

## Перераспределение остаточных сварочных напряжений при обработке импульсным электромагнитным полем

Г. В. Степанов<sup>а</sup>, А. И. Бабуцкий<sup>а</sup>, И. А. Мамеев<sup>а</sup>, Н. А. Пашин<sup>б</sup>,  
В. В. Савицкий<sup>б</sup>, Г. И. Ткачук<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

*Результаты экспериментальных исследований показывают, что в образце из сплава АМгб после обработки импульсным электромагнитным полем наблюдается существенное снижение и перераспределение остаточных сварочных напряжений. Результаты численного моделирования подтверждают, что эффект обработки не связан с термическим действием поля.*

**Ключевые слова:** импульсное электромагнитное поле, остаточные сварочные напряжения, спекл-интерферометрия, электропластический эффект.

**Введение.** Влияние остаточных сварочных напряжений (ОСН) на несущую способность конструкций как при статическом, так и при циклическом нагружении общеизвестно. При этом, как правило, рассматривают три аспекта влияния ОСН [1]: суммирование этих напряжений с напряжениями от внешних нагрузок, изменение средних напряжений и их влияние на кинетику распространения трещины. И если влияние ОСН на статическую прочность при нормальных температурах довольно неоднозначно [2], в условиях циклического нагружения, особенно при нагружении с малым уровнем напряжений, их влияние однозначно и проявляется в существенном снижении предела выносливости материала сварного соединения и повышении скорости развития усталостной трещины [3, 4]. Кроме того, растягивающие ОСН являются основной причиной коррозионного растрескивания – хрупкого разрушения металла при одновременном действии коррозионно-активной среды и механических напряжений [2].

Снижение ОСН в конструкциях, как правило, весьма сложная проблема, требующая значительных затрат. Подобный эффект в основном достигается путем теплового и силового (механического) воздействия на металл сварного соединения или путем сочетания этих воздействий. Однако каждый из методов имеет свои недостатки. Например, локальное применение высокого отпуска приводит к формированию областей с высокой остаточной напряженностью после полного остывания конструкции, поскольку такая обработка воспроизводит, по сути, термический цикл сварки. Таким образом, разработка новых методов снижения остаточных напряжений, позволяющих преодолеть недостатки, свойственные существующим методам, является актуальной задачей.

В литературе достаточно широко представлены данные о влиянии импульсного электрического тока (ИЭТ) на релаксацию напряжений при нагружении растяжением вследствие так называемого “электропластического эффекта” (см., например, обзор [5]). Результаты исследований свидетельствуют о воз-

возможности создания технологии снижения остаточных напряжений, в том числе ОСН, основанной на использовании импульсного электрического тока. Исследования в этом направлении проводятся с использованием как прямого пропускания тока, так и индуцированного тока [6–10], однако они требуют дальнейшего развития.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальной оценки влияния обработки импульсным электромагнитным полем (ИЭМП) на перераспределение ОСН в пластине из алюминиевого сплава, а также результаты численного моделирования изменения ее напряженно-деформированного состояния (НДС) при такой обработке.

#### **Образец, методики и результаты экспериментальных исследований.**

Для исследований был изготовлен образец стыкового соединения из отожженного алюминиево-магниевого сплава марки АМг6 размерами  $500 \times 360 \times 4$  мм, полученный из двух листовых заготовок размерами  $250 \times 360 \times 4$  мм. Режим отжига заготовок (нагрев до  $320^\circ\text{C}$  в течение 1,5 ч и остывание вместе с печью) обеспечивал отсутствие в материале каких-либо напряжений, вызванных механической обработкой свариваемых кромок. Стыковой шов длиной 360 мм и шириной 12 мм выполняли на установке АСТВ-2М за один проход автоматической сваркой неплавящимся электродом в среде аргона. Режим сварки при напряжении 18 В, токе 200 А и скорости 3,1 мм/с с использованием подкладной планки с формирующей канавкой гарантировал полный провар по всей длине соединения.

