

К. В. Кукуджанов, А. В. Коломиец, А. Л. Левитин

ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук

Аннотация. Рассматриваются процессы, протекающие в материале при обработке металлических образцов импульсами электрического тока большой плотности. Исследование электропластического эффекта проводится на основе построенной разномасштабной модели воздействия электромагнитного поля на микротрещины. Задача решается методом прямого численного моделирования в динамической постановке. Прослеживается эволюция микродефектов материала в форме плоских трещин после воздействия на них электрического тока. Изучается влияние размера и пространственной ориентации микротрещин на локализацию электромагнитного поля в области дефекта. Исследование показало, что в окрестности микродефектов возникают очень большие градиенты электромагнитного поля и плотности тока, что приводит к интенсивному нагреву и плавлению материала в кончиках микротрещин. При этом расплавленный материал вытекает в трещину, в то время как сама микротрещина под действием возникающих температурных напряжений стремится закрыться (эффект «залечивания» дефектов).

Ключевые слова: термоэлектропластичность, прямое численное моделирование, материал с дефектами, локализация электромагнитного поля и температуры.

УДК: 539.3

Термоэлектропластичность является сравнительно молодым разделом теории пластичности. Первые экспериментальные работы в этой области появились только во второй половине прошлого века. Они показали, что обработка током металлических заготовок из труднодеформируемых материалов и сплавов облегчает последующую механическую обработку, улучшает пластические свойства изделия [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [11] и имеет преимущества перед традиционными методами термообработки, такими как отжиг и другие.

Хорошо изученным давно применяемым технологическим способом обработки металлов является разогрев заготовки электрическим током небольшой плотности $J \approx 10 \text{ А/м}^2$ и большим временем действия $\tau \approx 10^3 \text{ с}$. Исследование воздействия электромагнитного поля на механические свойства проводящих материалов показывают, что обработка током плотностью $J \approx 10^9 \text{ А/м}^2$ и временем действия $\tau \approx 10^{-4} \text{ с}$ существенно увеличивает пластические деформации при разрушении. Принципиально отличным является увеличение предельной пластической деформации за счет нетермических эффектов воздействия электромагнитного поля, не связанных с интегральным разогревом [18], [19]. Это явление было названо электропластическим эффектом. Данный эффект имеет устойчивый остаточный характер, что

Поступила 11.11.2014

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-01-00807-а.

позволяет применять его как при последовательном, так и одновременном термомеханическом воздействии.

До сих пор отсутствует единое мнение о природе этого явления, а дискуссия о его фундаментальных основах и физическом механизме еще продолжается [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18].

Настоящая работа посвящена исследованию процессов, протекающих при обработке металлических образцов электрическим током, и электропластического эффекта на основе построенной модели воздействия электромагнитного поля на микротрещины.

Постановка задачи. Рассматривается токопроводящий материал с упорядоченной структурой дефектов, который состоит из периодически распределенных представительных элементов, как показано на рис. 1, содержащих дефекты различного типа (плоские микротрещины, цилиндрические микропоры). Материал подвергается воздействию короткоимпульсного высокоэнергетического электрического тока определенной интенсивности (с плотностью тока от 10^7 до 10^{11} А/м²) и продолжительности (от 100 мкс до 1 с). При этом ставится задача исследовать процессы изменения электромагнитного и температурного полей в материале и их влияние на напряженно-деформированное состояние. Для решения поставленной задачи предлагается разномасштабная (во времени) модель воздействия электромагнитного и температурного полей на предварительно поврежденный материал с дефектами. Задача решалась методом конечных элементов в два этапа в динамической постановке (а термомеханическая задача – дополнительно в квазистатической постановке):

На первом этапе решается электротермическая задача для представительных элементов (объемов) материала с дефектами различных форм (трещины, поры), для того чтобы получить поля электрического потенциала и температуры в образце в зависимости от времени.

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 в зависимости от времени.

Основные уравнения электротермомеханической модели.

