



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.07

УДК 539.3

ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

К.В. Кукуджанов, А.Л. Левитин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 ноября 2014 г.
Принята: 20 января 2015 г.
Опубликована: 31 марта 2015 г.

Ключевые слова:

электропластичность, прямое численное моделирование, материал с дефектами, локализация электромагнитного поля и температуры, плавление, испарение

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются процессы, протекающие в материале при обработке металлических образцов кратковременными импульсами электрического тока большой плотности. Изучаются процессы, происходящие в окрестности микродефектов материала в форме плоских трещин при воздействии на них электрического тока. Задача решается численно для представительного элемента материала с трещиной в динамической постановке. Решение ищется в два этапа методом конечных элементов. На первом этапе исследуется термоэлектродинамическая задача, чтобы получить распределение температуры и в области фазовых превращений в материале. Зоны, в которых происходили фазовые превращения (плавление и испарение материала), рассчитывались сквозным способом без явного выделения границ раздела фаз. На втором этапе решается нестационарная связанная термомеханическая задача деформирования нагретого упругопластического образца с учетом начального распределения поля температур в материале, полученного на первом этапе, в разные моменты времени. Дополнительно термомеханическая задача решалась в квазистатической постановке с целью получения поля перемещений (остаточных деформаций) после выравнивания температуры в материале.

Прослеживается влияние размера и пространственной ориентации микротрещин на локализацию электромагнитного поля в области дефекта. Расчеты на основе предложенной модели показывают, что плотность тока в вершинах микротрещин может на порядок превышать плотность тока, приложенную к образцу. Моделирование показало, что в окрестности микродефектов возникают большие градиенты электромагнитного поля и плотности тока, что приводит к интенсивному нагреву, плавлению и испарению металла в кончиках микротрещины. Под действием возникающих температурных напряжений расплавленный материал вытекает в трещину. Одновременно происходит его испарение. Берега микротрещины сближаются. Все это приводит к «залечиванию» дефектов.

© ПНИПУ

© Кукуджанов Константин Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kconstantin@mail.ru

Левитин Александр Леонидович, младший научный сотрудник, e-mail: alex_lev@ipmnet.ru

Konstantin V. Kukudzhanov, PhD, Senior Researcher, e-mail: kconstantin@mail.ru

Alexander L. Levitin, Junior Researcher, e-mail: alex_lev@ipmnet.ru

DEFORMATION PROCESSES OF ELASTOPLASTIC MATERIAL WITH DEFECTS UNDER ELECTRODYNAMIC LOADING

K.V. Kukudzhinov, A.L. Levitin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 November 2014
Accepted: 20 January 2015
Published: 31 March 2015

Keywords:

electroplasticity,
direct numerical modelling,
defective material,
electromagnetic field
and temperature localization,
melting, evaporating

ABSTRACT

The processes occurring in the metallic samples under the impact of electrical current of high density are considered. The processes occurring in the vicinity of microdefects in the form of flat cracks under the action of electric current are studied. The dynamic problem is solved numerically for a representative element of the material with crack. The problem is solved in two stages using finite elements method. At the first stage, we have studied the thermal electrodynamic problem in order to obtain the temperature distribution and the regions of phase transformations in the material. Regions of the phase transformations (melting and evaporation of the material) are cross-calculated without the explicit allocation of the phase boundaries. At the second stage, we have solved a coupled unsteady thermomechanical problem of deformation of the heated elastoplastic sample taking account of the initial temperature field distribution in the material obtained at the first stage at different moments of time. Additionally, quasistatic thermomechanical problem was solved in order to obtain the displacement field (residual strain) after temperature equalization in the material.

The influence of the size and orientation of microcracks on the localization of the electromagnetic field in the region of the defect is examined. The calculations on the base of the proposed model show that the current density at the tips of the microcracks may by an order exceed the current density applied to the sample. Numerical modelling has shown, that large gradients of electromagnetic field and current arise in the vicinity of the microdefects, which leads to intensive heating, melting and evaporation of the metal in the tips of the microcracks. The melted material flows into the microcrack under the action of thermal stresses. At the same time the metal starts to evaporate. The shores of the microcracks converge. All these processes lead to a "healing" of defects.

© PNRPU

Введение

Хорошо изученным и давно применяемым технологическим способом обработки металлов и сплавов является разогрев заготовки электрическим током небольшой плотности $j \approx 10 \text{ A/m}^2$ и большим временем действия $\tau \approx 10^3 \text{ с}$. Такое воздействие приводит к общему (интегральному) разогреву материала, уменьшению абсолютных значений его механических характеристик и облегчает инструментальную обработку нагретой заготовки. С другой стороны, если воздействие электромагнитным полем на проводящий материал сделать интенсивным и кратковременным, подвергнув его воздействию тока плотностью $j \approx 10^9 \text{ A/m}^2$ и временем действия $\tau \approx 10^{-4} \text{ с}$, то это может существенно улучшить пластические свойства материала, увеличивая его пластические деформации при разрушении (от нескольких десятков до сотни процентов для разных материалов и сплавов [1–2, 5, 7, 8–11]). Это явление было названо электропластическим эффектом. Несмотря на то, что данный эффект широко используется в промышленности, до сих пор отсутствует единое мнение о природе этого явления, а дискуссия о его фундаментальных основах и физическом механизме еще продолжается [1–23]. Принципиально отличным является увеличение предельной пластической деформации за счет иных механизмов воздействия электромагнитного поля, нежели при интегральном разогреве [14–15, 18–19]. При этом материал сохраняет свои пластические свойства в течение всего времени после окончания действия тока (эффект имеет устойчивый остаточный характер), что позволяет применять

данный эффект в производстве, как при одновременном, так и при последовательном электромеханическом воздействии.

Одним из объяснений электропластического эффекта является гипотеза о перестройке (изменении) системы дефектов в материале под действием тока электромагнитного поля [3, 12–15]. В работах [12, 13] были представлены теоретические исследования по объяснению данного эффекта и показано, что в теле с дефектами в виде дискообразных трещин при стационарном поле температур, которое возникает после воздействия электрического тока, происходит частичное закрытие разрезом (трещин). В работах [14–17] для нестационарного поля температуры были получены результаты по закрытию дефектов в виде разрезом, а также распределения сжимающих пластических напряжений, приводящих к частичному «залечиванию» цилиндрических дефектов. В работах [18–19] была предложена квазистатическая модель термоэлектропластического деформирования материала и численный метод решения получающейся системы уравнений, на основе которых были решены задачи по деформированию и разрушению репрезентативных элементов материала, содержащих как единичные мезо- и макродефекты, так и их упорядоченную совокупность в виде плоских трещин и цилиндрических пор при различных режимах электродинамического и термомеханического нагружений. Показано, что в образце под действием электрического тока вблизи макротрещин и пор возникает неоднородное температурное поле с локализацией температуры, которая достигает температуры плавления в их вершинах (кончиках), и приводит к выплавлению материала и «схлопыванию» дефектов типа разрезом и плоских трещин. Образование пор приводит к снижению условного предела текучести и увеличению предельной пластической деформации.