Обработку сварного шва с целью перераспределения ОСН выполняли по схеме, приведенной на рис. 1. Соосно установленные и последовательно соединенные плоские индукторы с наружным диаметром 45 мм и внутренним 15 мм смещали вдоль оси шва на 15 мм после каждого разряда. Через них разряжали батарею конденсаторов емкостью 600 мкФ при напряжении 3 кВ (по результатам измерений с использованием пояса Роговского максимальная амплитуда тока разряда в первом колебании составляла 35 кА, период колебаний – 0,32 мс).

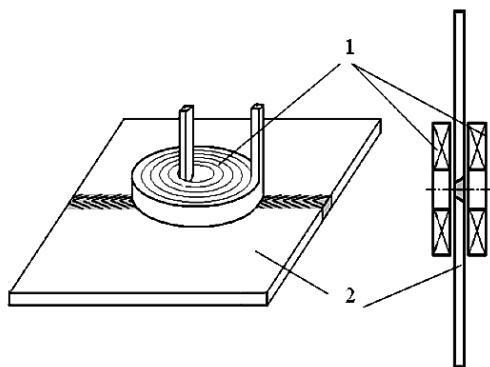


Рис. 1. Схема обработки ИЭМП: 1 – индукторы; 2 – пластина со сварным швом.

Измерения ОСН проводили до и после обработки образца ИЭМП с использованием спекл-интерферометрии [11]. Выбор метода обусловлен необходимостью сохранения целостности образца после регистрации его начального напряженного состояния. Образцы с известным (зарегистрированным)

уровнем начальных напряжений обрабатывали ИЭМП и затем повторно измеряли ОСН. Сопоставляя напряженное состояние до и после обработки ИЭМП на одном и том же образце сварного соединения, можно судить о ее эффективности.

Данный метод основан на измерении деформаций при упругой разгрузке объема металла в исследуемых точках на поверхности образца, вызванной сверлением несквозных отверстий малого диаметра. Плоскостные компоненты вектора перемещений, характеризующие деформацию образца в плоскости, определяли с помощью интерферометра путем освещения исследуемого участка образца лучом лазера под одним и тем же углом с двух направлений. Угол между нормалью к точке поверхности и направлением освещения составлял  $57^\circ$ .

Схема измерений включала спекл-интерферометр, CCD-камера, световод и основание с тремя конусными опорами.

Остаточные сварочные напряжения определяли следующим образом. Интерферометр устанавливали на поверхности образца (рис. 2) и с помощью компьютера регистрировали картину интерференционных полос, характеризующую начальное напряженное состояние металла. Затем в заданной точке поверхности сварного соединения специализированным инструментом выполняли сверление несквозного отверстия диаметром и глубиной 1,0 мм. После упругой разгрузки напряжений, вызванной сверлением, повторно регистрировали картину интерференционных полос. По изменению картин в окрестности отверстия до и после упругой разгрузки ОСН определяли напряженное состояние на поверхности образца. Для случая пластины с несквозным отверстием, находящейся в поле растягивающих напряжений, аналитическое решение для вычисления перемещений в его окрестности отсутствует, поэтому в работе использовали эмпирические зависимости [11].

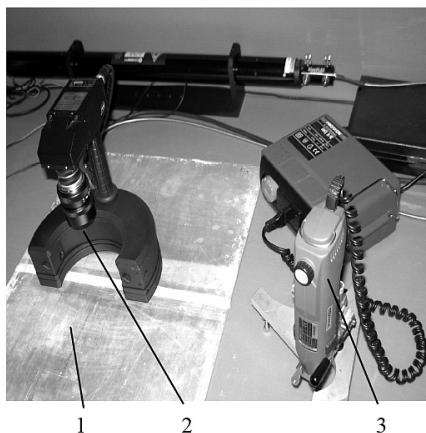


Рис. 2. Образец со сварным швом (1), оптический модуль (2), инструмент для сверления отверстий (3).

Обработка металла сварного соединения ИЭМП вызывает изменение его напряженного состояния, которое определяли после обработки. Как и до обработки, регистрировали картину интерференционных полос до и после сверления, содержащую информацию о напряженном состоянии. Разность значений ОСН, получаемых до и после обработки, является показателем ее

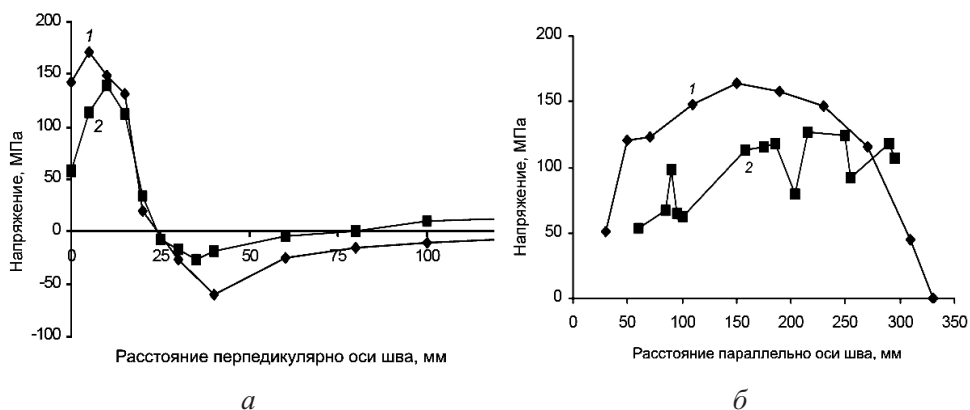


Рис. 3. Распределение ОСН до (1) и после (2) обработки ИЭМП перпендикулярно (середина пластины) – а и параллельно (15 мм от оси шва) – б оси шва.

эффективности для сварных соединений из сплава АМг6. Результаты измерений ОСН, действующих вдоль оси шва, приведены на рис. 3.

**Моделирование влияния ИЭМП на изменение НДС образца.** В настоящее время численное моделирование электропластического эффекта не представляется возможным ввиду отсутствия уравнений состояния, описывающих специфическое действие электромагнитного поля на НДС в металле. В связи с этим в работе предпринята попытка объяснить эффект перераспределения ОСН только термическим действием электрического тока, индуцированного в пластине при обработке ИЭМП.

Влияние теплового эффекта ИЭМП на уровень ОСН в пластине определяли численным моделированием, используя метод конечных элементов. Расчетные схемы образца (пластины со сварным швом) и индукторов строили в соответствии с их реальными размерами, физико-механические свойства материала пластины с учетом их температурных изменений взяты из базы данных MPDB v5.15 для алюминия [12], предел текучести принимали линейно изменяющимся от 200 МПа при 0°C до 10 МПа при 600°C.

Задачу решали в три этапа. На первом этапе по результатам решения осесимметричной задачи (рис. 4,а) определяли изменения температуры и механических напряжений в пластине без сварного шва, вызванные индукционным током.

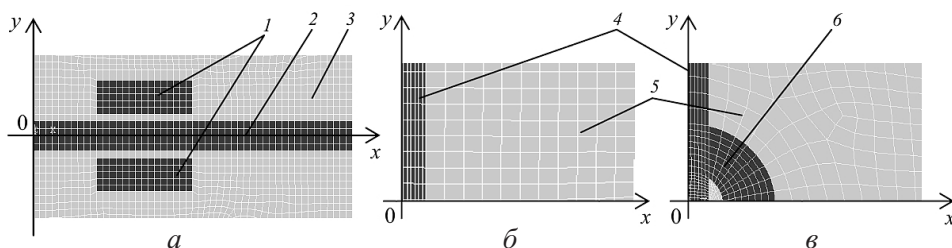


Рис. 4. Схемы конечноэлементных моделей (фрагменты), использовавшихся при моделировании: а – воздействия ИЭМП на пластину без сварного шва ( $y$  – ось симметрии, 1 – индукторы, 2 – пластина, 3 – окружающее пространство (воздух)); б – ОСН (4 – сварной шов, 5 – пластина); в – воздействия на пластину с ОСН нагревом по кольцевой области (6 – область нагрева, соответствующая размерам индуктора).