Электротермическая задача (первый этап). Для расчета электрического потенциала и температуры в токопроводящем материале используются следующие уравнения:

Закон сохранения заряда в совокупности с законом Ома дают уравнения:

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

$$\mathbf{J} = \sigma^E \cdot \mathbf{E} = -\sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{— законом Ома,} \quad (2)$$

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 $\mathbf{E} = -\partial \varphi / \partial x$, φ – электрический потенциал, $\sigma^E(\theta)$ – матрица электропроводности, θ – температура.

Закон сохранения энергии в совокупности с законами Ома и Джоуля – Ленца в дает основное уравнение конечно-элементной модели в вариационной форме:

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

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

На границе области интегрирования для электротермической задачи принимаются следующие условия:

На границах $x = 0, a$ задавались постоянные плотности тока (или разность потенциалов), а также условие периодичности (симметрии) для температуры. На границах $y = 0, b$ потоки плотности тока и температуры считались нулевыми. Начальная температура полагалась постоянной (в частности, комнатной), а потенциал – нулевым.

Термомеханическая задача (второй этап). Для получения поля температуры и напряженно-деформированного состояния материала помимо уравнений баланса импульса используется уравнение баланса 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 тепла на единицу площади и r – тепловая энергия в единице объема в текущей конфигурации тела.

Тепловой поток $\mathbf{f}$ определяется законом Фурье

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

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

Вариационная формулировка уравнения баланса энергии (3) применяется в виде слабой формы Бубнова – Галеркина:

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

где $\delta \theta$ – вариации поля температур, удовлетворяющие граничным условиям периодичности.

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, равно

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

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.

Тензор полных деформаций образца термопластического материала равен

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{th}, \quad (10)$$

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

$$d\varepsilon^{th} = \alpha(\theta) d\theta, \quad (11)$$

где α – коэффициент термического расширения.

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

$$q = \sigma_Y, \quad q = \sqrt{3/2 \mathbf{S} : \mathbf{S}}, \quad (12)$$

где $\sigma_Y = \sigma_Y(\theta)$ – предел текучести, $\mathbf{S}$ – девиатор тензора напряжений.

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

$$r = \eta \sigma : \dot{\varepsilon}^{pl}, \quad (13)$$

где η – доля неупругой энергии, идущей на образование тепла, $\dot{\varepsilon}^{pl}$ – тензор скорости пластической деформации. Кроме того, связность механической и тепловой задач учитывалась посредством зависимости механических характеристик материала (предела текучести, упругих модулей, коэффициента температурного расширения) от температуры.

При численном решении полученных уравнений стохастический разброс механических свойств материала (упругих модулей, предела текучести, коэффициента линейного расширения, электропроводности, предельной деформации разрушения и т. п.) реализован с помощью штатного датчика случайных чисел, где размах случайных отклонений от среднего значения величины задавался заранее. Абсолютные значения этих отклонений от среднего (для каждого из параметров материала) могут быть определены экспериментально в качестве характеристик материала. В конкретных расчетах эти отклонения принимались в соответствие с имеющимися экспериментальными данными в диапазоне 1,5–2,5% от среднего значения.

Зоны плавления материала рассчитывались сквозным образом без явного выделения границ раздела фаз при достижении в материале температуры $\theta > \theta_{malt}$, где θ_{malt} – температура плавления материала. При этом в узлах, где материал расплавился, полагалось $J = 0$, $\theta = \theta_{malt}$.

При решении термомеханической задачи начальное распределение температуры в образце бралось из решения электротермической задачи, а начальные значения поля перемещений принимались нулевыми. На границах области интегрирования для перемещений и температуры задавались условия периодичности.

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 (рис. 1) в окрестности дефектов в виде цилиндрических пор или плоских трещин возникают большие градиенты электрического потенциала, приводящие к резким изменениям поля плотности тока, в том числе к существенному увеличению плотности тока в кончиках трещин или 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 этих зонах, в свою очередь, приводит к их сильному локальному разогреву: на рис. 1 изображено поле температур $\theta(C)$ при пропускании электрического тока для изолированных представительных элементов и образцов с упорядоченной структурой дефектов.

