

3. *Анфельбаум М.С.* Уравнения равновесной ионизации продуктов горения в электрическом поле // *Физика горения и взрыва*. 1988. № 2. С. 60–65.
4. *Анфельбаум М.С.* Об одной расчетной схеме электрогидродинамических течений // *Электрохимия*. 1986. Вып.11. С.1463–1471.
5. *Анфельбаум М.С.* Объемный заряд в слабопроводящем жидком диэлектрике со сферическими, плоскими и цилиндрическими электродами // *Коллоидный журнал*. 1986. Вып. 6. С. 1110–1118.
6. *Tonks L., Langmuir I.* A general theory of the plasma of an arc // *Physical Review*. 1929. V. 34. P.876–922.
7. *Анфельбаум М.С., Анфельбаум Е.М.* О влиянии электрического поля и температуры на нестационарную эволюцию проводимости слабоионизованных, квазинейтральных сред // *Физика плазмы*. 1998. Т. 24. С. 850–856.
8. *Райзер Ю.Б.* Физика газового разряда. М., 1992.

Поступила 27.09.04

Summary

The theoretical model of electrohydrodynamic prebreakdown phenomena in the weakly ionized media is proposed. Differential equations and initial conditions for describing these problems are written. The 1D analytical and numerical solutions of these equations for calculations current-voltage characteristics are given. The calculation results are in agreement with experiments for high-voltage plane, cylindrical and spherical capacitors.

Л.Ю. Демиденко, Н.А. Онацкая

О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА МАССОПЕРЕНОС ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

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

В последнее время все большее распространение в промышленности получают технологии, включающие высокоэнергетические импульсные воздействия. К их числу относятся такие широко применяемые в промышленной практике способы, как лазерная и взрывная, ультразвуковая ударная и электрогидроимпульсная (ЭГИО) обработки.

ЭГИО металлоконструкций благодаря большим энергетическим возможностям, простоте и экономичности электрогидроимпульсного нагружения является одним из эффективных методов снижения остаточных напряжений [1]. Импульсное воздействие, формируемое электрическим разрядом в воде, позволяет снижать пики остаточных напряжений и осуществлять их перераспределение как в макро-, так и микрообъемах. ЭГИО интенсифицирует процессы, способствующие релаксации напряжений.

Влияние релаксационных процессов на диффузию изучается давно. В этой связи представляет интерес явление массопереноса при ЭГИО напряженного металла сварных соединений, поскольку предварительный анализ показал, что вопрос о подвижности атомов в условиях электрогидроимпульсного воздействия не нашел должного отражения в литературе.

Известно, что для импульсного нагружения металлов характерно повышение диффузионной подвижности атомов, то есть ускорение массопереноса [2]. При этом явление, как отмечено в работе [3], носит общий характер и не зависит от способа обработки металла, а определяющим фактором в протекании процессов массопереноса при импульсной обработке является скорость деформации. В зависимо-

сти от вида импульсного воздействия скорость пластической деформации изменяется от 10^{-1} (при ударной ультразвуковой обработке) до 10^5 с^{-1} (при взрывной обработке), что существенно увеличивает скорость массопереноса в металлах. Кроме того, по мнению авторов работы [3], немаловажное влияние на подвижность атомов в металлах в условиях импульсной обработки оказывают дислокации. Так, при взрывной обработке, как и при магнитно-импульсном воздействии, подвижность атомов уменьшается с повышением плотности дислокаций.

Следует оговорить, что приведенные в работе [3] данные не ограничивают весь фактический материал по рассматриваемому вопросу, тем более что в последние годы получены новые результаты, принятые авторами во внимание при исследовании явления массопереноса при ЭГИО.

Механизм этого явления находится в стадии изучения. В настоящий момент предложена гипотетическая модель [4], в которой физической причиной ускорения переноса атомов служит энергетическая активация подвижности атомов в условиях нелинейных аномально больших упругих деформаций, – растяжение решетки в поперечном направлении в момент динамического продольного сжатия под воздействием ударного механического нагружения.

Вклад упругих деформаций решетки ε_σ в массоперенос резко возрастает при динамических нагружениях в силу известной скоростной зависимости предела упругости σ_y^d [5]:

$$\sigma_y^d = \varepsilon_\sigma^d \cdot E, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_\sigma^d = \varepsilon_\sigma^c \left(\varepsilon^d / \varepsilon^c \right)^{1/3} \quad (2)$$

(индекс d означает динамическое, c – квазистатическое нагружение).