Настоящая работа является продолжением цикла работ [18–21] и посвящена исследованию процессов, протекающих в окрестности микродефектов материала при обработке металлических образцов электрическим током. В ней модель, предложенная в [18–19], развита с целью исследования динамических процессов, происходящих на уровне микродефектов при малых временах воздействия электромагнитным полем на материал ($\tau \approx 10^{-4}$ с) с учетом его фазовых превращений. На основе построенной модели решается задача о кратковременном воздействии электромагнитного поля на плоские макротрещины. Исследуются изменения электромагнитного, температурного полей, фазовых переходов и напряженно-деформированного состояния в окрестности макротрещин во времени. Понимание этих процессов позволит глубже понять механизм электропластического эффекта с точки зрения гипотезы о перестройке структуры дефектов в материале, приблизиться к объяснению экспериментально наблюдаемых изменений термомеханических свойств материала и использовать полученные результаты моделирования при разработке технологических способов обработки материалов.

1. Постановка задачи

Рассматривается токопроводящий материал с упорядоченной структурой дефектов, который состоит из периодически распределенных представительных элементов, как показано на рис. 1, содержащих дефекты типа плоских макротрещин. Материал подвергается воздействию короткоимпульсного высокоэнергетического электромагнитного поля определенной интенсивности (плотность тока от 10^8 до 10^{11} А/м²) и продолжительности (до

100 мкс). При этом ставится задача исследовать во времени процессы изменения электрического и температурного полей в материале и их влияние на фазовые трансформации и напряженно-деформированное состояние в окрестности микродефектов. Для решения поставленной задачи предлагается динамическая модель воздействия электромагнитного и температурного полей на предварительно поврежденный материал с дефектами, описывающая этот процесс поэтапно. Задача решалась методом конечных элементов в два временных этапа.

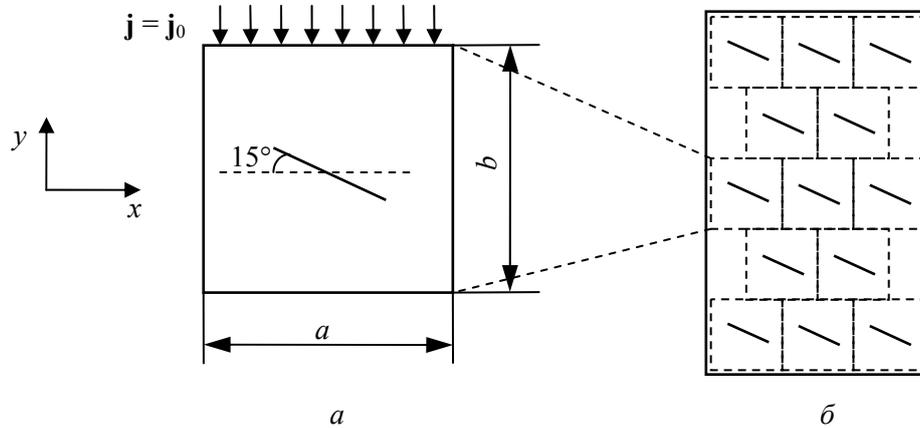


Рис. 1. Представительный элемент (а) и упорядоченная структура дефектов (б)

На первом этапе решается электротермическая задача для представительных элементов (объемов) материала с дефектами в форме плоских трещин с целью получения полей электрического потенциала, плотности тока и температуры в образце в зависимости от времени. Первый этап заканчивается с окончанием действия электромагнитного поля на материал.

На втором этапе в той же области интегрирования решается термомеханическая задача с начальным распределением поля температур в материале, полученном на первом этапе. Основной целью на втором этапе является получение полей перемещений, скоростей и напряжений в образце во время и после электромагнитного воздействия, а также поля температуры. При этом в качестве начального поля температуры при моделировании использовались как поля температуры в различные моменты времени до окончания действия электрического тока на материал, так и поле температуры, сформировавшееся в материале на момент окончания действия тока. Дополнительно термомеханическая задача решалась в квазистатической постановке с целью получения поля перемещений (остаточных деформаций) после выравнивания температуры в материале.

Данная постановка задачи обусловлена как физической возможностью разделения сложного явления на отдельные процессы (электротермический и термомеханический) ввиду кратковременности воздействия электромагнитного поля на материал, так и сложностью одновременного решения уравнений связанной электротермопластичности, в том числе ввиду ограниченности машинного времени.

2. Основные уравнения электротермомеханической модели

Для расчета электрического потенциала и температуры в токопроводящем материале на первом этапе используется закон сохранения заряда в совокупности с законом Ома в виде

$$\int_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V r_c dV, \quad (1)$$

$$\mathbf{j} = \sigma^E \mathbf{E} = -\sigma^E \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}}, \quad (2)$$

где V – произвольный объем с поверхностью S ; \mathbf{n} – внешняя нормаль к S ; \mathbf{j} – плотность тока и r_c – внутренний объемный источник тока на единицу объема; $\mathbf{E}(x)$ – интенсивность электрического поля, определенная как отрицательный градиент электрического потенциала $\mathbf{E} = -\partial\varphi/\partial\mathbf{x}$; φ – электрический потенциал; $\sigma^E(T)$ – матрица электропроводности; T – температура.

Из уравнений (1) и (2) получаем основное уравнение конечно-элементной модели в вариационной форме:

$$\int_V \frac{\partial \delta \varphi}{\partial \mathbf{x}} \sigma^E \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_S \delta \varphi j dS + \int_V \delta \varphi r_c dV, \quad (3)$$

где $j = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{n}$ – плотность тока, интегрируемая по нормали к поверхности S ; $\delta \varphi$ – вариации электрического потенциала.

Для получения на первом и втором этапах поля температур используется закон сохранения энергии:

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV, \quad (4)$$

где ρ – плотность; \dot{U} – материальная производная внутренней энергии; q – поток энергии через поверхность на единицу площади и r – тепловая энергия в единице объема в текущей конфигурации тела.