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. 2а показана зависимость максимальной плотности тока J (А/мм²) в кончике плоской микротрещины с закругленным кончиком от ее длины l (мкм) в образце из цинка, подверженного воздействию импульсом тока величиной $1,5 \cdot 10^2$ А/мм². Расстояние между берегами и радиус кривизны в кончике микротрещин принималось равными 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.

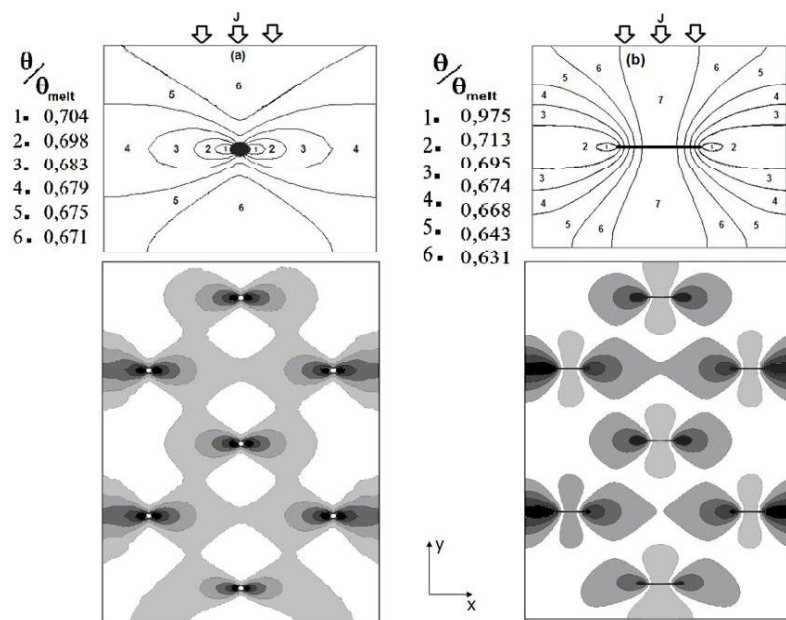


Рис. 1

На рис. 2b показана зависимость максимальной плотности тока J (A/mm^2) в верхнем кончике плоской микротрещины длиной 50 мкм от угла наклона плоскости трещины к оси x в образце из цинка, подверженного воздействию импульсом тока величиной $1,5 \cdot 10^2 A/mm^2$. Расстояние между берегами и радиус кривизны в кончике микротрещин принималось равными 1 мкм. Из графика видно, что максимальная плотность тока в кончике трещины остается практически постоянной в диапазоне углов 0^0-15^0 . При дальнейшем увеличении угла максимальная плотность тока в кончике трещины нелинейно уменьшается.

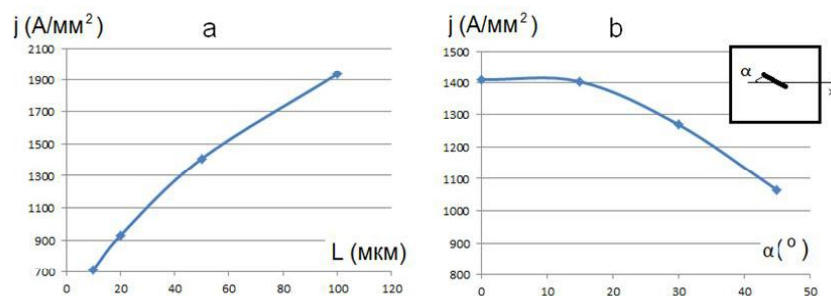


Рис. 2 Ток от (a) размера, от (b) наклона

На рис. 3 показаны соответственно (а) поля плотности тока и (б) температуры (в момент времени $t=49,7$ мкс) в окрестности 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 100 мкс. Размеры представительного элемента $a=400$ мкм $b=375$ мкм.

