



# ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ РЕСУРСА (Обзор)

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЦИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Ю. В. ЛОГИНОВА**, студентка (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Обобщены существующие представления о влиянии обработки конструкционных материалов импульсами тока на их механические свойства. Проведена классификация типов электроимпульсного воздействия на токопроводящие материалы и отмечены перспективы его применения для повышения механических свойств сварных соединений. Установлено, что электроимпульсная обработка сварных соединений может быть перспективной для повышения ресурса металлических конструкций.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, электроимпульсная обработка, электростимуляция, воздействие электромагнитного поля, конструкционные материалы, алюминиевые сплавы, удельная энергия обработки, плотность тока, коррозионная стойкость, остаточные напряжения

Развитие современной техники и технологий вызывает необходимость поиска новых путей увеличения ресурса работы сварных металлических конструкций в различных отраслях промышленности. Одним из перспективных направлений оптимизации эксплуатационных характеристик новой техники является повышение механических свойств конструкционных материалов путем обработки их импульсами тока. Таковым является процесс, основанный на эффекте воздействия электродинамических сил на токопроводящий элемент. Изменяя длительность и энергию импульсов тока, воздействующих на электропроводный материал, в результате активации широкого спектра дислокационных, фазовых и других механизмов, можно влиять на пластичность, твердость, износостойкость и прочность металлов и сплавов [1–3], а также их сварных соединений. Указанные явления объясняются на основе гипотезы электронно-дислокационного взаимодействия [4, 5].

Известно, что электродинамические силы в электрических машинах при токе короткого замыкания достигают значений, исчисляемых десятками тысяч ньютонов [6]. При этом возникают деформации токоведущего контура, которые могут приводить к его разрушению. Электродинамические силы зависят от тока, длины, конфигурации и взаимного расположения частей электрических машин, а также от пинч-эффекта [7, 8]. Если конструктивные элементы из тонколистовых проводящих материалов входят в состав токоведущего контура, то при определенном значении электродинамической силы можно достичь изменения механических свойств обработанных элементов конструкций.

В соответствии с классификацией, предложенной в работе [3], отметим следующие типы воз-

действия электромагнитного поля на токопроводящие материалы.

*Индукционный и контактный нагрев, с помощью которого осуществляют процессы, электротермической и термомеханической обработки.* В основе этого процесса лежит интегральный разогрев за счет рассеяния джоулевой энергии, пропорциональной плотности электрического тока  $j^2$ . Длительность  $\tau$  внешнего воздействия импульсами тока определяется в таких процессах временем установления однородного температурного поля в обрабатываемом объеме материала, а также характерным временем  $\tau^*$  протекания физических процессов, ведущих к изменению структуры и свойств металла [1]:

$$\tau^* = \rho c l^2 / \kappa,$$

где  $\rho$ ,  $c$ ,  $\kappa$  — соответственно плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность материала;  $l$  — характерный линейный размер структуры материала. При этом плотность тока составляет  $1 \cdot 10^6 \leq j \leq 1 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>, а длительность воздействия импульсами тока  $\tau$  не менее 1 с.

*Электродинамическое воздействие электромагнитным полем для повышения пластичности.* Используемые при этом параметры электрического тока изменяли в диапазоне  $1 \cdot 10 \leq j \leq 1 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> и  $\tau \geq 1 \cdot 10^{-5}$  с. Наблюдаемые эффекты разупрочнения материала под действием электромагнитного поля объясняются на основе гипотезы электронно-дислокационного взаимодействия [4].

Электропластическая деформация металлов при их растяжении проявляется на диаграммах растяжения в виде характерных сбросов деформирующего усилия. Считается [4, 5], что в области упругой деформации металлов импульсы тока влияния на их пластичность не оказывают, но в области пластической деформации наблюдаются дискретные сбросы деформирующего усилия [9], возрастающие с увеличением плотности тока. Это объясняется как нестационарным перемещением дислокаций по плоскостям скольжения, так и процессами прорыва движущимися дислокациями препятствий

в виде дислокационных скоплений, структурных неоднородностей различного типа и границ зерен. При этом имеет место перестройка дислокационной структуры материала под действием механической деформации в период электроимпульсного воздействия. Отсутствие активного сброса нагружения в пластической области деформации материала до момента протекания импульса тока в указанной работе объясняется тем, что при данном значении растягивающей нагрузки все дислокации находятся на непреодолимых стопорах [10, 11]. Активация релаксационных процессов пластифицирования материала непосредственно в момент протекания импульса тока показала, что электрический ток большой плотности выступает в качестве инициатора срыва со стопоров дислокаций и нестационарного их движения.