Тепловой поток \mathbf{f} определяется законом Фурье:

$$\mathbf{f} = -\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}}, \quad (5)$$

где $\mathbf{k} = \mathbf{k}(T)$ – матрица теплопроводности материала.

Вариационная формулировка уравнения баланса энергии (4) применяется в виде слабой формы Бубнова-Галеркина:

$$\int_V \rho \dot{U} \delta T dV + \int_V \frac{\partial \delta T}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta T r dV + \int_{S_q} \delta T q dS, \quad (6)$$

где δT – вариации поля температур, удовлетворяющие граничным условиям.

При моделировании учитывается закон Джоуля–Ленца, описывающий интенсивность электрической энергии, рассеиваемой током, который течет по проводнику:

$$P_E = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}}. \quad (7)$$

Количество электрической энергии, выделяемой в виде внутреннего тепла,

$$r = \eta P_E, \quad (8)$$

где η – соответствующий коэффициент Тейлора–Куни преобразования электрической энергии в тепловую.

Количество электрической энергии, высвобождающейся на поверхности тела, имеет вид

$$q_E = f \eta_g P_E, \quad (9)$$

где η_g – поверхностный коэффициент преобразования энергии в тепловую; f – определяет полное распределение тепла между внешними поверхностями.

Уравнение баланса импульса в вариационной формулировке принимает вид

$$\int_V \rho \ddot{\mathbf{u}} \delta \mathbf{u} dV = \int_V \boldsymbol{\sigma} \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_V \rho \mathbf{b} \delta \mathbf{u} dV - \int_S \mathbf{t} \delta \mathbf{u} dS, \quad (10)$$

где \mathbf{u} – вектор перемещений; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор полных деформаций; \mathbf{b} – вектор объемных (массовых) сил; \mathbf{t} – вектор поверхностных сил; $\delta \mathbf{u}$ и $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ – вариация перемещений и соответствующих им полных деформаций.

После применения конечно-элементной аппроксимации вида $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = [N(\mathbf{x})]\{U(t)\}$ (здесь $\{U(t)\}$ – вектор узловых перемещений; $[N(\mathbf{x})]$ – матрица функций формы) (10) может быть представлено в виде

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K^{ep}]\{U\} = \{F\}, \quad (11)$$

где $[M] = \int_V [N]^T [N] \rho dV$ – матрица масс; $[K^{ep}] = \int_V [B]^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int_V [B]^T [D^{ep}] [B] \{\boldsymbol{\varepsilon}\} dV$ – матрица массы; $\{F\} = \int_V [N]^T \rho \mathbf{b} dV + \int_S [N]^T \mathbf{t} dS$ $\{F\}$ – вектор сил, действующих на узлы тела; $[B(\mathbf{x})]$ – матрица градиентов, $[D^{ep}]$ – касательные модули упругопластического тела.

По времени принимается аппроксимация центральной разностью в соответствии со схемой Лакса-Вендроффа:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}^{(n+1/2)} &= \dot{\mathbf{U}}^{(n-1/2)} + \frac{\Delta t^{(n+1)} + \Delta t^{(n)}}{2} \ddot{\mathbf{U}}^{(n)}, \\ \mathbf{U}^{(n+1)} &= \mathbf{U}^{(n)} + \Delta t^{(n+1)} \dot{\mathbf{U}}^{(n+1/2)}, \\ \ddot{\mathbf{U}}^{(n)} &= [M]^{-1} (\{F\} - [K^{ep}]\{U\}), \end{aligned} \quad (12)$$

на начальном шаге известны начальные узловые скорости $\dot{\mathbf{U}}^{(0)}$, откуда имеем $\dot{\mathbf{U}}^{(-1/2)} = \dot{\mathbf{U}}^{(0)} - \frac{\Delta t^{(1)}}{2} \ddot{\mathbf{U}}^{(0)}$.

Расчеты производились с помощью вычислительного пакета «АСТРА», разработанного в лаборатории моделирования в МДТТ ИПМех РАН под руководством проф. Н.Г. Бураго. Приведенные расчеты производились в двумерной постановке с использованием линейных четырехузловых изопараметрических конечных элементов.

Тензор полных деформаций образца термопластического материала

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{el} + \boldsymbol{\varepsilon}^{pl} + \boldsymbol{\varepsilon}^{th}, \quad (13)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}^{el}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^{th}$ – тензоры упругих, пластических и температурных деформаций. Температурная деформация в дифференциальной форме имеет вид

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \alpha(T) dT, \quad (14)$$

где α – коэффициент термического расширения.

Для упругих и пластических деформаций принимается соответственно закон Гука и ассоциированный закон течения с условием пластичности Мизеса:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{I} + 2\mu (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}), \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}} = \dot{\lambda} \mathbf{s}, \quad \bar{\sigma} = \sigma_Y, \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad (15)$$

где $\sigma_Y = \sigma_Y(T)$ – предел текучести; \mathbf{s} – девиатор тензора напряжений.

Тепловая энергия на единицу объема в текущей конфигурации тела за счет диссипации пластической деформации принимается в виде

$$r = \eta \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}}, \quad (16)$$

где η – доля неупругой энергии, идущей на образование тепла; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}}$ – тензор скорости пластической деформации.

Уравнения (3), (6)–(9), (16) образуют полную систему уравнений электротермической задачи. Уравнения (6)–(10), (13)–(16) образуют полную систему уравнений термомеханической задачи.

В предлагаемой модели связность задач (электрической и тепловой, механической и тепловой) учитывалась также посредством зависимости всех физико-механических характеристик материала (плотности, удельной теплоемкости, электропроводности, коэффициента температурного расширения, упругих модулей, предела текучести и т.д.) от температуры.

Поскольку время электромагнитного воздействия на материал не превышало 10^{-4} с, на первом этапе будем решать задачу в адиабатическом приближении.

На границе области интегрирования для электротермической задачи принимаются следующие условия: при $y = 0$, $y = b$ задавались постоянные по x плотность тока (или разность потенциалов), а также условие отсутствия теплового потока по касательной к границе; при $x = 0$, $x = a$ плотность тока и тепловой поток по нормали к границе считались нулевыми. Начальная температура полагалась постоянной (0°C), а потенциал нулевым.

При решении термомеханической задачи начальное распределение температуры в представительном элементе бралось из решения электротермической задачи, а начальные значения поля перемещений принимались нулевыми. Для температуры граничные условия задавались такими же, как в электротермической задаче. Для перемещений задавалось условие симметрии при $y = 0$, $y = b$ и условие периодичности при $x = 0$, $x = a$.