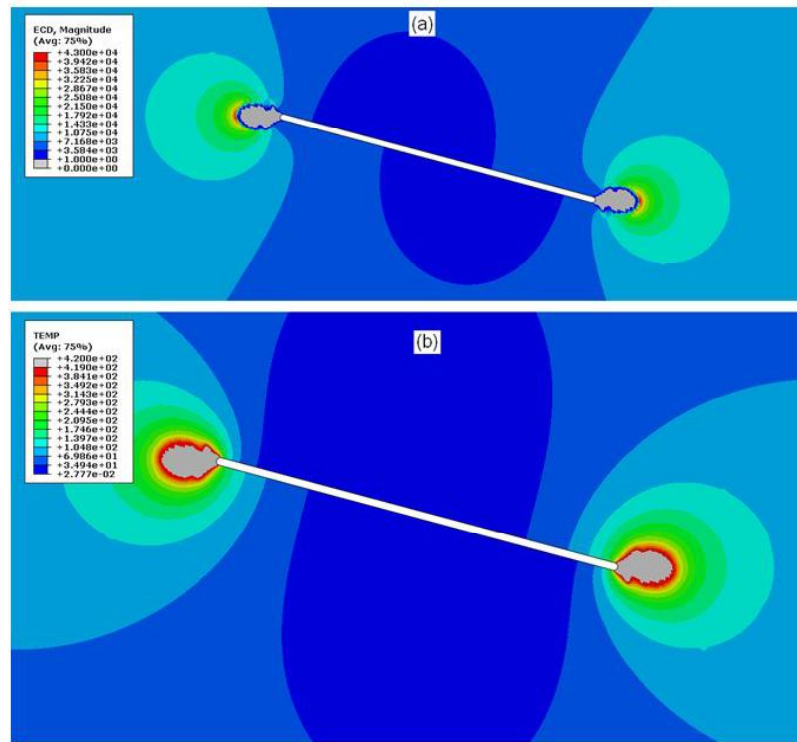


Рис. 3

В результате моделирования получено, что на берегах микротрещины имеются области, в которых плотность тока составляет всего $20\text{--}30$ А/мм² (более чем в 100 раз меньше приложенного тока), в то время как в области кончиков микротрещины плотность тока на порядок превышает плотность приложенного тока. Таким образом, возникающие в окрестности микродефектов в результате воздействия очень 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. 3 зоны, в которых материал расплавился, хорошо видны в кончиках трещины.

При этом необходимо заметить, что воздействие интенсивного тока, быстрый нагрев и плавление материала, сопровождаемые его тепловым расширением, приводят к высоким растягивающим давлениям в зоне кончиков трещин и, как следствие, вытеканию расплавленного материала в трещину. На рис. 4 представлено поле гидростатического давления в кончике трещины через 6 мкс после начала действия тока на образец.

С течением времени происходит дальнейшее оплавление кончиков трещины и вытекание расплавленного материала в микротрещину. На рис. 4б представлено поле температуры в окрестности 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 после

окончания воздействия тока (момент времени $t=104$ мкс). Таким образом, области, в которых происходит плавление материала, достигают размеров порядка 10 мкм. Наибольший линейный размер образовавшейся поры составляет 21 мкм (на рис.4b).