Термическое действие электромагнитного поля основано на наличии градиентов температуры и электрического потенциала — электростимуляции [12], определяемой удельной энергией  $q = 1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>, приходящейся на единицу объема обрабатываемого материала, и длительностью воздействия импульсов тока  $\tau = 1 \dots 30$  с.

Под воздействием электромагнитного поля ( $q = 1 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> и  $\tau \cong 1 \cdot 10^{11}$  с) наблюдали [13] увеличение пластичности при незначительном изменении прочности токопроводящих материалов. Одним из возможных объяснений механизма указанного воздействия является локальная неоднородность выделения энергии  $q$ , связанная с наличием фаз, неметаллических включений, концентраторов электрического и магнитного полей в структуре материала.

На современном этапе развития технологии машиностроения практический интерес представляет исследование применения различных видов электроимпульсной обработки для регулирования механических свойств сварных конструкций.

Заметим, что в настоящее время достаточно мало работ по применению обработки импульсами тока сварных соединений. В то же время исследования в области использования импульсов тока для оптимизации служебных характеристик сварных швов могут сыграть важную роль в повышении ресурса как эксплуатируемых, так и изготавливаемых сварных конструкций [14]. Неразъемные соединения металлов, получаемые сваркой, отличаются рядом особенностей по сравнению с материалами, не подвергавшимися термическому воздействию, а именно наличием литой структуры металла шва, участками кристаллизации в ЗТВ, градиентами твердости металла (зон разупрочнения) в поперечном сечении соединения, характерными, в частности, для алюминиевых сплавов. Одним из основных факторов, влияющих на служебные характеристики изделий, является напряженно-деформированное состояние сварных соединений, с которым связаны такие явления, как фазовые превращения в металле шва, размерная стабильность и остаточные формоизменения конструкций, а также снижение коррозионной стойкости в зоне соединений. В ряде случаев сварочные процессы вызывают появление горячих и

холодных трещин в материале, а также падение усталостной прочности.

Анализируя работы, посвященные повышению механических свойств конструкционных материалов, можно оценить перспективы применения обработки импульсами тока сварных соединений как способа увеличения ресурса эксплуатации металлических конструкций.

На основании данных, полученных для различных материалов, проведены оценки перспективности обработки импульсами тока для улучшения механических свойств сварных соединений.

Так, в работе [3] исследовали влияние импульсов электрического тока на характеристики прочности алюминиевых сплавов АД-1, Д16 и АМг2, которые поставляли в виде листового полуфабриката толщиной 3...5 мм, предварительно подвергнутого пластической деформации холодной прокаткой с заданной степенью обжатия (деформации). Материал после такой обработки использовали как исходный. В соответствии с поставленной задачей проводили испытания до и после обработки импульсами тока на статическую прочность и трещиностойкость при статическом нагружении, а также на ударную вязкость.

При обработке материалов импульсами тока изменяли длительность  $\tau$  воздействия и удельную энергию  $q$ . Для оптимизации диапазона значений  $q$  теоретически определяли [13] энергию, необходимую для наиболее эффективной обработки материала. За максимально возможную принимали энергию, приводящую к разрушению образца. Длительность  $\tau$  воздействия импульсов тока и удельную энергию  $q$  изменяли в пределах соответственно 0,22...0,36 с и 0,5... 1,3·10<sup>9</sup> Дж/м<sup>3</sup>. Установлено, что обработка импульсами тока образцов из сплава АД-1 приводит к увеличению пластичности на 30 % при  $q = 0,9 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и на 20...25 % при  $q = 0,7 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. При этом у образцов из сплава Д16 повышается пластичность. Но если у образцов из сплава АД-1 имело место снижение прочностных характеристик материала, то у образцов из сплавов АМг2 и Д16 при условии обработки на оптимальных режимах наблюдалось увеличение предела прочности на 5...8 %.

Следует отметить, что для ограниченно свариваемого сплава Д16, склонного к повышенному трещинообразованию при локальном термическом воздействии, увеличение пластичности материала за счет предварительной обработки сварных соединений импульсами тока может положительно сказаться на их служебных характеристиках. Проводили испытания на ударную вязкость образцов с острым надрезом в исходном (с предварительной деформацией), отожженном и обработанном состояниях. Полученные результаты показали, что обработка импульсами тока приводит к увеличению ударной вязкости по отношению к нагартованному материалу на 20...50 %, а к отожженному — на 10...15 % в узкой области значений удельной энергии, причем ее максимум и максимум пластичности конкретного сплава совпадают. При этом, если оптимальные значения вязкости у сплава АД-1



достигаются при соответственно  $q = 0,9 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, то у сплавов АМг2 и Д16 — при  $q = 1,4 \cdot 10^9$  и  $17 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. Данные работы [3] позволяют сделать вывод, что обработка импульсами тока сварных соединений из алюминиевых сплавов также может положительно влиять на их ударную вязкость. Установлено, что электроимпульсная обработка сплавов АД-1, Д16 и АМг2 при значениях  $q$  и  $\tau$  соответственно  $0,92 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и 0,35 с,  $1,5 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и 0,37 с,  $1,25 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и 0,23 с повышает критическую величину раскрытия вершины трещины. Учитывая, что механизмы трещинообразования в сварных соединениях близки к процессам, происходящим в основном металле, можно рассматривать обработку сварных соединений импульсами тока как перспективный способ повышения работоспособности сварных конструкций.

Одной из причин снижения работоспособности сварных конструкций в процессе эксплуатации является зарождение и подрастание до разрушения микротрещин, возникающих в сварном шве и ЗТВ. Поэтому актуальными являются исследования процессов «залечивания» микротрещин за счет локальных разогревов материала в вершинах трещин.

В частности, важную роль в механизме распространения трещины могут играть электрические процессы, происходящие на ее берегах и в вершине [15]. Скорость развития трещины прежде всего обусловлена изменениями в кристаллической структуре металла [2] под воздействием электрического поля, которые приводят к его упрочнению. В развитие гипотезы об изменении кристаллической структуры [16] исследовали новый способ магнитно-импульсного упрочнения материалов [17], применимый и для сварных соединений. Суть его состоит в том, что образец помещают в переменное магнитное поле и через него пропускают разряд батареи импульсных конденсаторов. Использование переменного магнитного поля обусловлено тем, что в каждом импульсе тока достигаются такие значения напряженности магнитного поля, которые стимулируют начало мартенситных превращений.

Физическая сущность способа поверхностного упрочнения сплавов заключается в создании вихревых токов большой плотности, вследствие чего поверхностный слой металла разогревается до температуры фазового превращения и в нем под воздействием сильных магнитных полей и пластической деформации возникает структура, состоящая из мелкогольчатого мартенсита и мелкодисперсных карбидов и характеризующаяся повышенной твердостью.

Из работы [18] следует, что пропускание импульсов тока по массивной пластине с краевой трещиной сопровождается микровзрывом в ее вершине, приводящим к образованию кратера. При этом сам образец вдали от трещины нагревается всего на несколько десятков градусов. Это явление может быть использовано для притупления вершины трещины.

В работе [19] предложен метод «залечивания» микротрещин в металле с помощью электрического и магнитного полей. Такую возможность исследовали на образцах из армко-железа и стали 60Г. В металле зоны восстановленной сплошности наблюдается измельчение зерна и повышение микротвердости по сравнению с исходным металлом.

В ряде работ, например [20], отмечается, что электроимпульсная обработка сталей различных классов наиболее эффективна после определенного цикла эксплуатации конструкции. В то же время предварительная обработка не приводит к увеличению работоспособности изделий. Очевидно, что для целенаправленного применения данного способа необходимо знание закономерностей воздействия импульсов тока на структуру и фазовый состав обрабатываемых сталей. В работе [21] такой способ обработки апробирован на стали 08Х18Н10Т и доказана возможность повышения работоспособности конструкций из аустенитных сталей.

Известно, что элементы конструкций, испытывающие переменные нагружения, могут разрушаться от усталости при сравнительно низких номинальных напряжениях. Из большого количества факторов, влияющих на сопротивление усталости, основным является концентрация напряжений. В большинстве случаев усталостные трещины зарождаются в зонах изменения сечения или нарушения поверхностного слоя. В сварных конструкциях места перехода шва к основному металлу, и особенно дефектные участки шва, являются очагами усталостного разрушения [22].

В ряде работ [22, 23] подчеркивается необходимость подавления зарождения микроконцентраторов напряжений в материале за счет локализации микродоформаций, что достигается обработкой материала мощными импульсами тока, оптимизированными по частоте, амплитуде и времени воздействия.

В последние годы определенное количество работ посвящено проблеме увеличения долговечности сталей, сплавов и биметаллических материалов путем их обработки мощными импульсами тока на определенном участке усталостной кривой [24, 25]. На основании анализа результатов исследований фазового состава сталей [26–28] установлено, что такое воздействие увеличивает долговечность изделий на 20...30 % и снижает коррозионное растрескивание.

В работе [29] исследован рост трещины в образце из стали 60ГС2 при усталостных испытаниях до разрушения и в условиях электростимулирования импульсами тока на материал. Время этого воздействия составляло до 15 с. При этом ширина зоны усталостного роста трещины в материале, не прошедшем обработку и подвергнутом электростимулированию, в 1,25 раза больше, чем в разрушенном без обработки. Размер данной зоны соответствует критической длине трещины, поэтому можно считать, что электростимулирование увеличивает ресурс работоспособности материала. Существенно различается и максимальная длина докритической трещины: в подвергнутом электростимулированию образце она почти в 2 раза больше, чем в образце, не прошедшем обработку. Следовательно, обработка стали 60ГС2 на промежуточном этапе циклических испытаний способствует существенному увеличению длины докритической трещины. Отмечено положительное изменение структуры стали 60ГС2 в условиях промежуточной обработки импульсами тока при циклических усталостных испытаниях [30]. Одним из механизмов, поясняющим природу повышения усталостной прочности стали при электростимуляции, является снижение уровня остаточных напряжений вследствие локального повышения температуры в местах с раз-

рывом сплошностей в структуре металла, в результате чего происходит релаксация напряжений [31]. Данную гипотезу проверяли на сталях 16ГС и 09Г2 [32, 33]. При этом длительность цикла электростимулирования составляла 30 с, а обработку проводили через каждую тысячу циклов до разрушения материала. На основе анализа влияния электростимулирования на свойства исследуемых материалов можно заключить, что как у стали 16ГС, так и у 09Г2С при указанных циклах нагружения наблюдается увеличение работоспособности конструкций более чем на 70 % (в комплексе с термообработкой).

В работе [34] проведено исследование продолжительности электростимуляции на улучшение свойств стали 40 и стали 45. С помощью методов неразрушающего контроля [35] и оптической микроскопии установлена продолжительность воздействия импульсами тока, при которой имеет место повышение пластичности, и, как следствие, увеличение работоспособности конструкции [36]. Максимальное время обработки составляло 135 с. При проведении усталостных испытаний образцов, обработанных импульсами тока, установлено, что с увеличением продолжительности воздействия импульсами тока  $\tau$  с 30 до 70 с время до разрушения исследуемого материала возрастало. Максимальное увеличение работоспособности конструкции наблюдалось при  $\tau = 70$  с и составляло 28 %. При возрастании времени воздействия импульсами тока до 135 с время до разрушения конструкции уменьшается на 10 %. Предполагается, что наиболее ярко действие электропластического эффекта [37] проявляется при продолжительности воздействия импульсами тока до 70 с; в случае дальнейшего увеличения  $\tau$  доминирующее влияние начинает оказывать тепловой эффект, что может вызвать ухудшение характеристик материала.

