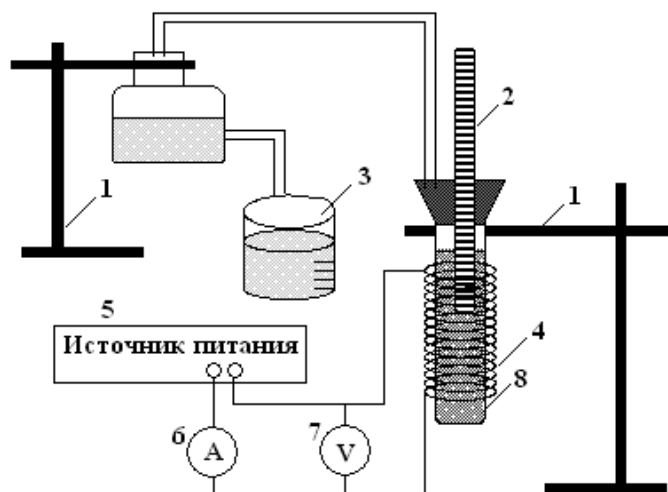


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования динамики подъема и дегазации жидкости в НЧ электромагнитном поле: 1 – штатив; 2 – термометр; 3 – микрогазомер; 4 – спираль электронагревателя; 5 – регулировочный автотрансформатор; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – исследуемая жидкость

Методика исследований заключалась в регистрации подъема жидкостей в вертикальном цилиндрическом сосуде, в котором создано НЧ электрическое поле, и изучении динамики изменения температуры и количества выделившегося газа во времени.

В качестве исследуемых жидкостей использовались водопроводная вода, толуол, трансформаторное масло, глицерин, нефть Арланского, Усть-Балыкского (Башкирия), Западно-Сибирского и Нижневартовского месторождений. Измерялись температура нагрева ΔT , время воздействия НЧ поля t , уровень поднятия жидкости h , количество выделившегося газа Q .

Зависимости температуры нагрева от времени воздействия НЧ поля носят нелинейный характер (рис. 2), жидкости имели одну и те же температуру. Разность температур нагрева в

зависимости от количества выделившегося газа имеет разные значения (рис. 3). Самое большое количество газа выделилось из нефти Усть-Балыкского месторождения, а самое меньшее – из глицерина.

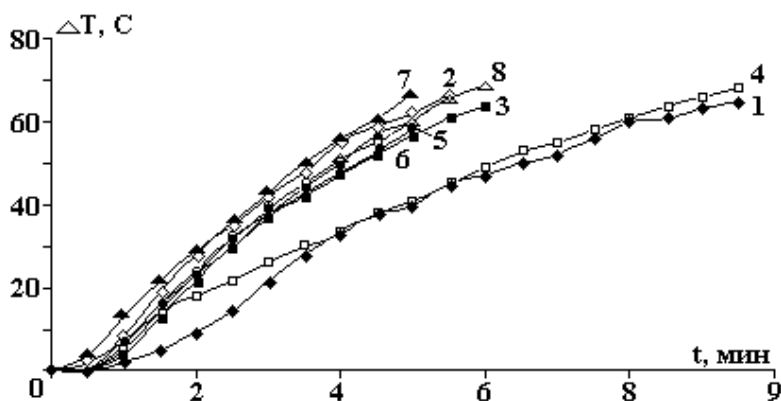


Рис. 2. Зависимость разности температуры нагрева от времени воздействия НЧ поля. 1 – вода; 2 – толуол; 3 – трансформаторное масло; 4 – глицерин; 5 – Арланская нефть; 6 – Западно-Сибирская нефть; 7 – Усть-Балыкская нефть; 8 – Нижневарттовская нефть

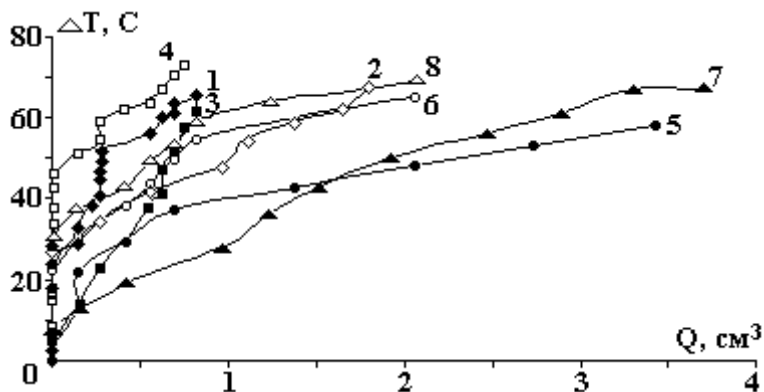


Рис. 3. Зависимость разности температур нагрева от количества выделившегося газа. 1 – вода; 2 – толуол; 3 – трансформаторное масло; 4 – глицерин; 5 – Арланская нефть; 6 – Западно-Сибирская нефть; 7 – Усть-Балыкская нефть; 8 – Нижневарттовская нефть

Исследования показали, что газовыделение начинается не сразу. Для нефти процесс дегазации происходит достаточно быстро. Для нефти Арланского месторождения, начиная с 3,5 мин влияния НЧ поля, процесс ускоряется при $\Delta T = 45^{\circ}\text{C}$, из нефти Усть-Балыкского месторождения при $\Delta T = 56^{\circ}\text{C}$ начиная с 4 мин, для нефти Западно-Сибирского месторождения при $\Delta T = 44^{\circ}\text{C}$ – также в районе 4 мин, для Нижневарттовского месторождения дегазация нефти ускоряется с 5 до 6 мин при разности температур $\Delta T = 54^{\circ}\text{C}$.