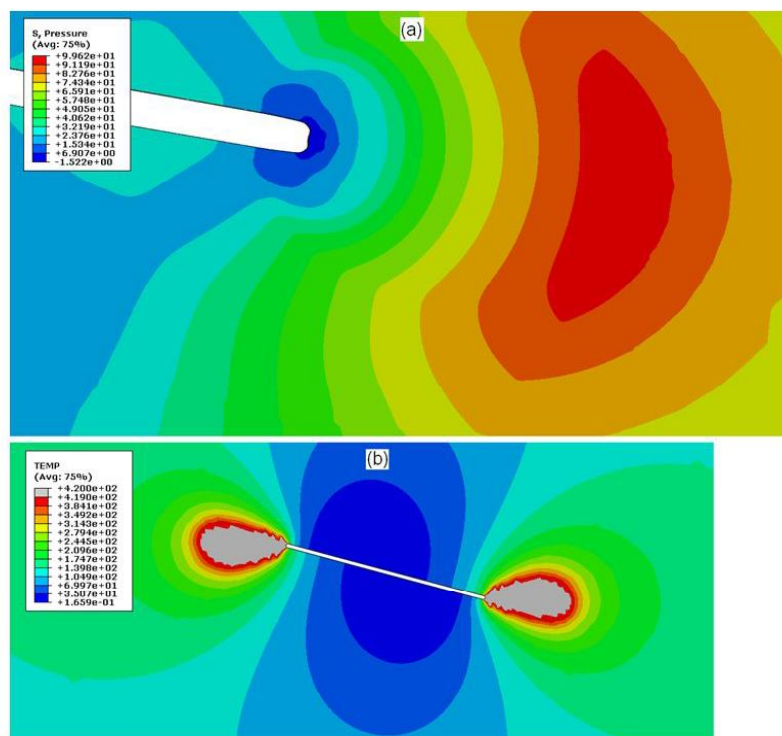


Рис. 4

В результате расчетов установлено, что берега микротрещины в течение всего времени воздействия электрического тока смещаются друг к другу (эффект “залечивания” дефектов). Это согласуется с аналитическими исследованиями по объяснению данного эффекта, проведенными в работах [12], [13], где было показано, что в теле с дефектами в виде дискообразных трещин при стационарном поле температур, которое возникает после воздействия электрическим током, происходит частичное закрытие разрезов (трещин), а также с результатами, полученными при рассмотрении нестационарного поля температур в работах [14], [15], [16], [17], [18], [19], в которых были получены результаты, касающиеся схлопывания дефектов в виде разрезов, а также распределения сжимающих пластических напряжений, приводящих к частичному “залечиванию” цилиндрических дефектов. Настоящее моделирование кратковременного воздействия на материал интенсивным электрическим током на наклонную микротрещину подтверждает в динамической постановке этот эффект “залечивания” микродефектов в материале.

Расчеты показали, что учет стохастического разброса свойств материала в указанных пределах не приводит к какому-либо существенному изменению изучаемых полей и качественно не меняет картину изучаемых явлений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Спицын, В. И.* Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицын, О. А. Троицкий. – М. : Наука, 1985. – 160 с.
- [2] *Беклемишев, Н. Н.* Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля / Н. Н. Беклемишев, В. Н. Кукуджанов, В. А. Порохов. – Препринт №372. – М. : ИПМ АН СССР, 1989. – 56 с.
- [3] *Беклемишев, Н. Н.* Влияние локально-неоднородного импульсного электрического поля на пластичность и прочность проводящих материалов / Н. Н. Беклемишев, Н. И. Корягин, Г. С. Шапиро // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 4. – С. 184–187.
- [4] *Кравченко В. Я.* Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации / В. Я. Кравченко // Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1966. – Т. 51. – С. 1676–1681.
- [5] *Климов, К. М.* Влияние градиента температуры и электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию при растяжении металлических проволок / К. М. Климов, И. И. Новиков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1978. – № 6. – С. 175–179.
- [6] *Финкель, В. М.* О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока / В. М. Финкель, Ю. И. Головин, А. А. Слетков // Докл. АН СССР. – 1976. – Т. 227. – № 4. – С. 848–851.
- [7] *Финкель, В. М.* Разрушение вершины трещины силовым электромагнитным полем / В. М. Финкель, Ю. И. Головин, А. А. Слетков // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 237. – № 2. – С. 325–327.
- [8] *Степанов, Г. В.* Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности / Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев // Пробл. прочности. – 2004. – № 4. – С. 60–67.
- [9] *Дубинко, В. И.* Кинетический механизм электропластичности металлов / В. И. Дубинко, В. Ф. Клепиков // Изв. РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72. – № 9. – С. 1257–1258.
- [10] *Стащенко, В. И.* Электропластическое волочение чугуновой проволоки / В. И. Стащенко, О. А. Троицкий, Н. Н. Новикова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 2. – С. 85–88.
- [11] *Троицкий, О. А.* Электропластический эффект в процессах обработки металлов давлением / О. А. Троицкий // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 45–48.
- [12] *Салганик, Р. Л.* Термоупругое равновесие тела с трещинами при разогреве, вызванном пропусканием тока перпендикулярно трещинам / Р. Л. Салганик // Изв. АН СССР. МТТ. – 1978. – № 5. – С. 141–152.
- [13] *Салганик, Р. Л.* Разогрев материала с эллипсоидальной неоднородностью вследствие электрических потерь / Р. Л. Салганик // Изв. АН СССР. МТТ. – 1980. – № 6. – С. 98–109.
- [14] *Клюшников, В. Д.* Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла / В. Д. Клюшников, И. В. Овчинников // Изв. АН СССР. МТТ. – 1988. – № 4. – С. 118–122.
- [15] *Овчинников, И. В.* Влияние воздействия электротока на пластичность металлов. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.м.н. М. – 1969. – 123 с.
- [16] *Кукуджанов, В. Н.* Квазистатическое одноосное разупрочнение некоторых металлических материалов в условиях жесткого закрепления под действием электромагнитного поля / В. Н. Кукуджанов, Н. Н. Беклемишев, В. А. Порохов // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. Серия Механика. – 2003. – Вып. 1 (4). – С. 129–141.
- [17] *Кукуджанов, В. Н.* Некоторые особенности влияния импульсов тока на пластичность металлов при высоких скоростях деформации / В. Н. Кукуджанов, В. А. Порохов // Проблемы прочности и пластичности. – 2005. – Вып. 67. – С. 132–142.
- [18] *Кукуджанов, В. Н.* Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов / В. Н. Кукуджанов, А. В. Коломиец-Романенко // Известия РАН. МТТ. – 2010. – № 3. – С. 188–199.