В работах [38–40] исследовали влияние воздействия импульсами переменного тока в магнитном поле на структуру и свойства (прочность, пластичность, сопротивление усталостному разрушению и трещиностойкость) биметаллических материалов 40ХНМА и 38ХНЗМФА, наплавленных соответственно сталями 08Х19Н9Ф2С2 и 07Х25Н12Г2Т. Указанные материалы применяют в современном судостроении, причем наплавленные стали используют в качестве антикоррозионных покрытий. В связи с этим представляет интерес изучение влияния воздействий импульсами тока на коррозионную стойкость металлов. Результаты исследования показали, что при воздействии импульсами тока на поверхность обрабатываемых материалов формируется слой металла с особыми физико-химическими свойствами и параметрами структуры — так называемый белый слой. С учетом того, что судостроительные конструкции подвергаются электрокоррозии, его роль можно сравнить с действием антикоррозионного покрытия. С помощью металлографических исследований установлено снижение количества примесей на границах зерен основных сталей 40ХНМА и 38ХНЗМФА после воздействия импульсами тока, а также выходов дислокаций на поверхность металлов, что практически исключает протекание межкристаллитной коррозии и приводит к повы-

шению усталостной прочности данных сталей в условиях коррозионной среды (морская вода).

Одним из факторов, определяющих работоспособность сварных конструкций, являются остаточные напряжения, негативно влияющие, в частности, на прочность, коррозионную стойкость и геометрические характеристики изделий. Снижение уровня остаточных напряжений положительно сказывается на повышении долговечности конструкций.

Установлено, что воздействие импульсами тока на металл, подвергаемый растяжению до уровня пластичности [9], приводит к релаксации его напряженно-деформированного состояния. В сварном шве и ЗТВ имеют место напряжения растяжения, близкие к пределу текучести металла. Обработка шва и ЗТВ импульсами тока может положительно влиять на снижение уровня остаточного напряженно-деформированного состояния металлических конструкций.

Проводились работы по применению обработки импульсами тока для повышения механических свойств сварных соединений из молибдена и его сплавов, полученных контактной стыковой сваркой [41]. Через соединения стержней из сплавов молибдена диаметром 8 мм пропускали импульсы тока высокой энергии длительностью до 0,6 с. При этом имело место улучшение механических свойств обработанных соединений по сравнению с непроработанными, что объясняется ускорением процессов диффузии и релаксации напряжений, «залечиванием» микродефектов и формированием дисперсной дислокационной структуры.

При выполнении сварных швов электрошлаковым способом жидкий и остывший металл шва обрабатывали импульсным электромагнитным полем [42]. После чего проводили механические испытания, результаты которых показали возрастание ударной вязкости на 30 % и снижение порога хладноломкости от  $-40$  до  $-65$  °С. Это объясняется тем, что воздействие электромагнитного поля на сварочную ванну при электрошлаковом процессе способствует увеличению центров кристаллизации и измельчению зерен при вторичной перекристаллизации.

## Выводы

1. Воздействие на конструкционные материалы импульсами тока вызывает активацию дислокационных, фазовых и термомеханических процессов, вследствие чего происходит изменение механических свойств обрабатываемых металлов и сплавов.
2. Установлено, что различные виды воздействия импульсами тока при заданных энергетических параметрах процесса положительно влияют на напряженное состояние, статическую и усталостную прочность, пластичность, трещино- и коррозионную стойкость, а также ударную вязкость алюминиевых сплавов, конструкционных сталей и биметаллических материалов.
3. На основании анализа результатов исследовательских работ, посвященных повышению механических свойств конструкционных материалов, представляется перспективным применение обработки сварных конструкций импульсами тока как способа повышения их ресурса.