Плотность тока в поперечном сечении индуктора вычисляли по величине тока  $I$  в цепи разряда и площади поперечного сечения витков  $s$  с учетом коэффициента плотности заполнения объема индуктора  $\xi$ :

$$i(t) = \xi I(t)/s.$$

Изменение во времени плотности синусоидально затухающего тока в поперечном сечении индуктора, по которому определяется плотность индуцированного тока в пластине, задавали в виде

$$i(t) = \xi i_0 \exp(-t/t_{ИЭТ}) \sin(2\pi t/t_{ИЭТ}),$$

где  $i_0$  – номинальная плотность тока,  $t_{ИЭТ}$  – период колебаний разрядного тока. Расчеты выполняли для импульса тока с амплитудой 35 кА, периодом колебаний 0,32 мс и затуханием за 3 периода колебаний тока, зарегистрированных при проведении экспериментальных исследований, и  $\xi = 0,7$ .

Основные результаты численного моделирования обработки пластины ИЭМП приведены на рис. 5 и 6. Как следует из приведенных результатов, величина плотности индуцированного тока в пластине выше плотности в индукторе. Повышение температуры в пластине за первых два периода затухающих колебаний индуцированного тока составляет менее 30°C (рис. 5,а). При этом возникают термические напряжения: максимальные сжимающие (менее 35 МПа) и растягивающие (около 15 МПа). Очевидно, что напряжения такого уровня не могут вызвать пластической деформации материала пластины, поэтому после остывания в пластине отсутствуют остаточные напряжения.

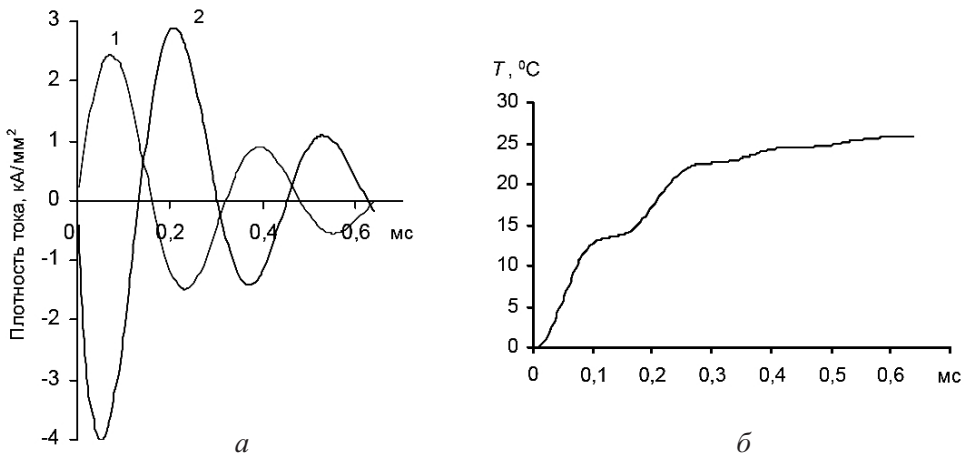


Рис. 5. Изменение во времени плотности тока в индукторе (1) и пластине (2) – а, а также температуры на поверхности пластины – б под витками индуктора.

Для определения рассчитанного выше термического воздействия на ОСН были выполнены следующие два этапа моделирования. На втором этапе с использованием модели, приведенной на рис. 4,б (плоское напряженное состояние), были рассчитаны ОСН. Их определяли исходя из начального нагрева зоны плавления шириной 12 мм до температуры 600°C, при которой сопротивлением

алюминия деформации практически можно пренебречь, и последующего охлаждения этой зоны. Остывание металла сварного шва вызывает растягивающие напряжения в шве вдоль его оси и сжимающие в околошовной зоне. Распределение расчетных ОСН, параллельных оси шва, приведено на рис. 7.