[19] Кукуджанов, В. Н. Модель термоэлектропластичности изменения механических свойств металлов на основе реорганизации структуры дефектов под воздействием импульсного электрического тока / В. Н. Кукуджанов, А. В. Коломиец-Романенко // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – №. 6. – С. 6–21.

Кукуджанов Константин Владимирович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики и оптимизации конструкций Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва

Коломиец Андрей Валерьевич,

кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва

Левитин Александр Леонидович,

младший научный сотрудник лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва

K. V. Kukudzhanov, A. V. Kolomiets, A. L. Levitin

**PROCESSES OF DEFORMATION AND FRACTURE STOCHASTICALLY
INHOMOGENEOUS ELASTOPLASTIC MATERIALS WITH DEFECTS UNDER
ELECTRODYNAMIC AND THERMOMECHANICAL LOADING**

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The processes occurring in the metallic samples under the impact of electrical current of high density are considered. Investigation electroplastic effect is based on the constructed multiscale models of the impact of electromagnetic fields on microcracks. The dynamic problem is solved by direct numerical simulation. The evolution of microdefects of material in the form of flat cracks under action of electrical current are investigated. The influence of the size and orientation of microcracks on the localization of the electromagnetic field in the region of the defect are examined. Research has shown, that in the vicinity of the microdefects very large gradients electromagnetic field and current are arise, which leads to intensive heating and melting the material in the tips of the microcracks. The molten material flows into the microcrack, whereas microcrack are closing under the action of thermal stresses (the effect of "healing" of defects).

Keywords: thermal electroplasticity, direct numerical modeling, defective material, electromagnetic field and temperature localization.