1. *Пластичность* и прочность металлических материалов при импульсном воздействии высокоэнергетического электромагнитного поля / Н. Н. Беклемишев, Н. М. Горбунов, Н. И. Корякин и др. — М.: ИПМ АН СССР, 1989. — 56 с.
2. *Троицкий О. А., Розко А. Г.* Электропластическая деформация металла // *Физика твердого тела.* — 1970. — **12**, № 1. — С. 203–210.
3. *Физические* основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
4. *Спицин В. В., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. — М.: Наука, 1985. — 160 с.
5. *Климов К. М., Новиков И. И.* Особенности пластической деформации металлов в электромагнитном поле // *Докл. АН СССР.* — 1980. — **253**, № 3. — С. 603–606.
6. *Александров Г. И.* Теория электрических аппаратов. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
7. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Влияние электрического тока и импульсного магнитного поля на скорость ползучести металла // *Докл. АН СССР.* — 1974. — **216**, № 6. — С. 1266–1269.
8. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Электропластический эффект в металлах // *Вестн. АН СССР.* — 1977. — № 11. — С. 10–15.
9. *Акустическая* эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов // *Материаловедение.* — 2004. — № 7. — С. 29–33.
10. *Синергетика* электростимулированного усталостного разрушения / В. А. Петрунин, Д. З. Чиракадзе, В. Я. Целлермаер и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 1997. — № 6. — С. 46–49.
11. *Мезоскопический* уровень пластической деформации в условиях электростимулированного усталостного разрушения / В. А. Петрунин, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов и др. // *Физ. мезомеханика.* — 1999. — № 4. — С. 91–93.
12. *Климов К. М., Новиков И. И.* Действие импульсов электрического тока на процесс растяжения тонких металлических проволок // *Металлы.* — 1983. — № 3. — С. 155–158.
13. *Субструктурные* изменения в меди при импульсном воздействии электромагнитного поля / Ю. В. Баранов, А. И. Тананов, С. Н. Корякин и др. // *Физика и химия обраб. материалов.* — 1980. — № 4. — С. 62–68.
14. *Влияние* импульсного электрического тока на характеристики конструкционной прочности металлических материалов / Н. Н. Беклемишев, Ю. В. Баранов, Ю. Л. Доронин и др. // *Там же.* — 1990. — № 4. — С. 108–112.
15. *Финкель В. М.* Физические основы торможения разрушения. — М.: Металлургия, 1977. — 359 с.
16. *Об упрочнении* металла в устье трещины, обтекаемой импульсом тока / В. М. Финкель, Ю. И. Головин, В. М. Иванов и др. // *Физика и химия обраб. материалов.* — 1981. — № 2. — С. 42–45.
17. *Поверхностное* упрочнение металлических материалов с помощью магнитно-импульсной установки / В. В. Гайдук, В. Р. Рокель, Д. В. Гайдук и др. // *Сталь.* — 2004. — № 7. — С. 87–89.
18. *Головин Ю. И., Финкель В. М., Слетков А. А.* Образование кратера в вершине трещины под действием мощного локального электромагнитного поля // *Физика и химия обраб. материалов.* — 1977. — № 3. — С. 18–23.
19. *Финкель В. М., Иванов В. М., Головин Ю. И.* Залечивание трещин в металлах скрещенными электрическими и магнитными полями // *Пробл. прочности.* — 1983. — № 4. — С. 54–58.
20. *Степанов Г. В., Бабицкий А. И.* Влияние импульсного тока высокой плотности на усталостную долговечность стального образца с концентратором // *Там же.* — 1995. — № 5. — С. 74–78.
21. *Мезоскопическая* субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения / Ю. В. Иванов, Д. В. Лычагин, В. Е. Громов и др. // *Физ. мезомеханика.* — 2000. — **3**, № 1. — С. 103–108.
22. *Панин В. Е.* Основы физической мезомеханики // *Физ. мезомеханика.* — 1998. — Т. 1. — С. 5–22.
23. *О возможности* залечивания усталостных повреждений / Л. Б. Зуев, О. В. Соснин, В. Е. Громов и др. // *Металлофизика и новейшие технологии.* — 1997. — **19**, № 8. — С. 80–82.
24. *Эволюция* дефектной структуры и фазового сдвига стали 18Н10Т при малоцикловых усталостных испытаниях / В. В. Коваленко, О. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов и др. // *Физика и химия обраб. материалов.* — 2000. — № 6. — С. 74–80.