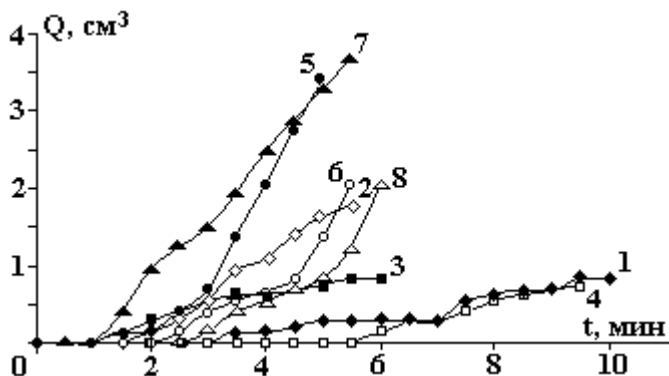


Рис. 4. Зависимость количества выделившегося газа от времени воздействия НЧ поля. 1 – вода; 2 – толуол; 3 – трансформаторное масло; 4 – глицерин; 5 – Арланская нефть; 6 – Западно-Сибирская нефть; 7 – Усть-Балыкская нефть; 8 – Нижневарттовская нефть

На рис. 4 показана зависимость количества выделившегося газа от времени воздействия поля. Самое большое количество газа выделилось из нефти Усть-Балыкского месторождения – $3,7 \text{ см}^3$, а самое меньшее у глицерина – $0,75 \text{ см}^3$. При продолжительном воздействии НЧ поля газ больше не выделяется. Зависимость высоты поднятия жидкости от количества выделившегося газа показана на

рис. 5. Газовыделение происходит из всех жидкостей, но дегазация проявляется при разных уровнях поднятия жидкостей.

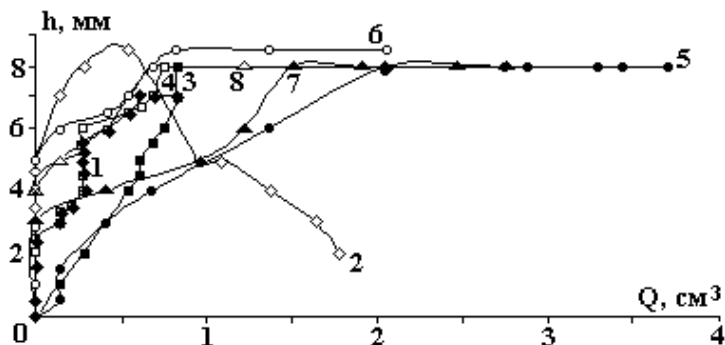


Рис. 5. Зависимость уровня высоты поднятия жидкости от количества выделившегося газа: 1 – вода; 2 – толуол; 3 – трансформаторное масло; 4 – глицерин; 5 – Арланская нефть; 6 – Западно-Сибирская нефть; 7 – Усть-Балыкская нефть; 8 – Нижневартовская нефть

Таким образом, экспериментально показано, что дегазация жидкостей существенно влияет на конвекцию в вертикальной трубе. В зависимости от температуры жидкости процесс проявляет себя по-разному, причем зависит от их физических и химических свойств.

Поступила 22.03.04

Summary

So, there have been examined the influence processes of degasation on liquid convection in low-frequency electromagnetic field. Besides, there has been established the connection of temperature change, level of liquid's growth, the amount of separated gas and there has been revealed their dependence on the time of influence of low-frequency electromagnetic field.

В.Н. Цуркин, А.В. Синчук, А.В. Иванов*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Импульсные концентрированные потоки акустической энергии, которые генерируются в жидком или кристаллизующемся металле, при электрогидроимпульсной обработке (ЭГИО) позволяют ощутимо изменять его структуру и свойства [1]. Этот вид внепечной обработки может успешно конкурировать с другими физическими методами активного воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, что обуславливается не только качеством обработанного литья, но и преимуществами ЭГИО по энергозатратам, простотой встраивания в существующий процесс разлива расплава, возможностью обрабатывать большие промышленные массы металла.

Дальнейшее развитие метода – в поиске оптимальных технологических режимов обработки, приводящих к стабильным требуемым показателям качества литой продукции. Но целенаправленное управление обработкой металла, оперативная перестройка схем воздействия, а также поддержание в течение длительного времени стабильных результатов обработки затруднены из-за существенной не-

* Эксперименты выполнены совместно с Ю.Г. Бойченко, Н.К. Гумененко; металлографические исследования – совместно с Н.А. Федченко.

рис. 5. Газовыделение происходит из всех жидкостей, но дегазация проявляется при разных уровнях поднятия жидкостей.

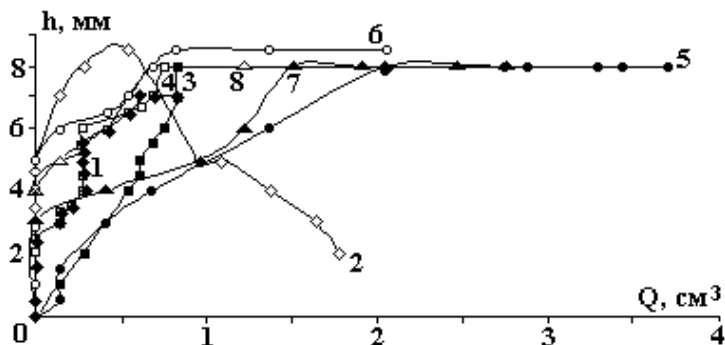


Рис. 5. Зависимость уровня высоты поднятия жидкости от количества выделившегося газа: 1 – вода; 2 – толуол; 3 – трансформаторное масло; 4 – глицерин; 5 – Арланская нефть; 6 – Западно-Сибирская нефть; 7 – Усть-Балыкская нефть; 8 – Нижневартовская нефть

Таким образом, экспериментально показано, что дегазация жидкостей существенно влияет на конвекцию в вертикальной трубе. В зависимости от температуры жидкости процесс проявляет себя по-разному, причем зависит от их физических и химических свойств.