О структурной перестройке в объеме металла при ЭГИО свидетельствуют результаты исследований ее влияния на изменение дислокационной структуры напряженного металла сварных соединений, полученные в работе [6]. Дислокационная структура исследовалась в ферритных зернах зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений из стали 20 в исходном состоянии (после сварки) и после ЭГИО. Электрогидроимпульсная обработка производилась при трех уровнях вводимой энергии: W_1 ; $W_2 = 8W_1$ и $W_3 = 33W_1$. Результаты электронно-микроскопического исследования приведены в таблице.

Зависимость типа дислокационной структуры сварных соединений из стали 20 от энергии обработки

Состояние образцов	Тип дислокационной структуры	Плотность дислокаций ρ , см^{-2}
После сварки	Крайне неравновесная с локальными неоднородностями	$(0,9-1,4) \cdot 10^{11}$
После ЭГИО при W_1	Удлиненные дислокационные петли (~80%); конфигурации типа барьеров Ломер–Коттрелла	$(0,4-1,2) \cdot 10^9$
После ЭГИО при W_2	Конфигурации типа барьеров Ломер–Коттрелла (~90%); клубковая структура	$\sim 10^9$ $(9,2-9,8) \cdot 10^{10}$
После ЭГИО при W_3	Ячеистая структура	$(2,0-2,5) \cdot 10^{10}$

Как следует из таблицы, под действием ЭГИО дислокационная структура металла претерпевает различные изменения в зависимости от суммарной энергии нагружающих импульсов. После сварки дислокационная структура ЗТВ сварных соединений крайне неравновесная с высокой плотностью дислокаций. В процессе ЭГИО снижается плотность дислокаций, происходит перестройка дислокационной структуры: в зависимости от энергии обработки формируются различные типы дислокационных структур – от структур с выпрямленными дислокациями до клубково-ячеистых и ячеистых структур, для образования которых необходимо диффузионное переползание дислокаций [7].

Отмеченные структурные изменения напряженного металла сварных соединений при ЭГИО происходят вследствие энергетической активации диффузионных процессов в результате многократного воздействия мощных акустических импульсов давления.

Исходя из утверждения о существенном влиянии плотности дислокаций на миграцию атомов в условиях импульсных нагрузок [3] авторы предполагали, что снижение плотности дислокаций, а также

изменение типа дислокационной структуры в результате ЭГИО напряженного металла сварных соединений приведет к повышению диффузионной подвижности атомов, то есть многократное импульсное воздействие на напряженный металл сварных соединений, по-видимому, приводит к интенсификации процесса массопереноса.

В настоящей работе диффузионную подвижность атомов в металле сварных соединений из стали 20 под действием ЭГИО оценивали по расчетной зависимости коэффициентов массопереноса D_m при различных скоростях деформации, соответствующих уровням энергий W_1 и W_3 (см. таблицу).

Пользуясь предложенной моделью ускоренного массопереноса в твердых телах под воздействием импульсных нагрузений [4], оценку коэффициентов массопереноса при ЭГИО производили по следующему выражению:

$$\lg D_m = -0,43 \lg \frac{60000}{R \left[T + \frac{\sigma_y^c}{\alpha E} (\dot{\epsilon}^d / \dot{\epsilon}^c)^{1/3} \right]}, \quad (3)$$

где D_m – коэффициент массопереноса, являющийся характеристикой подвижности атомов; σ_y^c – предел упругости металла при статическом нагружении; α – температурный коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости металла; T – температура протекания процесса; $\dot{\epsilon}^d$ – скорость деформации при динамическом нагружении; $\dot{\epsilon}^c$ – скорость деформации при квазистатическом нагружении.

Приняв, что при обычно используемой схеме ЭГИО, то есть при разрядах на обрабатываемое изделие, амплитуда импульса сжатия равна максимальному давлению в канале разряда P_m , и зная время его нарастания t_N [8], определим скорость динамической деформации из соотношения

$$\dot{\epsilon}^d = \frac{P_m}{E \cdot t_N}, \quad (4)$$

где P_m и t_N – максимальное давление и время достижения максимальной электрической мощности в канале разряда соответственно.

Такой расчет показывает, что при реально используемых технологических режимах ЭГИО давление P_m изменяется в диапазоне $(2,05-4,11) \cdot 10^8$ Па, а скорость деформации – в интервале $(0,7-4,85) \cdot 10^2$ с⁻¹. Затем используя зависимость (3), приведенную выше, определяли коэффициент массопереноса D_m . Скорость квазистатического нагружения принималась равной 10^{-3} с⁻¹.

Расчетная зависимость коэффициентов массопереноса D_m от скорости деформации при ЭГИО представлена на рисунке. Как видно, с увеличением скорости деформации возрастает коэффициент массопереноса, характеризующий подвижность атомов, при этом зависимость $D_m = f(\dot{\epsilon}^d)$ имеет нелинейный характер. Тенденция изменения коэффициента D_m с увеличением скорости деформации сохраняется во всем исследованном интервале изменения скоростей деформации, что свидетельствует об ускорении массопереноса при ЭГИО. Однако с повышением скорости деформации ее роль в ускорении массопереноса несколько снижается, поскольку градиент изменения коэффициента массопереноса уменьшается.

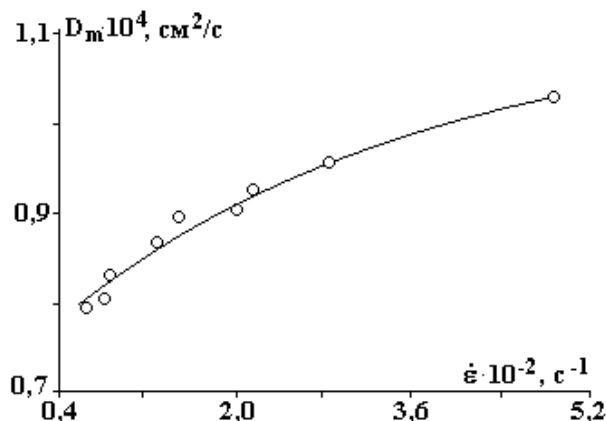


Рис. 1. Влияние скорости деформации на коэффициент массопереноса при ЭГИО

Таким образом, ЭГИО напряженного металла сварных соединений интенсифицирует процесс массопереноса, в этом случае коэффициент массопереноса D_m в зависимости от скорости деформации изменяется в диапазоне $(0,79-1,03) \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$.

Полученные результаты расчетной оценки диффузионной подвижности атомов при ЭГИО согласуются с выводами работы [3] о влиянии скорости деформации на подвижность атомов в металлах и сплавах в условиях импульсных нагружений.

Следует отметить, что затронутые в статье вопросы являются новыми и до сих пор остается дискуссионным объяснение механизма процессов, протекающих в металлах и сплавах при ЭГИО.

Установление закономерностей указанного явления в условиях ЭГИО может способствовать более глубокому пониманию физики протекающих процессов и их использованию в практических целях. Целенаправленно влияя на массоперенос и сопутствующие ему релаксационные процессы, можно в определенной мере управлять структурно-чувствительными служебными характеристиками сварных металлоконструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Опара В.С.* Электрогидроимпульсный метод снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство. 1990. № 2. С. 12–13.
2. *Лариков Л.И., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М.* Массоперенос в металлах при импульсном нагружении // Физика и химия обработки металлов. 1983. № 6. С. 144–145.
3. *Герцирикен Д.С., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М.* Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах. Киев, 1991.
4. *Мешков Ю.А., Герцирикен Д.С., Мазанко В.Ф.* К вопросу о механизме ускоренного массопереноса в металлах в условиях импульсных нагружений // Металлофизика и новейшие технологии. 1996. Т. 18. № 4. С. 52–53.
5. *Мильман Ю.В., Трефилов В.М.* Механизм разрушения металлов. Киев, 1966.
6. *Маркашова Л.И., Опара В.С., Резникова Л.Я., Онацкая Н.А.* Эволюция дислокационной структуры зоны термического влияния сварных соединений из стали 20 при электрогидроимпульсной обработке // Металлофизика и новейшие технологии. 2000. Т. 22. № 4. С. 67–70.
7. *Новиков И.И., Розин К.М.* Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. М., 1990.
8. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.

Поступила 15.07.04

Summary

It is established that under action Electrohydropulse Treatment (EHPT) the dislocation structure of metal of welded joints undergoes various changes depending on energy of loading pulses. The estimation of diffusion mobility of atoms in metals of welded steel 20 joints under action Electrohydropulse loading is carried out. It is shown that with increase of deformation speed mass-transfer coefficient, describing atom mobility, grows, i.e. EHPT welded joints intensifies process mass-transfer.