25. *Электронно-микроскопический* анализ стали 45Г17Ю3 при электростимулированной многоциклового усталости / С. В. Коновалов, О. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 2003. — № 6. — С. 65–69.
26. *Электропластификация* закаленной углеродистой стали / Ю. Ф. Иванов, О. В. Соснин, Е. Ю. Сучков и др. // *Физ. мезомеханика.* — 2003. — № 6. — С. 71–75.
27. *Исследование* влияния импульсных воздействий на коррозионную стойкость металлических и биметаллических материалов / В. Л. Володин, В. Д. Тхай, Ю. Ф. Коныхов и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 2002. — № 6. — С. 39–43.
28. *Восстановление* ресурса стальных изделий при многоциклового усталости воздействия токовыми импульсами / С. В. Коновалов, О. С. Лейкина, Б. С. Семухин и др. // *Перспект. материалы.* — 2002. — № 3. — С. 45–48.
29. *Соснин О. В.* Подавление трещинообразования в стали 60ГС2 токовыми импульсами при многоциклового усталости // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 2003. — № 12. — С. 30–32.
30. *Соснин О. В., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е.* Эволюция структуры стали 60ГС2 при циклических усталостных испытаниях в условиях токового воздействия // *Там же.* — 2003. — № 12. — С. 27–30.
31. *Электростимулированная* пластичность металлов и сплавов / В. Е. Громов, Л. Б. Зуев, Е. В. Козлов и др. — М.: Недра, 1996. — 160 с.
32. *Малоцикловая* усталость низкоуглеродистых сталей 16ГС и 09Г2С при электростимулировании / С. В. Коновалов, О. В. Соснин, Б. С. Семухин и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 2000. — № 10. — С. 55–57.
33. *Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. А.* Скорость звука и структуры сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996. — 280 с.
34. *Троицкий О. А., Моисеенко М. М.* К вопросу о скоростной зависимости электронно-пластического эффекта // *Изв. АН СССР. Металлы.* — 1984. — № 4. — С. 38–43.
35. *Бородин М. М., Спектор Э. Н.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 227 с.
36. *Электростимулированная* малоцикловая усталость / О. В. Соснин, В. Е. Громов, Е. В. Козлов и др. — М.: Недра, 2000. — 280 с.
37. *Электростимулированная* пластичность металлов и сплавов / В. Е. Громов, Л. Б. Зуев, Е. В. Козлов и др. — М.: Недра, 1996. — 29 с.
38. *Володин В. Л.* Исследование влияния тепловых энергетических воздействий на структуру и свойства биметаллических соединений // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 1993. — № 8. — С. 74–77.
39. *Исследование* импульсных воздействий на структуру и свойства биметаллических материалов / В. Л. Володин, В. В. Гайдук, А. А. Масляков и др. // *Там же.* — 2001. — № 2. — С. 45–49.
40. *Влияние* импульсных магнитных полей на структуру и свойства металлических сплавов / В. Л. Володин, В. Д. Сарычев, Л. Н. Гудимова и др. // *Там же.* — 1990. — № 10. — С. 77–79.
41. *Повышение* механических свойств сварных соединений / С. А. Ярославцев, Ю. В. Курочкин, А. Я. Подольский и др. // *Всероюз. конф. «Использование импульсной технологии в сварочном производстве», г. Николаев, 4–6 окт. 1988 г.:* Тез. докл. — Николаев: ЦНИИ «Лот», 1988. — С. 24–26.
42. *Пономаренко В. Н., Корнеев Д. И., Шарченко К. И.* Повышение свойств сварных соединений при воздействии импульсными электромагнитными полями на процесс ЭПС // *1-я Всероссий. конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность металлов», г. Юрмала, 29 сент.–1 окт. 1987 г.:* Тез. докл. — М.: Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова АН СССР, 1987. — С. 68.

Current concepts of the influence of structural material treatment by current pulses on their mechanical properties are generalized. Types of electric pulse impact on current-carrying materials are classified, and prospects for its application to improve the mechanical properties of welded joints are outlined. It is established that electric pulse treatment of welded joints may be promising for extending the service life of metal structures.

Поступила в редакцию 21.04.2005