Поступила 22.03.04

Summary

So, there have been examined the influence processes of degasation on liquid convection in low-frequency electromagnetic field. Besides, there has been established the connection of temperature change, level of liquid's growth, the amount of separated gas and there has been revealed their dependence on the time of influence of low-frequency electromagnetic field.

В.Н. Цуркин, А.В. Синчук, А.В. Иванов*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Импульсные концентрированные потоки акустической энергии, которые генерируются в жидком или кристаллизующемся металле, при электрогидроимпульсной обработке (ЭГИО) позволяют ощутимо изменять его структуру и свойства [1]. Этот вид внепечной обработки может успешно конкурировать с другими физическими методами активного воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, что обуславливается не только качеством обработанного литья, но и преимуществами ЭГИО по энергозатратам, простотой встраивания в существующий процесс разлива расплава, возможностью обрабатывать большие промышленные массы металла.

Дальнейшее развитие метода – в поиске оптимальных технологических режимов обработки, приводящих к стабильным требуемым показателям качества литой продукции. Но целенаправленное управление обработкой металла, оперативная перестройка схем воздействия, а также поддержание в течение длительного времени стабильных результатов обработки затруднены из-за существенной не-

* Эксперименты выполнены совместно с Ю.Г. Бойченко, Н.К. Гумененко; металлографические исследования – совместно с Н.А. Федченко.

линейности и высокой чувствительности процессов импульсного воздействия к изменению входных параметров источника.

Попытка решать эти задачи путем формализованного математического моделирования импульсных процессов в источнике и объекте обработки, которое охватывает комплекс многофакторных взаимообусловленных явлений, имеет негарантированный результат, а экспериментальные исследования длительны и дорогостоящи [2]. Поэтому результаты исследований направлены на изучение основных закономерностей, связывающих параметры источника импульсного акустического нагружения расплава с характеристиками литого металла.

Как известно [3], при ЭГИО в ЭРГУК – электроразрядном генераторе упругих колебаний (рис.1) – в межэлектродном промежутке за счет электровзрывного преобразования энергии формируется источник силового воздействия на расплав, динамика которого претерпевает три последовательных стадии. Первая – стадия формирования токопроводящего канала, замыкающего межэлектродный промежуток. Вторая – канальная стадия, начинается с момента замыкания водного промежутка каналом высокой проводимости и характеризуется быстрым выделением в канале электрической энергии, резким расширением разрядного промежутка, формированием и распространением импульсов сжатия, которые передаются в расплав через волноводную систему. Заключительная, послеразрядная стадия наступает после окончания выделения энергии в разрядном канале и характеризуется пульсацией послеразрядной парогазовой полости, являющейся вторичным источником возмущений в расплаве.

Таким образом, если непосредственно силовое воздействие на расплав осуществляется на второй и третьей стадиях разряда, то процессы первой определяют степень потерь при преобразовании электрической энергии, а значит, стабильность силовых параметров воздействия. Следовательно, для повышения эффективности и стабильности ЭГИО в рамках этой стадии очень важно минимизировать энергетические потери, которые затрачиваются на формирование канала разряда. Результаты исследований [4] позволяют находить проверенные на практике рекомендации по конструктивному исполнению электродной системы, которые обеспечивают такую минимизацию потерь. Третья, послеразрядная стадия наиболее сложная для анализа, так как силовое воздействие на расплав определяется не только энергией пульсирующей парогазовой полости, но и геометрией разрядной камеры и упругой мембраны [5]. Кроме того, на характер нагружения расплава, как показано в [6], существенно влияет воздушная прослойка между поверхностью воды и верхней крышкой ЭРГУК.

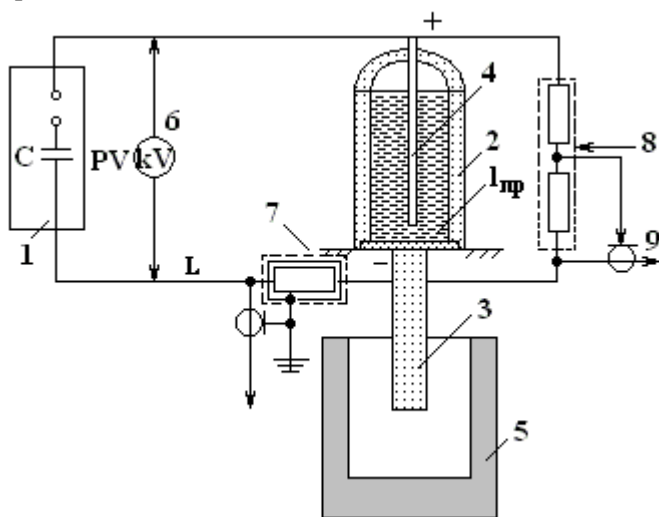


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: 1 – генератор импульсных токов; 2 – ЭРГУК; 3 – волновод; 4 – электрод; 5 – ковш с расплавом; 6 – киловольтметр; 7 – шунт; 8 – делитель; 9 – осциллограф

При математическом описании второй, разрядной стадии, как правило, все многообразие энергетических, кинетических и гидродинамических характеристик разряда, которые в свою очередь зависят от управляемых параметров разрядной цепи (емкости C , напряжения зарядки накопителя U_0 , индуктивности L , длины разрядного канала l_p), сводят к единому критерию подобия η [7], который характеризует режим электрического разряда:

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{\pi A l_p^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}}, \quad (1)$$

где A – искровая постоянная, при свободном разряде равная $10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$. Что касается величины l_p , то для практических целей удобнее использовать параметр $l_{пр}$ – длину межэлектродного промежутка,

которая, по данным [8], может быть связана с l_p соотношением $l_p = 1,1-1,5 l_{пр}$. Физическая сущность η – доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода разрядного тока, равная нулю при коротком замыкании межэлектродного промежутка и единице при прохождении апериодического разряда. Выделение электрической энергии при $\eta \approx 0,8$ соответствует так называемому согласованному режиму разряда, когда сопротивление канала становится равным волновому сопротивлению цепи [8]. Такой разряд является оптимальным по электрическому КПД, и именно на его реализацию до сих пор направлено конструктивное исполнение ЭРГУК.

Между тем предварительные расчеты [9] свидетельствуют, что для практического использования предпочтительнее колебательный режим разряда, соответствующий $\eta < 0,8$. Показано, что при колебательном разряде в расплаве обеспечиваются максимальные избыточные давления и ширина акустического спектра, оказывающие наибольшее силовое воздействие на различные структурные уровни в металле.

В работе представлены результаты, которые позволяют определить влияние режима электрического разряда в ЭРГУК на качество металла и экспериментально подтверждают выполненные ранее расчеты.

Собран экспериментальный стенд, в состав которого входит измерительная аппаратура для регистрации электрических характеристик разряда (рис.1) и определения режима выделения энергии в межэлектродном промежутке при единичном разряде. В качестве регистрирующей аппаратуры использованы двухлучевой запоминающий осциллограф С8-9А, емкостной делитель напряжения и шунт для измерения тока. Для устранения помех при передаче сигнала на осциллограф выполнен фильтр на ферритовых кольцах, обеспечивалась надежность соединения кабелей с помощью крепежных шайб и медно-графитовой смазки. Режим выделения энергии в канале разряда, значение η соответственно изменяли, варьируя длину межэлектродного промежутка $l_{пр}$ от 20 до 50 мм при постоянных параметрах электрического контура $U_0 = 50$ кВ, $C = 1$ мкФ, $L = 8,7$ мкГ. После обработки осциллограмм (не менее шести для каждой точки) величину η определяли из соотношения

$$\eta = W/W_0, \quad (2)$$

где W_0 – запасаемая энергия накопителя, кДж; $W = \int_0^{\tau} I(t)U(t)dt$ – энергия, выделившаяся в первом полупериоде τ разрядного тока $I(t)$, кДж.

Потери, затрачиваемые на пробой $W_{пр}$, определяли как разность $W_0 - W$ или из соотношения [4]:

$$W_{пр} = \kappa \cdot l_{пр} \cdot \sigma \cdot (S_3 + S_0), \quad (3)$$

где σ – электропроводность воды в камере ЭРГУК, См; S_3 – площадь оголенной поверхности положительного электрода, м²; S_0 и κ – константы.

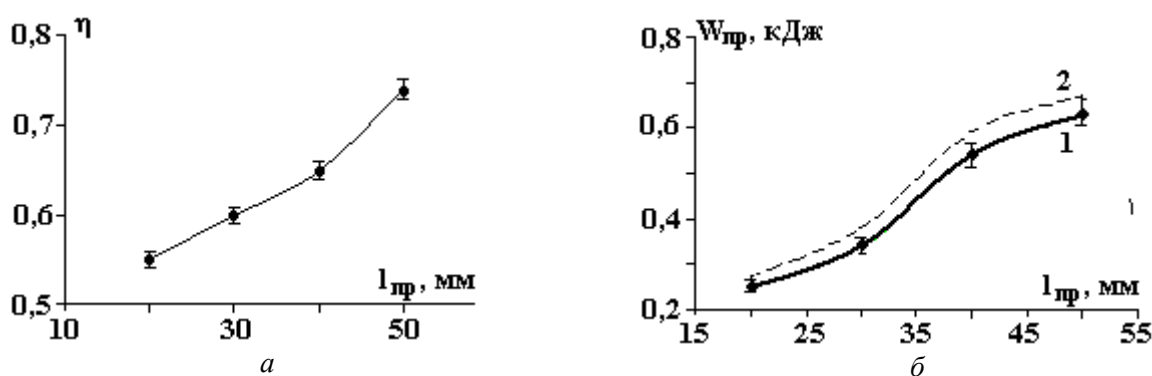


Рис. 2. Энергетические характеристики канала разряда: а – доля энергии, выделившейся в первом полупериоде разрядного тока; б – потери на пробой (1 – эксперимент, 2 – расчет по [4])

На рис. 2,а представлена экспериментальная зависимость $\eta(l_{пр})$, полученная из осциллограмм разрядного тока и напряжения, а на рис. 3 – осциллограммы, которые позволяют наглядно наблюдать характер единичного электрического разряда. Видно, что использованным величинам межэлектродного промежутка соответствует диапазон изменения η от 0,55 до 0,75, что в точке $l_{пр} = 50$ мм соответствует практически согласованному режиму разряда, а в точке $l_{пр} = 20$ мм – колебательному. Таким образом, при неизменных электрических параметрах цепи предельные для данного ЭРГУК межэлектродные промежутки $l_{пр} = 50$ и 20 мм обеспечивают принципиально

различные режимы электрического разряда, что в дальнейшем использовано при ЭГИО реальных расплавов.

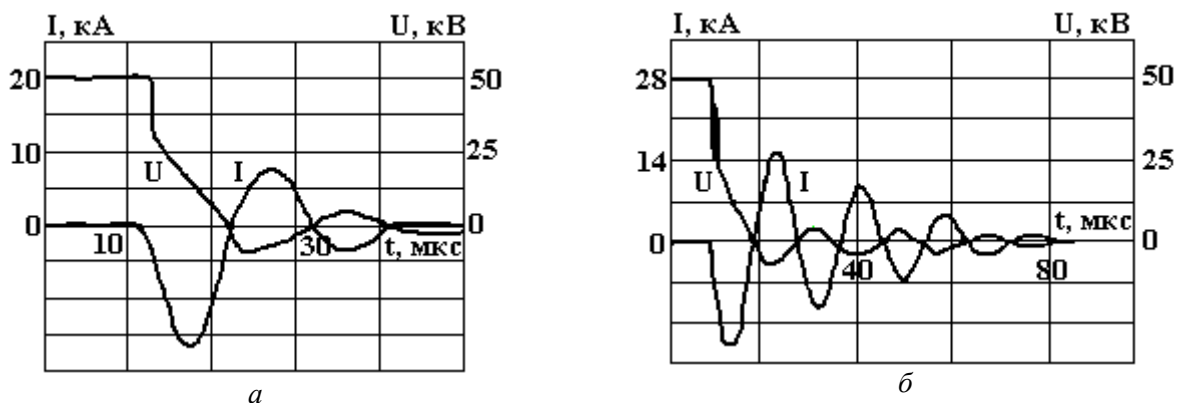


Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока и напряжения: а – согласованный режим разряда; б – колебательный режим разряда

Кривые, представленные на рис. 2,б, иллюстрируют характер изменения потерь на пробой с ростом межэлектродного промежутка. Видно, что короткие промежутки более выгодны, так как обеспечивают уменьшение энергетических потерь на доразрядной стадии, тем самым позволяя максимально полно использовать для ЭГИО расплава накопленную энергию источника W_0 . Кроме того, довольно узкий разброс значений каждой экспериментальной точки указывает на стабильное протекание первой, доразрядной стадии, что должно обеспечивать стабильность силового воздействия на расплав в течение всего времени обработки.

На втором этапе работы ЭГИО подвергали двухкомпонентный сплав Al+5%Cu, промышленным аналогом которого является литейный алюминиевый сплав АЛ7. В качестве шихтовых материалов использовали алюминиевые шины и сечку медных проводов. Выплавку производили в муфельной печи при $T = 800^\circ\text{C}$. После расплавления и кратковременной выдержки расплав доставали из печи, разливая в два ковша, один из которых, контрольный, отстаивался, в то время как другой, опытный, подвергался ЭГИО. Затем оба ковша одновременно поступали на разливку. Обработку осуществляли в течение 40 с, режим разряда изменяли путем регулировки межэлектродного расстояния, частота следования разрядов 1,5 Гц, значения U_0 и C соответствовали величине запасаемой энергии $W_0 = 1,25$ кДж. При этом жесткая фиксация мембраны ЭРГУК позволяла максимально ограничить влияние на расплав пульсирующей парогазовой полости, тем самым обеспечивая обработку только за счет силового воздействия от электрического канала разряда.

В табл.1 представлен номинальный химический состав сплава, содержащего помимо меди типичные для литейных алюминиевых сплавов примеси Si, Fe, Mn, Zn. Следует отметить, что среди других алюминиевых сплавов, предназначенных для фасонного литья, доэвтектический сплав АЛ7 отличается достаточно высокими механическими, но плохими литейными свойствами. В силу химического состава он достаточно отдален от эвтектической точки, имеет широкий интервал кристаллизации, обладает малой усадкой и склонен к образованию пористости. Поэтому получение качественных плотных отливок из этого сплава представляется проблематичным.

Таблица 1. Содержание химических элементов в сплаве, % мас.

$l_{пр}$, мм	Сплав	Cu	Si	Fe	Mn	Zn
–	контрольный	5,04	0,1	0,26	0,004	0,01
50	опытный	5,02	0,1	0,44	0,005	0,03
–	контрольный	4,93	0,1	0,37	0,005	0,01
20	опытный	4,85	0,1	0,40	0,004	0,02

На рис. 4 представлены разрезы отливок типа “стакан”, а в табл.2 приведены показатели структуры и свойств металла, из которых видно, что с помощью ЭГИО можно устранять перечисленные недостатки и существенно улучшать качество литого металла. Контрольные отливки характеризуются грубой крупнозернистой макроструктурой, наличием осевой рыхлости и рассредоточенных пор. В это же время металл, прошедший предварительную обработку в жидком состоянии, обладает плотной мелкозернистой макроструктурой, узкой зоной столбчатых кристаллов и четко выраженной усадочной раковины. Кроме того, опытный образец металла характеризуется повышенными значениями физической плотности. Как показывают визуальный осмотр разрезов и

анализ структурных данных, самая благоприятная структура относится к металлу, обработанному с использованием более короткого межэлектродного промежутка $l_{пр} = 20$ мм, то есть при колебательном режиме разряда. Безусловно, действие согласованного режима разряда также положительно сказывается на структуре и свойствах отливок, однако переход к более коротким промежуткам и колебательному режиму выделения энергии в канале разряда, на наш взгляд, представляет дополнительные резервы ЭГИО, используемые при обработке промышленных расплавов.

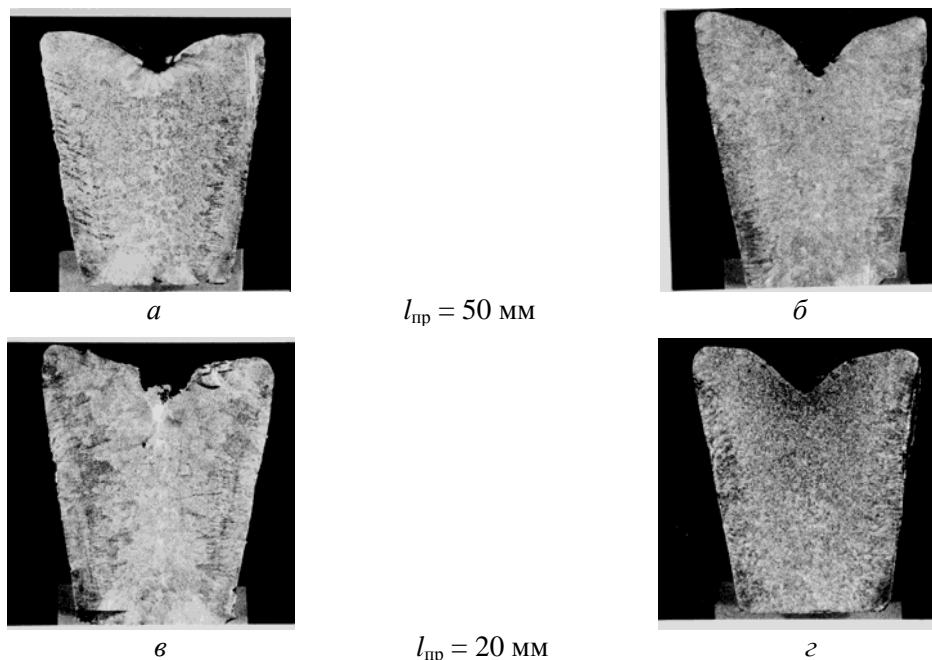


Рис. 4. Макроструктура контрольных (а, в) и опытных (б, г) образцов исследуемого сплава

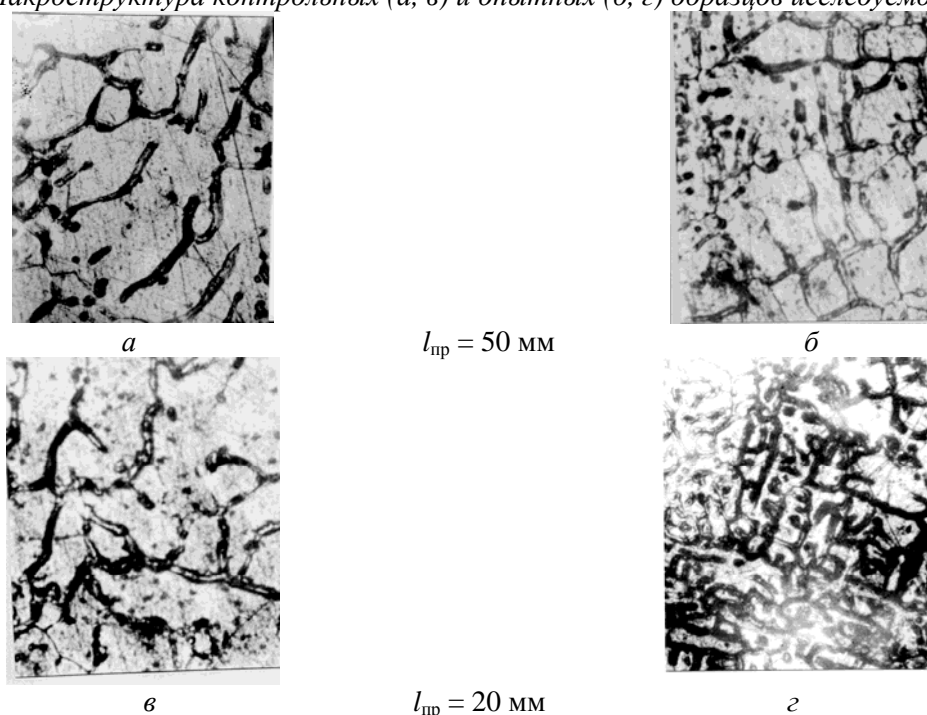


Рис. 5. Микроструктура контрольных (а, в) и опытных (б, г) образцов исследуемого сплава (x250)

Для проверки влияния режима разряда на различные структурные уровни в металле исследовали микроструктуру контрольных и опытных образцов (рис. 5, табл. 2). Микроструктура сплава представлена дендритами первичного алюминиевого раствора, эвтектикой $Al + CuAl_2 + Si$, расположенной по границам зерен, и незначительным количеством железистых фаз. Контрольные образцы характеризуются крупным микрозерном и включениями $CuAl_2$. После ЭГИО в опытных образцах размеры микрозерна и включений $CuAl_2$ заметно уменьшаются, особенно в металле,

обработанном с использованием колебательного режима разряда. Кроме того, измельчение микроструктурных составляющих проявляется в улучшении механических свойств сплава, в частности его твердости. Если для сплава, обработанного при $l_{пр} = 50$ мм, увеличение твердости составляет всего несколько единиц НВ, то после ЭГИО при $l_{пр} = 20$ мм твердость металла увеличивается практически в два раза, что еще раз свидетельствует о преимуществах колебательного режима разряда.

Таблица 2. Характеристики сплава

Параметры	$l_{пр} = 50$ мм		$l_{пр} = 20$ мм	
	контрольный	опытный	контрольный	опытный
Средний диаметр равноосного макрозерна, мм	2,3	1,8	4,1	1,4
Ширина зоны столбчатых кристаллов, мм	8,5	6,8	12	5,2
Объем концентрированной усадочной раковины, см ³	7,1	8,2	5,0	6,4
Плотность, г/см ³	2,708	2,818	2,783	2,875
Диаметр микрозерна, мкм	44	37	47	27
Длина частиц CuAl ₂ , мкм	115	72	103	64
Твердость НВ	39	45	34	61

Таким образом, результаты работы подтверждают выдвинутое ранее [9] предположение о влиянии режима неиницируемого электрического разряда на степень развития акустического возмущения в обрабатываемом при ЭГИО расплаве, о чем непосредственно свидетельствуют структура и свойства реальных отливок. Макро-, микроструктура и ряд свойств металла существенно улучшаются при переходе от согласованного на колебательный режим разряда. Колебательный режим разряда характеризуется малыми энергетическими потерями, высокой стабильностью, позволяет более полно использовать для обработки накопленную электрическую энергию, а значит, эффективнее обрабатывать расплавы и применяться в практике. Конструктивное исполнение ЭРГУК для ЭГИО должно предусматривать возможность регулировки межэлектродного расстояния для обеспечения необходимого характера электрического разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Г.В., Грабовый В.М., Синчук А.В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии // Литейное производство. 1998. № 1. С. 12–14.
2. Анищенко Л.М., Лавренко С.Ю. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов. М., 1986.
3. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. К., 1990.
4. Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н., Бондарец Л.М. Исследование энергетических характеристик предпробойной стадии подводного искрового разряда // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып.2. С. 319–325.
5. Шепелева Т.В., Шамко В.В., Атанов Г.А. Гидродинамические аспекты электровзрыва в жесткой сферической оболочке // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. К., 1980. С. 113–122.
6. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. 2003. № 6. С. 63–69.
7. Окунь И.З. Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости. Ч. 1 // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 5. С. 837–845.
8. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. К., 1979.
9. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. Расчетная методика для определения влияния параметров разряда на характеристики акустического поля в расплаве при электрогидроимпульсной обработке // Электронная обработка материалов. 2004. № 1. С. 82–87.

Поступила 21.06.04

Summary

The electrical hydro pulse treatment of casting aluminium alloy, which belongs to Al-Cu system, with using the various regimes of electrical discharge is carried out. It is shown, that the vibratory discharge regime has the most effective influence on structure and properties of castings.

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ АКТИВАЦИИ ПРОПИТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Днепропетровский национальный университет
пер. Научный, 13, г. Днепропетровск, 49050, Украина*

Улучшение эксплуатационных характеристик теплозащитных материалов является одной из основных проблем, определяющих эффективность и масштабность их применения. Представляет значительный практический интерес разработка методов воздействия магнитным полем, при которых практически не меняется существующая технология изготовления композитов. Одним из направлений решения задачи повышения физико-механических характеристик теплозащитных материалов является предварительная магнитная обработка связующего.

В качестве связующего использовали олигомер ЛБС-4. Постоянное магнитное поле напряженностью 9,55 кА/м создавали при помощи магнитов из феррита бария, имеющих форму пластин. О времени магнитной обработки связующего судили по изменению электросопротивления исследуемого олигомера ЛБС-4. Это время составило 10 мин.

Для изучения изменений структуры полимеров, предварительно обработанных в магнитном поле, был проведен ряд экспериментальных работ:

- рентгеновские исследования олигомера ЛБС-4, предварительно обработанного в постоянном магнитном поле при напряженности 9,55 кА/м;
- спектральные исследования образцов;
- электронно-микроскопические исследования олигомера ЛБС-4.

Рентгеноструктурные исследования проводили на установке ДРОН-1,5 в нефилтрованном излучении α_{Fe} . В результате установлена сложная дифракционная картина интенсивности малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (РМУ) у образцов, обработанных в магнитном поле, свидетельствующая о наличии неоднородной структуры, а также об упорядоченности неоднородностей с размерами, превышающими атомные. Амплитуда дифракционных максимумов и их положения изменяются. Эти факты свидетельствуют о некотором увеличении степени обособленности и упорядоченности систем.

Установлено, что внутренняя структура неоднородностей макромолекул изменяется в сторону возрастания степени дальнего порядка в расположении отдельных атомов, а также плотности упаковки отдельных атомов.

Таким образом, исследованная система представляет собой микрогетерогенную структуру, основным элементом которой являются неоднородности (макромолекулы) с размерами r_k , сравнительно полно заполняющие объем образца. Ближний порядок в расположении отдельных атомов с достаточной степенью точности описывается решеткой ОЦК в пределах первых двух координат.

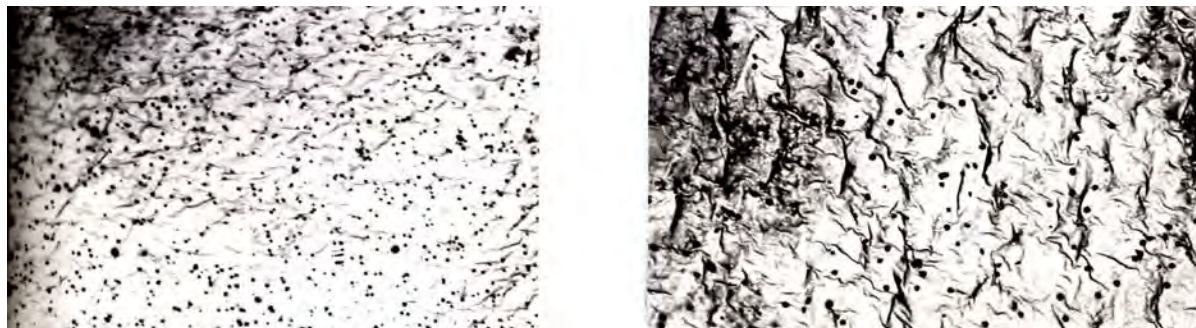
Данные спектральных испытаний, проведенные на спектрофотометре SPECOPD-75 IR также позволяют сделать вывод о влиянии предварительной магнитной обработки на элементы структуры. При анализе спектров смолы ЛБС-4 установлено изменение в интенсивности характерных полос в образцах, обработанных при $H = 9,55$ кА/м.

Электронно-микроскопические исследования, выполненные на электронном микроскопе УЭМР-100 К методом одноступенчатых платино-угольных реплик при увеличении 4800, показали, что для ЛБС-4 устойчивыми структурными единицами являются глобулы (неоднородности).

При предварительной обработке в постоянном магнитном поле при $H = 9,55$ кА/м ЛБС-4 установлено незначительное увеличение глобул по сравнению с исходными, что согласуется с результатами рентгеноструктурного анализа (см. рисунок).

Для исследования влияния магнитной обработки на свойства теплозащитных материалов были проведены физико-механические испытания материала на основе связующего ЛБС-4, подвергну-

того обработке постоянным магнитным полем напряженностью 9,55 кА/м, и наполнителя СТКТ-11. Из заготовок пропитанной стеклоткани методом ручного контактного формования изготавливали плиты размером (180×120×8) мм. Давление формования было постоянным и контролировалось. Контрольные плиты и плиты, изготовленные на основе связующего, обработанного в постоянном магнитном поле, отверждали по штатному режиму в течение 13 часов с плавным подъемом и понижением температуры.



Надмолекулярная структура смолы ЛБС-4. а – $H=0$ кА/м, б – $H=9,55$ кА/м

Из полученных плит изготавливали образцы для механических и теплофизических испытаний, результаты которых показали незначительное (до 18%) увеличение прочностных характеристик ($\sigma_{\text{ви}}$, $\sigma_{\text{в}}$) стеклотекстолита, изготовленного на основе связующего, прошедшего предварительную магнитную обработку. При этом физические свойства (γ , λ) сохраняются.

Приведенные данные говорят о целесообразности проведения предварительной магнитной обработки связующего в существующих технологических процессах изготовления теплозащитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стадник А.Д., Мирошниченко Р.Д. Воздействие постоянного магнитного поля на некоторые свойства полимеров. Механика композиционных материалов. 1978. № 2. 121 с.
2. Классен В.И. Омагничивание водных систем. М., 1978.

Поступила 05.05.04

Summary

The solution of a problem of increasing of physical-mechanical characteristics of fiber-glass-reinforced plastics (СТКТ-11 + ЛБС-4) is connected to preliminary magnetic processing compound. Magnetic processing conducted with the help of permanent magnets from ferrites of barium. The magnetic density made 9.55 кА/м. It is showed, that the preliminary magnetic processing compound ensures magnification strength and thermal proprietiess of aggregates.

БОРИС НИКИФОРОВИЧ ЗОЛОТЫХ (К 85-ЛЕТИЮ)

17 января исполняется 85 лет члену редколлегии журнала «Электронная обработка материалов», доктору технических наук, профессору, академику Российской академии космонавтики, заслуженному деятелю науки и техники РФ Борису Никифоровичу Золотых.

Борис Никифорович родился в г. Владивостоке. В военном 1943 году выпускник физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова начал трудовой путь на Московском авиационном заводе № 27, а в 1945 году стал работать в НИИ электротехнической промышленности в лаборатории, руководимой Б.Р. Лазаренко. С этого времени судьба Бориса Никифоровича неразрывно связана с интенсивно развивающимися процессами и технологиями электроэрозионной обработки материалов и их реализацией в машиностроении. В созданной Б.Р. Лазаренко Центральной лаборатории электрических методов обработки, которая в 1955 году стала самостоятельной организацией союзного значения, при активном участии Бориса Никифоровича широко развернулись исследования в области разработки теоретических вопросов и практического применения явления электрической эрозии материалов.

Обладая глубокими знаниями в области экспериментальной и теоретической физики, Б.Н. Золотых внес основополагающий вклад в создание теоретических основ метода электроэрозионной обработки материалов. Им был проведен большой цикл экспериментальных исследований электрического разряда в жидких диэлектрических средах, результаты которых послужили основанием для создания адекватной теоретической модели электрической эрозии материалов. По материалам исследований защитил кандидатскую (1948 г.) и докторскую (1968 г.) диссертации.

Работы Бориса Никифоровича прекрасно раскрывают и иллюстрируют основополагающие методологические принципы современной прикладной науки: от экспериментального факта – к научной гипотезе и к разработке теоретической модели, от теории – к практическим рекомендациям и к промышленным технологиям. Именно комплексный подход к решению научно-практических задач и всесторонний охват исследуемого вопроса позволили проф. Б.Н. Золотых занять одно из лидирующих мест в мировой «табели о рангах» в области электроэрозионной обработки.

Перейдя на педагогическую работу, Б.Н. Золотых в течение 40 лет в МГИЭМ подготовил более полутора тысяч квалифицированных инженеров, большую группу кандидатов и докторов наук, работал заведующим и профессором кафедры МГИЭМ. Был членом ВАК, многих научных советов по присуждению научных степеней, многократно оппонировал диссертационные работы, неизменно проявляя высокую принципиальность и бескомпромиссность.

За плодотворное сотрудничество в ракетно-космической, электронной и атомной отраслях промышленности Б.Н. Золотых награжден правительственными наградами и медалями Федерации космонавтики РФ.

Бориса Никифоровича отличают высокая работоспособность, чуткое и внимательное отношение к людям, неисчерпаемый оптимизм. Он полон жизненной энергии, научных идей и огромного желания плодотворно трудиться на благо общества.

Редколлегия журнала
«Электронная обработка материалов», коллеги