3. Фазовые превращения материала

Зоны, в которых происходили фазовые превращения (плавление и испарение материала), рассчитывались сквозным способом без явного выделения границ раздела фаз.

Считалось, что материал расплавился при достижении в узле температуры $T > T_{\text{melt}}$, где T_{melt} – температура плавления материала. В узлах, где материал расплавился, происходило скачкообразное изменение всех физических свойств материала: электропроводности, теплоемкости, плотности, коэффициента линейного расширения и всех прочих механических характеристик материала. Такое изменение свойств материала соответствует имеющимся экспериментальным данным [24–26]. На рис. 2 представлены данные об изменениях некоторых из этих характеристик в зависимости от температуры для цинка.

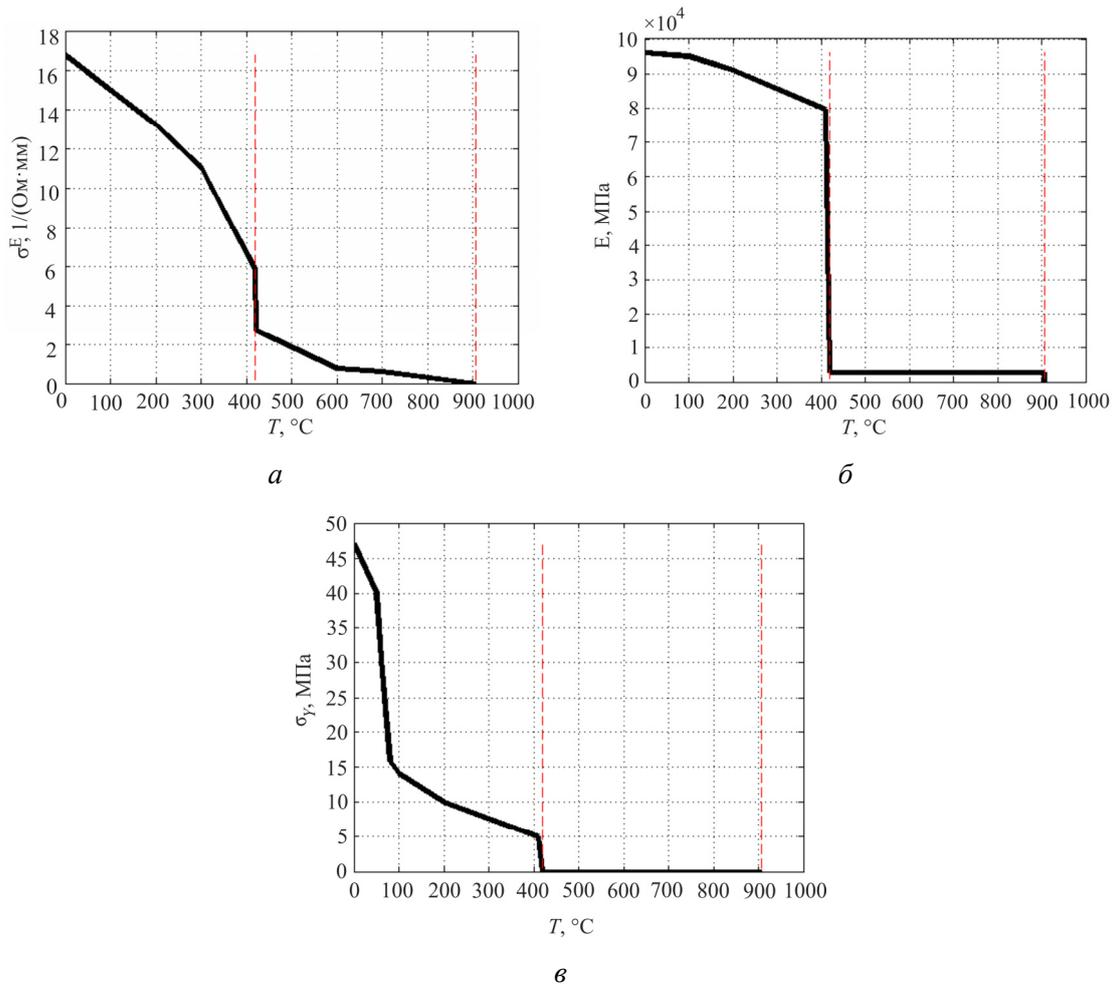


Рис. 2. Зависимости электропроводности σ^E (а); модуля Юнга E (б); предела текучести σ_Y (в) от температуры T (вертикальными штриховыми линиями отмечены температура плавления $T_{\text{melt}} = 419^\circ\text{C}$ и испарения $T_{\text{evap}} = 906^\circ\text{C}$).

Таким образом, в рамках предлагаемой модели при достижении температуры плавления материал не теряет способности проводить электрический ток (рис. 2, а) и происходит дальнейшее нагревание расплава. Происходящее при этом падение упругих модулей и предела текучести (рис. 2, б, в) позволяет описывать дальнейшее поведение материала уравнениями (15) и проводить сквозной расчет, не меняя численную схему.

Считалось, что материал испарился при достижении в узле температуры $T > T_{\text{evap}}$, где T_{evap} – температура испарения материала. При этом в узлах, где материал испарился, полагались: плотность тока $j = 0$, температура $T = T_{\text{evap}}$, тензор напряжений $\sigma = 0$.

Таким образом, в рамках предлагаемой модели при достижении температуры испарения материал теряет способность проводить электрический ток, его дальнейшего нагревания не происходит. Считается, что испарение металла через трещину происходит с такой же скоростью, что и в вакуум, т.е. равной скорости звука. При этом он утрачивает свойства вязкой жидкости и моделируется разреженным газом.

4. Результаты численного моделирования

Все расчеты выполнялись для случая плоской деформации. Плотность тока или разность потенциалов на границе представительного элемента были постоянными в течение всего времени действия электромагнитного импульса.

При пропускании электрического тока через образец с дефектами (см. рис. 1) в окрестности дефектов в виде плоских трещин или цилиндрических пор возникают большие градиенты электрического потенциала, приводящие к резким изменениям поля плотности тока, в том числе к существенному увеличению плотности тока в окрестности вершин (кончиков) трещин или на краях пор по сравнению с плотностью тока, приложенного к образцу. Заметим, что плотность тока в образце без дефектов постоянна на расстояниях порядка характерных размеров представительного элемента и равна плотности приложенного тока. Увеличение плотности тока в кончиках мезо- и макротрещин или краях пор, в свою очередь, приводит к их сильному локальному разогреву [18–21].

Для микротрещин размером порядка 10 мкм расчеты по предлагаемой модели показывают, что плотность тока в их кончиках может на порядок превышать плотность тока, приложенного к образцу. На рис. 3, *а* показана зависимость максимальной плотности тока j (А/мм²) в вершине плоской микротрещины с закругленным кончиком от ее длины l (мкм) в образце из цинка, подверженном воздействию импульсом тока величиной $1,5 \cdot 10^2$ А/мм². Расстояние между берегами и радиус кривизны в кончике микротрещин принималось равным 1 мкм. При этом количество дефектов в образце предполагалось постоянным. Заметим, что максимальная плотность тока в кончике трещины также на порядок превышает и плотность тока в образце, рассчитанную для уменьшенной площади поперечного сечения образца в связи с появлением в нем микротрещин. Это свидетельствует о существенной неоднородности поля плотности тока и, следовательно, температуры в образце с микротрещинами.

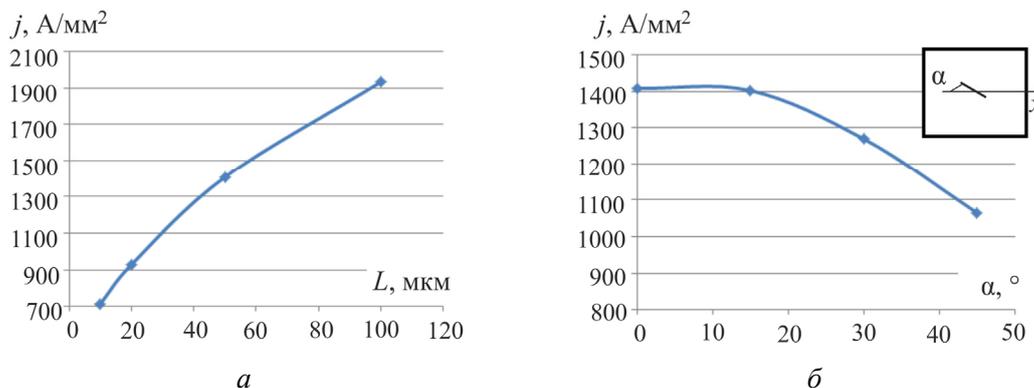


Рис. 3. Зависимость плотности тока от размера микротрещины (*а*); от наклона (*б*)

Из приведенного графика видно, что увеличение размера микротрещины на порядок приводит к уменьшению максимальной плотности тока в ее вершине лишь в 2,8 раза.

На рис. 3, *б* показана зависимость максимальной плотности тока j (А/мм²) в верхнем кончике плоской микротрещины длиной 50 мкм от угла наклона плоскости трещины к оси x в образце из цинка, подверженном воздействию импульсом тока величиной $1,5 \cdot 10^2$ А/мм². Расстояние между берегами и радиус кривизны в кончике микротрещин принималось равным 1 мкм. Из графика видно, что максимальная плотность тока в кон-

чике трещины остается практически постоянной в диапазоне углов 0–15°. При дальнейшем увеличении угла максимальная плотность тока в кончике трещины нелинейно уменьшается. Тем не менее это падение незначительно (не превышает 25 %) при изменении угла в достаточно большом диапазоне углов, охватывающем наиболее вероятные углы образования дефектов при предварительном пластическом деформировании металла перед обработкой материала током (это деформирование осуществляется в направлении тока вдоль оси y или $\alpha = 90^\circ$).

На рис. 4 показаны соответственно поля плотности тока (*а*) и температуры (в момент времени $t = 37,5$ мкс) (*б*) в окрестности вершины микротрещины длиной 50 мкм с углом наклона к оси x , равным 15°, для образца из цинка, подверженного воздействию импульсом тока величиной $7,3 \cdot 10^3$ А/мм² и длительностью 50 мкс. Размеры представительного элемента $a = 400$ мкм, $b = 375$ мкм.

В результате моделирования получено, что на берегах микротрещины имеются области (на расстоянии 18 мкм от вершины трещины), в которых плотность тока составляет всего 30 А/мм², т.е. более чем в 100 раз меньше плотности приложенного тока, в то время как в области кончиков микротрещины плотность тока на порядок превышает плотность приложенного тока. Таким образом, возникающие в результате воздействия в окрестности микродефектов большие градиенты электромагнитного поля вызывают изменения плотности тока на микрорасстояниях в 1000 и более раз. Это обстоятельство приводит к быстрому росту температуры и плавлению материала. На рис. 4 зоны, в которых материал расплавился, хорошо видны в кончиках трещины.

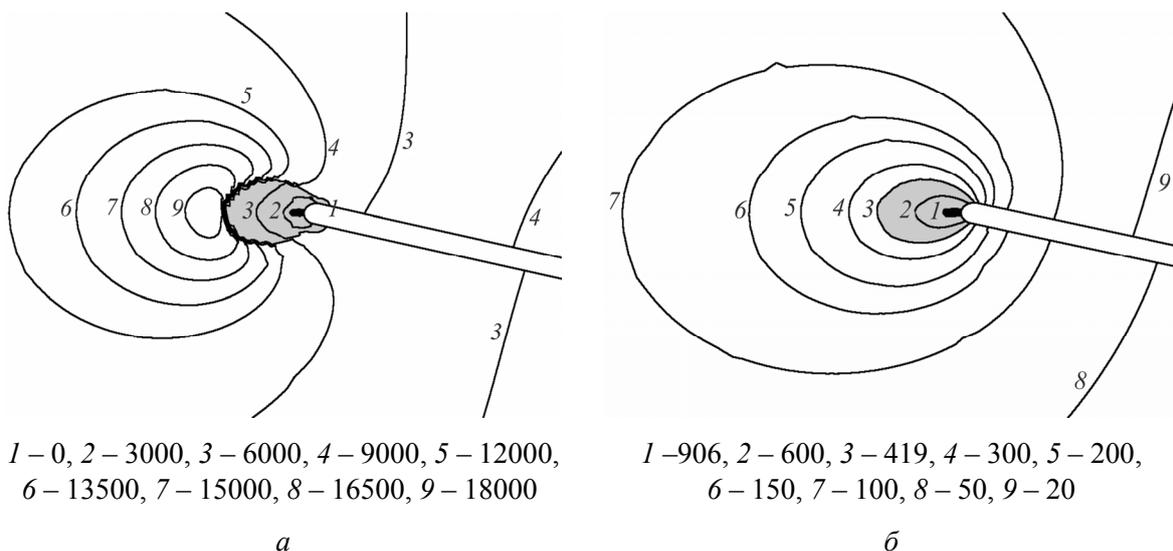


Рис. 4. Изолинии тока А/мм² (*а*) и температуры °С при $t = 37,5$ мкс (*б*); черным обозначена область испарения, серым – область плавления

Однако возникающие при электромагнитном воздействии поля плотности тока и температуры в кончике трещины довольно быстро приводят не только к плавлению, но и испарению материала. На рис. 5 представлены соответственно зависимости максимальной плотности тока j (А/мм²) и температуры T (°С) в верхнем кончике плоской микротрещины длиной 50 мкм от времени t (мкс). Из графиков видно, что максимальная плотность тока в вершине трещины падает с ростом температуры и в момент времени

$t = 6$ мкс температура достигает величины $T_{\text{melt}} = 419$ °С, после чего начинается плавление материала, сопровождаемое резким падением плотности тока. Дальнейшее падение плотности тока и рост температуры замедляются, но уже в момент времени $t = 28$ мкс температура в вершине микротрещины достигает критической величины ($T_{\text{evap}} = 906$ °С), и начинается интенсивное испарение материала с переносом его внутрь дефекта. На рис. 4 зоны, в которых материал испарился, хорошо видны в кончиках трещины.

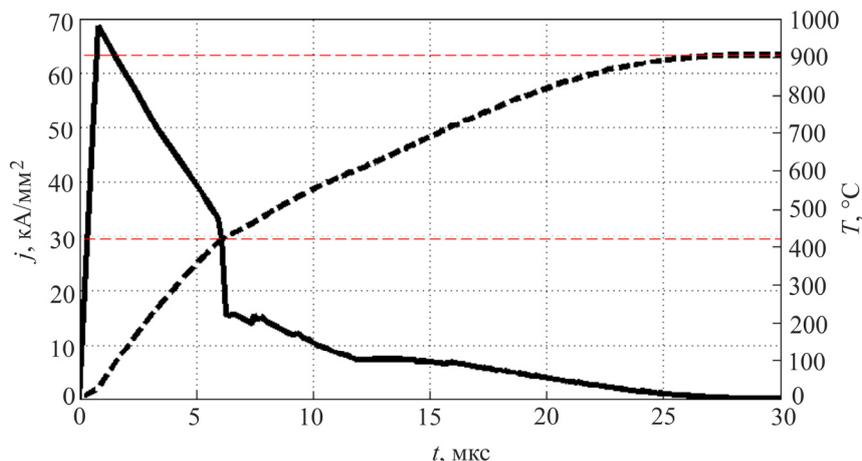


Рис. 5. Зависимость плотности тока j , кА/мм² (сплошная линия) и температуры T , °С (штриховая линия) в вершине трещины от времени в микросекундах (горизонтальными штриховыми линиями отмечены температура плавления $T_{\text{melt}} = 419$ °С и испарения $T_{\text{evap}} = 906$ °С).

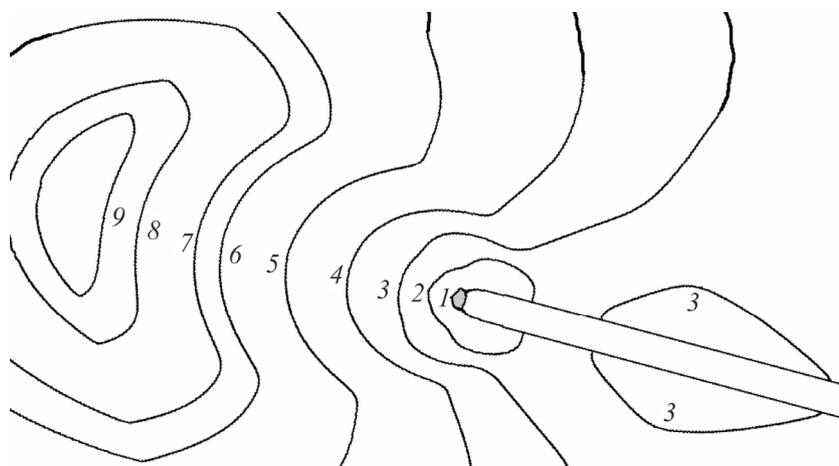


Рис. 6. Давление в верхнем кончике трещины в момент времени $t = 6,25$ мкс (серым отмечена область растяжения; 1 – 0; 2 – 15; 3 – 25; 4 – 40; 5 – 60; 6 – 75; 7 – 80; 8 – 90; 9 – 95 МПа)

При этом необходимо отметить, что воздействие интенсивного тока, быстрый нагрев и плавление материала, сопровождаемые его тепловым расширением, приводят к высоким концентрациям напряжений в окрестности вершин микротрещин и, как следствие, вытеканию расплавленного материала в трещину. На рис. 6 представлено поле гидростатического давления (МПа) в кончике трещины через 6,6 мкс после начала действия тока на образец (всестороннее растяжение имеет знак минус).

С течением времени происходит дальнейшее оплавление кончиков трещины, вытекание расплавленного материала в микротрещину, сопровождаемое его испарением.

На рис. 7 представлено поле температуры в окрестности микротрещины после окончания воздействия тока (момент времени $t = 50$ мкс). Области, в которых произошло плавление и испарение материала, достигают размеров нескольких микрон.

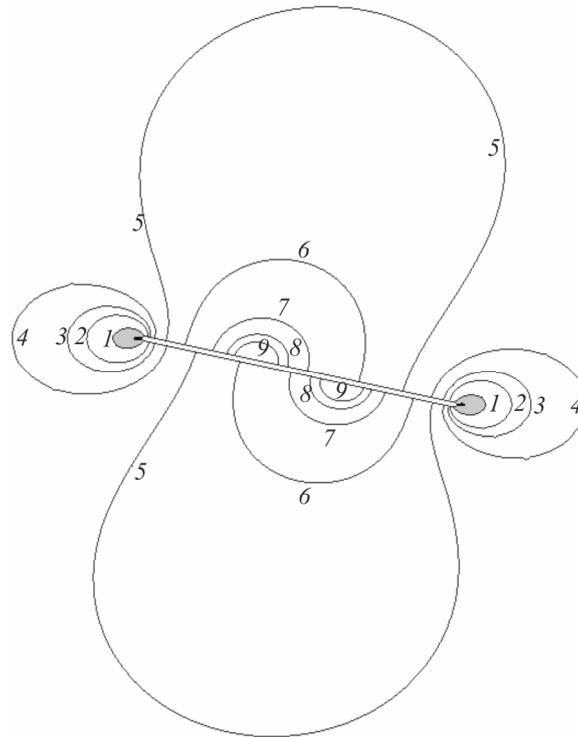


Рис. 7. Изолинии температуры в момент времени $t = 50$ мкс (черным обозначена область испарения, серым – область плавления; 1 – 419; 2 – 300; 3 – 200; 4 – 100; 5 – 50; 6 – 20; 7 – 5; 8 – 2; 9 – 1 °C)

Расчеты показывают, что в течение всего времени действия электрического тока и после окончания его действия, вплоть до момента выравнивания температуры, берега микротрещины смещаются друг к другу по всей длине микротрещины под действием сжимающих температурных напряжений (эффект «залечивания» дефектов). Что согласуется с аналитическими решениями, представленными в работах [12–17], и численными – в работах [18–19] для разрезов и пор, полученными в квазистатической постановке. Проведенное моделирование кратковременного воздействия интенсивным электрическим током на наклонную микротрещину подтверждает сохранение в нестационарной волновой постановке задачи эффекта «залечивания» микродефектов. Застывание расплава в микротрещине и конденсация паров металла на ее берегах усиливают этот эффект.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-01-00807, № 15-08-08693).

Библиографический список

1. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
2. Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля / Н.Н. Беклемишев, В.Н. Кукуджанов, В.А. Порохов [и др.]: препринт № 372 / Ин-т прикл. мат. АН СССР. – М., 1989. – 56 с.

3. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. Влияние локально-неоднородного импульсного электрического поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 4. – С. 184–187.
4. Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // Журн. эксперимент. и теор. физики. – 1966. – Т. 51. – С. 1676–1681.
5. Климов К.М., Новиков И.И. Влияние градиента температуры и электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию при растяжении металлических проволок // Изв. АН СССР. Металлы. – 1978. – № 6. – С. 175–179.
6. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // Докл. АН СССР. – 1976. – Т. 227, № 4. – С. 848–851.
7. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Vol. 287. – No. 2. – P. 276–287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3
8. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. – 2004. – № 4. – С. 60–67. DOI: 10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34
9. Дубинко В.И., Клепиков В.Ф. Кинетический механизм электропластичности металлов // Изв. РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1257–1258. DOI: 10.3103/S1062873808090037
10. Сташенко В.И., Троицкий О.А., Новикова Н.Н. Электропластическое волочение чугуновой проволоки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 2. – С. 85–88. DOI: 10.3103/S1052618809020149
11. Троицкий О.А. Электропластический эффект в процессах обработки металлов давлением // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 45–48.
12. Салганик Р.Л. Термоупругое равновесие тела с трещинами при разогреве, вызванном пропусканием тока перпендикулярно трещинам // Изв. АН СССР. МТТ. – 1978. – № 5. – С. 141–152.
13. Салганик Р.Л. Разогрев материала с эллипсоидальной неоднородностью вследствие электрических потерь // Изв. АН СССР. МТТ. – 1980. – № 6. – С. 98–109.
14. Ключников В.Д., Овчинников И.В. Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла // Изв. АН СССР. МТТ. – 1988. – № 4. – С. 118–122.
15. Овчинников И.В. Влияние воздействия электротока на пластичность металлов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 1969. – 123 с.
16. Кукуджанов В.Н., Беклемишев Н.Н., Порохов В.А. Квазистатическое одноосное разупрочнение некоторых металлических материалов в условиях жесткого закрепления под действием электромагнитного поля // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. Механика. – 2003. – Вып. 1(5). – С. 129–141.
17. Кукуджанов В.Н., Порохов В.А. Некоторые особенности влияния импульсов тока на пластичность металлов при высоких скоростях деформации // Проблемы прочности и пластичности. – 2005. – Вып. 67. – С. 132–142.
18. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – № 3. – С. 188–199. DOI: 10.3103/S0025654410030167
19. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Модель термоэлектропластичности изменения механических свойств металлов на основе реорганизации структуры дефектов под воздействием импульсного электрического тока // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – № 6. – С. 6–21. DOI: 10.3103/S0025654411060021
20. Коломиец А.В., Кукуджанов В.Н., Кукуджанов К.В. О переходе неоднородных упругопластических материалов с дефектами в макроразрушенное состояние: препринт № 1053 / Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. – М., 2013. – 42 с.
21. Моделирование неупругого разрушения неоднородных материалов при электродинамическом и термомеханическом воздействиях: препринт № 1054 / А.В. Коломиец, В.Н. Кукуджанов,

К.В. Кукуджанов, А.Л. Левитин // Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. – М., 2013. – 35 с.

22. Enhancement of ductility, weakening of anisotropy behavior and local recrystallization in cold-rolled Ti-6Al-4V alloy strips by high-density electropulsing treatment / Xiaoxin Ye, Yanyang Yang, Guolin Song, Guoyi Tang // *Appl. Phys. A.*, 2014, vol. 117, no. 4, pp. 2251–2264. DOI: 10.1007/s00339-014-8655-1

23. Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels under Quasi-Static Tensile Loads / Min-Sung Kim, Nguyen Thai Vinh, Hyeong-Ho Yu, Sung-Tae Hong, Hyun-Woo Lee, Moon-Jo Kim, Heung Nam Han, and John T. Roth. // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing.* – 2014. – Vol. 15. – No. 6. – P. 1207–1213. DOI: 10.1007/s12541-014-0458-y

24. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / Владимир гос. ун-т. – Владимир, 2000. – 260 с.

25. Пикунов М.В. Металлургия расплавов: курс лекций / Моск. ин-т стали и сплавов. – М., 2005. – 286 с.

26. Пикунов М.В. Плавка металлов. Кристаллизация сплавов. Затвердевание отливок / Моск. ин-т стали и сплавов. – М., 1997. – 374 с.

References

1. Spitsyn V.I., Troitskii O.A. *Elektroplasticheskaia deformatsiia metallov* [Electroplastic deformation of metals]. Moscow: Nauka, 1985. 160 p.

2. Beklemishev N.N., Kukudzhanov V.N., Porokhov V.A. [et al.] *Plastichnost' i prochnost' metallicheskih materialov s uchetom impul'snogo vozdeistviia vysokoenergeticheskogo elektromagnitnogo polia* [Plasticity and strength of metallic materials with the pulse action of a high-energy electromagnetic field taken into account]. Preprint No. 372. Institut prikladnoi matematiki AN SSSR. Moscow, 1989. 56 p.

3. Beklemishev N.N., Koryagin N.I., Shapiro G.S. Influence of Locally Inhomogeneous Pulse Electric Field on Plasticity and Strength of Conducting Materials. *Russ. Metallurgy (Metally)*, 1984, no. 4, pp. 184-187.

4. Kravchenko V.Ya. Effect of a Directed Electron Beam on Moving Dislocations. *Sov. Phys. JETP*, 1967, vol. 24, no. 6, pp. 1135-1142.

5. Klimov K.M., Novikov I.I. Influence of Temperature Gradient and Electric Current of High Density on Plastic Strain under Tension of Metallic Wires. *Russ. Metallurgy (Metally)*, 1978, no. 6, pp. 175-180.

6. Finkel' V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Possibility of Braking Rapid Cracks by Pulses of Current. *Sov. Phys. Dokl.*, 1976, vol. 21, no. 4, pp. 216.

7. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering: A.*, 2000, vol. 287, no. 2, pp. 276-287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3

8. Stepanov G.V., Babutskii A.I., Mameev I.A. High-Density Pulse Current-Induced Unsteady Stress-Strain State in a Long Rod. *Strength of Materials*, 2004, vol. 36, no. 4, pp. 377-381. DOI: 10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34

9. Dubinko V.I., Klepikov V.F. Kinetic Mechanism of the Electroplastic Effect in Metals. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1188-1189. DOI: 10.3103/S1062873808090037

10. Stashenko V.I., Troitskii O.A., Novikova N.N., Electroplastic Drawing of a Cast-Iron Wire. *J. Machinery Manufact. Reliabil.*, 2009, vol. 38, no. 2, pp. 182-184. DOI: 10.3103/S1052618809020149

11. Troitsky O.A. Use of Electroplastic Effect in Metal Forming. *Metallurg. Mashinostr.*, 2010, no. 4, pp. 45-48.

12. Salganik R.L. Thermoelastic Equilibrium of a Solid with Cracks under Heating Caused by Passage of a Current Perpendicular to the Cracks. *Mech. Solids*, 1978, vol. 13, no. 5, pp. 129-138.

13. Salganik R.L., Heating of a Material with an Ellipsoidal Nonuniformity as a Result of Electrical Losses. *Mech. Solids*, 1980, vol. 15, no. 6, pp. 87-98.
14. Klyushnikov V.D., Ovchinnikov I.V., Plane Problem of Effect of an Instantaneous Point Heat Source. *Mech. Solids*, 1988, vol. 23, no. 4, pp. 113-117.
15. Ovchinnikov I.V. Vliianie vozdeistviia elektrotoka na plastichnost' metallov [Influence of Electric Current Action on Plasticity of Metals]. Thesis of doctors degree dissertation. Moscow, 1969. 123 p.
16. Kukudzhанov V.N., Beklemishev N.N., Porokhov V.A. Kvizistaticheskoe odnoosnoe razuprochnenie nekotorykh metallicheskih materialov v usloviakh zhestkogo zakrepleniia pod deistviem elektromagnitnogo polia [Quasistatic Uniaxial Softening of Some Metallic Materials under Conditions of Rigid Fixation and under Action of Electromagnetic Field]. *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta. Mekhanika*, 2003, no. 1 (5), pp. 129-141.
17. Porokhov V.A., Kukudzhанov V.N. Nekotorye osobennosti vliianiia impul'sov toka na plastichnost' metallov pri vysokikh skorostiakh deformatsii [Some Characteristic Features of the Influence of Current Pulses on the Metal Plasticity at High Strain Rates]. *Probl. Prochn. Plastichn.*, 2005, no. 67, pp. 132-142.
18. Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. Study of the Influence of Electric Current Dynamical Action on Mechanical Properties of Materials with Ordered Structure of Defects. *Mech. Solids.*, 2010, vol. 45 no. 3, pp. 465-475. DOI: 10.3103/S0025654410030167
19. Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. A Model of Thermoelctroplasticity of Variations in the Mechanical Properties of Metals Based on Defect Structure Reorganization under the Action of Pulse Electric Current. *Mech. Solids.*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. 814-827. DOI: 10.3103/S0025654411060021
20. Kolomiets A.V., Kukudzhанov V.N., Kukudzhанov K.V. O perekhode neodnorodnykh uprugoplasticheskikh materialov s defektami v makrorazrushennoe sostoianie [About transition of inhomogeneous elastic-plastic materials with defects into the macrofracture state]. Preprint no. 1053, Institut problem mekhaniki RAS. Moscow, 2013. 42 p.
21. Kolomiets A.V., Kukudzhанov V.N., Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Modelirovanie neuprugogo razrusheniia neodnorodnykh materialov pri elektrodinamicheskom i termomekhanicheskom vozdeistviakh [Modeling of the inelastic fracture of heterogeneous materials under electrodynamic and thermomechanical loading]. Preprint no. 1054, Institut problem mekhaniki RAS. Moscow, 2013. 35 p.
22. Xiaoxin Ye, Yanyang Yang, Guolin Song, Guoyi Tang. Enhancement of ductility, weakening of anisotropy behavior and local recrystallization in cold-rolled Ti-6Al-4V alloy strips by high-density electro-pulsing treatment. *Appl. Phys. A.*, 2014, vol. 117, no. 4, pp. 2251-2264. DOI: 10.1007/s00339-014-8655-1
23. Min-Sung Kim, Nguyen Thai Vinh, Hyeong-Ho Yu, Sung-Tae Hong, Hyun-Woo Lee, Moon-Jo Kim, Heung Nam Han, John T. Roth. Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels under Quasi-Static Tensile Loads. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 1207-1213. DOI: 10.1007/s12541-014-0458-y
24. Gavrilin I.V. Plavlenie i kristallizatsiia metallov i splavov [Melting and crystallization of metals and alloys]. Vladimirkii gosudarstvennyi universitet, 2000. 260 p.
25. Pikunov M.V. Metallurgiiia rasplavov. Kurs lektsii. [Metallurgy of the melts. A course of lectures]. Moscovskii institut stalei i splavov, 2005. 286 p.
26. Pikunov M.V. Plavka metallov. Kristallizatsiia splavov. Zatverdevanie otlivok. [Metal melting. Alloy crystallization. The solidification of castings]. Moscovskii institut stalei i splavov, 1997. 374 p.