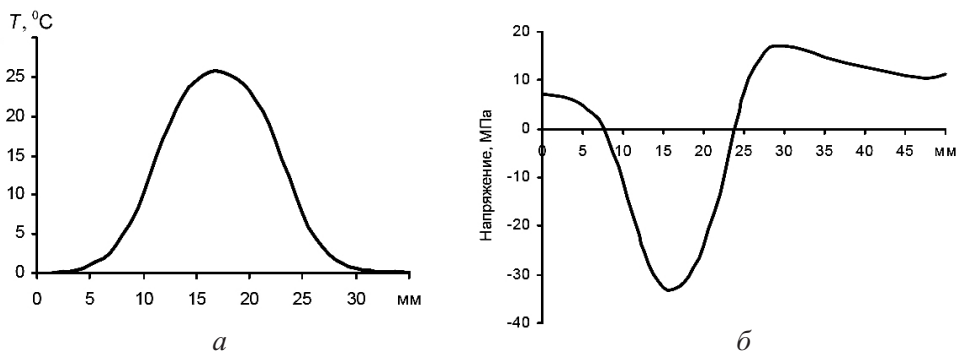


Рис. 6. Распределение температуры (а) и окружного напряжения (б) в радиальном направлении в пластине после окончания действия индукционного тока (через 0,65 мс).

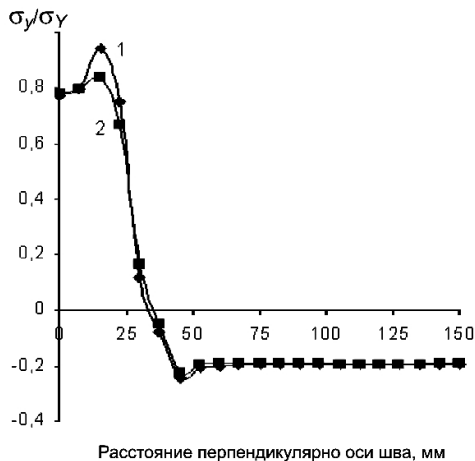


Рис. 7. Распределение расчетных ОСН, параллельных оси шва, после сварки (1) и нагрева индуцированным током до 30°С в результате действия ИЭМП (2).

На третьем этапе моделировали термическое воздействие ИЭМП на НДС пластины со сварным швом. Задачу решали, используя в качестве начальных условий поле ОСН, полученное после сварки пластины. Затем по кольцевой области, ограниченной внешним и внутренним диаметрами индуктора (рис. 4,б), задавали нагрев до средней температуры 30°С, рассчитанной ранее при решении осесимметричной задачи моделирования действия ИЭМП. После остывания кольцевой области получали окончательное НДС в пластине со сварным швом.

По результатам расчетов окружные сжимающие напряжения в пластине, вызванные повышением температуры при воздействии ИЭМП и достигающие максимума к моменту окончания действия тока, не превышают 35 МПа. Их суммирование с ОСН, выполненное на третьем этапе моделирования, незначительно снижает уровень растягивающих напряжений в околошовной зоне



без заметного влияния на НДС в других частях пластины (на рис. 7 кривая 2) и не может вызывать неупругого деформирования и перераспределения ОСН. Растягивающие напряжения вне области действия тока (около 15 МПа) недостаточны для неупругого деформирования металла как в зоне шва, так и вне ее и также не вызывают перераспределения напряжений. После охлаждения распределение ОСН возвращается к исходному (до действия ИЭМП).

**Анализ результатов.** Экспериментальные результаты (рис. 3) свидетельствуют о весьма значительном влиянии обработки ИЭМП на перераспределение ОСН. Вместе с тем, исходя из результатов численного моделирования (рис. 7), можно сделать вывод, что эффект обработки ИЭМП не объясняется термическим действием электрического тока, индуцированного в пластине, поскольку возникающие термические напряжения в итоге не вызывают перераспределения ОСН.

Другим механизмом влияния на релаксационные процессы под воздействием внешнего электромагнитного поля является эффект магнитострикции, вызывающий смещение и деформацию кристаллической решетки металла [13]. Однако в нашем случае был взят немагнитный металлический материал, следовательно, такой механизм также не может быть использован при анализе результатов.

Эффект перераспределения ОСН может быть связан с нетепловым действием индуцированного тока – снижением сопротивления деформации за счет электропластического эффекта. Природа этого эффекта исследована недостаточно. Однако, исходя из литературных данных, его можно определить как специфическое действие импульсного тока, приводящее к изменениям в материале вследствие микронеоднородного локализованного выделения тепла на дефектах структуры [14, 15], а также непосредственного взаимодействия электронов проводимости (электронного ветра) с такими дефектами кристаллической решетки, как дислокации [16], что увеличивает их подвижность. При оптимальных режимах обработки импульсным электрическим током высокой плотности указанные причины создают условия для развития неупругих деформаций (микросдвигов) в области дефектов кристаллической структуры, приводящих к релаксации полей микронапряжений. Кумулятивный эффект этих микросдвигов проявляется на макроуровне в виде релаксации остаточных напряжений первого рода, каковыми являются ОСН.

Дополнительным фактором, который может оказывать влияние на поле ОСН, является нестационарность приложения термической нагрузки. Как указывалось выше, само по себе термическое влияние не оказывает воздействия на ОСН (рис. 7), однако следует учесть, что эта термическая нагрузка прилагается в течение достаточно короткого времени (порядка 0,3 мс), что может активировать релаксационные процессы в металле подобно тому, как это происходит при акустических методах обработки [17].

В результате перераспределения ОСН при обработке ИЭМП этот эффект более выражен в центральной части шва (рис. 3,а), тогда как вдоль шва он отличается неоднородностью (рис. 3,б). Последнее обстоятельство, по-видимому, определяется повторяющимся локализованным воздействием обработки, выполняемой путем дискретного перемещения индукторов вдоль сварного шва. Повышенный уровень релаксации ОСН в центральной части шва

может быть связан с отличием структуры и свойств металла в этой зоне по сравнению с околосварной зоной, определяющим различную чувствительность к обработке, что следует подтвердить дальнейшими металлофизическими исследованиями.

## Выводы

1. Обработка ИЭМП пластины из алюминиевого сплава со сварным швом вызывает существенное снижение и перераспределение ОСН.

2. Нетепловые эффекты, сопровождающие действие ИЭМП, вносят основной вклад в снижение (релаксацию) ОСН.

## Резюме

Результати експериментальних досліджень показують, що в зразках зі сплаву АМг6 після обробки має місце суттєве зменшення і перерозподіл залишкових зварних напружень. Дані числового моделювання дозволяють стверджувати, що ефект обробки не пов'язаний з термічною дією поля.

1. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. – Киев: Вища шк., 1987. – 246 с.
2. Петушков В. Г., Кудинов В. М., Фадеенко Ю. И. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций. – М.: Металлургия, 1993. – 160 с.
3. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 216 с.
4. Труфяков В. И., Михеев П. П., Кузьменко А. З. Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость распространения усталостных трещин // Пробл. прочности. – 1980. – № 6. – С. 20 – 22.
5. Спицин В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
6. Степанов Г., Бабуцкий А., Мамеев И. Вплив імпульсного електричного струму на релаксацію залишкових зварювальних напружень // Вісн. Терн. держ. техн. ун-ту. – 2007. – № 3. – С. 16 – 22.
7. Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Скульский В. Ю., Логинов В. П. Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей // Автомат. сварка. – 2006. – № 5. – С. 11 – 15.
8. Глинберг А. Д., Карандашев Н. А., Крутин А. Ф. Практика и перспективы применения магнитно-импульсной обработки материалов: Тез. докл. междунар. конф. “Действие электромагнитных полей и тока на материалы” (21–24 окт. 2003). – М., 2003. – С. 55 – 57.
9. Tang F., Lu A. L., Mei J. F., et al. Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field // J. Mater. Proc. Tech. – 1998. – 74. – P. 255 – 258.



10. *Lu A. L., Tang F., Luo X. J., et al.* Research on residual stress reduction by strong pulsed magnetic treatment // *Ibid.* – P. 259 – 262.
11. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И.* Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // *Автомат. сварка.* – 2006. – № 1. – С. 10 – 13.
12. <http://www.jahm.com>
13. *Малыгин Б. В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
14. *Беклемишев Н. Н., Корягин Н. И., Шапиро Г. С.* Влияние локально неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // *Металлы.* – 1985. – № 4. – С. 184 – 187.
15. *Баранов Ю. В.* Физическая модель структурных изменений металлических материалов при воздействии импульсного электрического тока // *Пробл. машиностроения и надежности машин.* – 2000. – № 4. – С. 57 – 65.
16. *Кравченко В. Я.* Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* – 1966. – **51**, вып. 6 (12). – С. 1677 – 1688.
17. *Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Шведла Ш.* Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Поступила 30. 06. 2009