REFERENCES

- [1] *Spitsyn, V. I.* Electroplastic deformation of metals / V. I. Spitsyn, O. A. Troitsky. – M. : Nauka, 1985. – 160 p.
- [2] *Beklemishev, N. N.* Plasticity and durability of metal materials taking into account the pulse influences of a high-energy electromagnetic field / N. N. Beklemishev, V. N. Kukudzhanov, V. A. Porohov. – Preprint № 372. – M. : IPM of academy of sciences of the USSR, 1989. – 56 p.
- [3] *Beklemishev, N. N.* Influence of local and non-uniform pulse electric field on plasticity and durability of the carrying-out materials / N. N. Beklemishev, N. I. Корягин, G. S. Shapiro // News of Academy of Sciences of the USSR. Metals. – 1984. – № 4. – P. 184–187.
- [4] *Kravchenko, V. Ya.* Impact of the directed stream of electrons on moving dislocations / V. Ya. Kravchenko // Magazine of experimental and theoretical physics. – 1966. – Vol. 51. – P. 1676–1681.
- [5] *Klimov, K. M.* Influence of a gradient of temperature and electric current of high density on plastic deformation at stretching metal a provolok / K. M. Klimov, I. I. Novikov // News of Academy of Sciences of the USSR. Metals. – 1978. – № 6. – P. 175–179.
- [6] *Finkel, V. M.* About possibility of braking of fast cracks current impulses / V. M. Finkel, Yu. I. Golovin, A. A. Sletkov // Reports of Academy of Sciences of the USSR. – 1976. – Vol. 227. – № 4. – P. 848–851.
- [7] *Finkel, V. M.* Destruction of top of a crack force electromagnetic field / V. M. Finkel, Yu. I. Golovin, A. A. Sletkov // Reports of Academy of Sciences of the USSR. – 1977. – Vol. 237. – № 2. – P. 325–327.
- [8] *Stepanov, G. V.* The non-stationary intense deformed state in a long core, caused by an impulse of electric current of high density / G. V. Stepanov, A. I. Babutsky, I. A. Mameev // Durability problems. – 2004. – № 4. – P. 60–67.
- [9] *Dubinko, V. I.* Kinetic mechanism of electro plasticity of metals / V. I. Dubinko, V. F. Klepikov // News of the Russian Academy of Sciences. Series physical. – 2008. – Vol. 72. – No. 9. – P. 1257–1258.

- [10] *Stashenko, V. I.* Electro plastic drawing of a pig-iron wire / V. I. Stashenko, O. A. Troitsky, N. N. Novikova // Problems of mechanical engineering and reliability of cars. – 2009. – № 2. – P. 85–88.
- [11] *Troitsky, O. A.* Electro plastic effect in processing of metals pressure / O. A. Troitsky // Mechanical engineering metallurgy. – 2010. – № 4. – P. 45–48.
- [12] *Salganik, R. L.* Thermo elastic balance of a body with cracks at the warming up caused current transmission perpendicular to cracks / R. L. Salganik // News of Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of a solid body. – 1978. – № 5. – P. 141–152.
- [13] *Salganik, R. L.* Material warming up with ellipsoidal heterogeneity owing to electric losses / R. L. Salganik // News of Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of a solid body. – 1980. – № 6. – P. 98–109.
- [14] *Klyushnikov, V. D.* Flat task about influence of an instant dot source of heat / V. D. Klyushnikov, I. V. Ovchinnikov // News of Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of a solid body. – 1988. – № 4. – P. 118–122.
- [15] *Ovchinnikov, I. V.* Influence of influence of a current on plasticity of metals. The thesis on competition of an academic degree ph.d. – M. – 1969. – 123 p.
- [16] *Kukudzhанov, V. N.* Quasistatic monoaxial time hardening of some metal materials in the conditions of rigid fixing under the influence of an electromagnetic field / V. N. Kukudzhанov, N. N. Beklemishev, V. A. Porohov // Vestnik Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Mechanics series. – 2003. – Issue 1 (4). – P. 129–141.
- [17] *Kukudzhанov, V. N.* Some features of influence of impulses of current on plasticity of metals at high speeds of deformation / V. N. Kukudzhанov, V. A. Porohov // Problems of durability and plasticity. – 2005. – Issue 67. – P. 132–142.
- [18] *Kukudzhанov, V. N.* Research of influence of dynamic influence of electric current on mechanical properties of materials with the ordered structure of defects / V. N. Kukudzhанov, A. V. Kolomiets-Romanenko // News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of a solid body. – 2010. – No. 3. – P. 188–199.
- [19] *Kukudzhанov, V. N.* Model of thermo electro plasticity of change of mechanical properties of metals on to basis of reorganization of structure of defects under the influence of the pulse electric current / V. N. Kukudzhанov, A. V. Kolomiets-Romanenko // News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of a solid body. – 2011. – No. 6. – P. 6–21.

Kukudzhанov, Konstantin Vladimirovich

Ph.D., Senior Research Scientist at the Department of Mechanics and Optimization of Structures, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow

Kolomiets, Andrey Valer'evich

Ph.D., Junior Research Scientist at the Department of Modeling in Solid Mechanics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow

Levitin Alexander Leonidovich

Junior Research Scientist at the Department of Modeling in Solid Mechanics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow