

Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 89–110. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07

Kukudzhanov K.V., Levitin A.L. The processes of transformation and interaction of microcracks in the metal under the influence of high-energy pulsed electromagnetic field. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 2. Pp. 89-110. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI 10.15593/perm.mech/2016.2.07

УДК 539.3

## ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОТРЕЩИН В МЕТАЛЛЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

К.В. Кукуджанов<sup>1,2</sup>, А.Л. Левитин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 23 мая 2016 г.  
Принята: 20 июня 2016 г.  
Опубликована: 30 июня 2016 г.

#### Ключевые слова:

залечивание трещин,  
торможение трещин,  
взаимодействие микродефектов,  
электропластичность,  
высокоэнергетическое  
электромагнитное поле,  
импульс тока, локализация,  
фазовые переходы,  
плавление, испарение

### АННОТАЦИЯ

Моделирование процессов, происходящих в металлах при обработке их кратковременными импульсами электрического тока высокой плотности, представляет интерес прежде всего в связи с изучением явления электропластичности, физический механизм которого до сих пор остается непонятным для исследователей. Одно из объяснений этого явления заключается в эффекте залечивания микродефектов в металле.

В настоящей работе исследуются процессы трансформации и взаимодействия дефектов типа плоских микротрещин с линейными размерами порядка 10 мкм, протекающие в металле при обработке его импульсами тока. Исследование осуществляется численно на основе связанной модели воздействия интенсивным электромагнитным полем на предварительно поврежденный термоупругопластический материал с дефектами, которая учитывает плавление и испарение металла, а также зависимость всех его физико-механических свойств от температуры. Решение получающейся системы уравнений ищется методом конечных элементов на подвижных сетках с использованием смешанного эйлера-лагранжева метода.

Расчеты показали, что под действием импульсов тока происходит сварка трещины и залечивание микродефекта. Залечивание происходит путем одновременного уменьшения длины, выброса расплавленного металла внутрь трещины и смыкания берегов, что приводит к тому, что берега трещины начинают контактировать со струей расплавленного материала и в конце этих процессов струя оказывается полностью зажатай берегами трещины.

В статье исследуется влияние расстояния между трещинами и их взаимного расположения относительно друг друга на процессы деформирования и залечивания микродефектов, а также обсуждается выбор области интегрирования и условий на ее границах.

Численное моделирование показало, что при изучении процесса залечивания микротрещин можно без потери точности ограничиться рассмотрением в качестве области интегрирования одного представительного элемента (или одной четверти

© 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 in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Scientist, e-mail: kconstantin@mail.ru

Alexander L. Levitin – Junior Research Scientist, e-mail: alex\_lev@ipmnet.ru

осесимметричного представительного элемента), задавая на ее границах, не являющихся осями симметрии, разность потенциалов, определенную для элемента без дефекта (в состоянии, «не возмущенном» наличием микротрещины). При расстояниях между трещинами, превышающих 5–6 их длин, процессы залечивания будут протекать одинаково, независимо от того, моделируем мы их в области интегрирования, состоящей из одного или нескольких представительных элементов.

С увеличением расстояния между трещинами наблюдается уменьшение влияния взаимного расположения микротрещин на процессы их залечивания, так что при расстояниях между микротрещинами, превышающих шесть их длин, время залечивания микротрещин оказывается фактически одинаковым при любом расположении трещин относительно друг друга.

Взаимодействие между микротрещинами начинает заметно сказываться на процессе их залечивания, когда расстояния между ними сокращаются до 5–6 длин микротрещин. Если же расстояние между трещинами превышает шесть и более их длин, то процессы залечивания микротрещин, становятся практически независимыми как от расстояния между дефектами, так и от расположения дефектов относительно друг друга.

Уменьшение расстояния между трещинами вплоть до 1–2 их линейных размеров (с учетом изменения их взаимного расположения) качественно не меняет описанный процесс залечивания, однако приводит к его существенному замедлению: выброс расплавленного материала в трещину сохраняется, но уменьшение трещины особенно в поперечном направлении значительно сокращается.

© ПНИПУ

## TRANSFORMATION AND INTERACTION OF MICROCRACKS IN METAL UNDER HIGH-ENERGY PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD

K.V. Kukudzhanov<sup>1,2</sup>, A.L. Levitin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 23 May 2016  
Accepted: 20 June 2016  
Published: 30 June 2016

#### Keywords:

microcracks healing, cracks arrest, interaction of micro-defects, electroplasticity, high-energy electromagnetic fields, electropulsing treatment, localization, phase transitions, melting, evaporation

### ABSTRACT

Simulation of processes occurring in metals when they are treated with short pulses of high density electric current is of interest primarily due to studying the phenomenon of electroplasticity; the physical mechanism of which is still unknown to researchers. The effect of healing micro-defects in metals is one of existing explanations for this phenomenon.

The present paper considers the processes of transformation and interaction related to flat microcracks with linear sizes of about 10 microns when processing metal samples with short pulses of high-density currents. The investigation is carried out numerically on basis of coupled quasi-stationary model of impact using high-energy electromagnetic field on the pre-damaged thermal elastoplastic material with defects. The model accounts for melting and evaporation of the metal and the dependence of its physical and mechanical properties on the temperature [1]. The system of equations is solved numerically by finite elements method with adaptive mesh using alternative Euler-Lagrange's method.

The calculations show that the crack welding and micro-defects healing occur under the short pulse of current. The healing occurs due to a simultaneous reduction in length, the ejection of the molten metal into the cracks and closing of micro-crack shores which leads to the fact that the shores of the crack come into contact with the jet stream; and in the end of these processes the jet's material is completely jammed by the cracks shores [1].

This paper studies the influence of distance between the cracks and their relative position with respect to each other on deformation and healing of micro-defects; also the choice of the integration regions and conditions at its boundaries.

Numerical modeling shows that it is enough to study microcracks healing by considering one representative element (or one-quarter of the axisymmetric representative element) as a region of integration by setting the electrical potential which is certain for the element without defects (when it is "unperturbed" by the presence of microcracks) on its borders that are the axes of symmetry. When the distances between the cracks

exceed their lengths by 5–6 times, the healing processes will occur in the same manner regardless of the fact that we model them in the region of integration consisting of one or several representative elements.

When the distance between the cracks increases, the influence of mutual arrangement of micro-cracks on the healing process is decreased. Thus, if the distances between the microcracks exceed their lengths by six times, in fact, the healing of microcracks is the same for any position of cracks compared to each other.

Interaction between microcracks begins to significantly affect their healing processes when the distance between them is reduced to 5-6 lengths of microcracks. If the distance between the cracks exceeds their six lengths, the processes of microcracks healing become practically independent of the distance between the defects or the position of defects with regard to each other.

Decreasing the distance between the cracks up to 1–2 of their linear sizes (taking into account their relative position changes) does not qualitatively change the described healing process of microcracks, however it results in a considerable slowing down: the ejection of a molten material in a crack is retained, but the crack reduction is significantly reduced especially in the transverse direction.

© PNRPU

## Введение

Исследование процессов, происходящих в проводящих материалах при обработке образцов кратковременными импульсами электрического тока высокой плотности, представляет значительный интерес как в связи с изучением явления электропластического деформирования, физический механизм которого остается непонятным для исследователей, так и в связи с исследованием явления залечивания дефектов (от микро- до макро-размеров, например, усталостного происхождения, которое также до последнего времени не находило своего объяснения).

В настоящей работе рассматриваются микродефекты с линейными размерами порядка 10 мкм, образуемые поверхностями соседних монокристаллов (зерен), наиболее часто встречаются в поликристаллическом металле (межзеренные дефекты). Они всегда в каком-то количестве образуются после отливки, а также могут возникать и развиваться в металле в процессах технологической обработки (например, при электропластическом деформировании) или эксплуатации (например, при многоцикловом нагружении) изготовленных из него изделий [1]. При нагрузке дефекты накапливаются в материале, что приводит при определенной поврежденности к макроразрушению изделия. Наиболее опасными из микродефектов с точки зрения последующего макроразрушения являются дефекты типа плоских микротрещин.

Предположения о том, что в проводящем материале может происходить залечивание (изменение) дефектов под действием кратковременных импульсов тока высокой плотности, высказывались в работах [2–5], в контексте изучения явления электропластичности.

Между тем экспериментальные доказательства факта, что залечивание дефектов в той или иной форме происходит в проводящих материалах, появились безотносительно изучения электропластичности.

Впервые возможность торможения трещин в пластинах при воздействии на них короткими импульсами тока высокой плотности экспериментально установлена в работах [6–8]. При этом получено, что в вершинах трещин в различных материалах (кремнистой стали, а также меди и других цветных металлах) происходит плавление, микровзрыв и образование кратера, что приводит к торможению в распространении трещины.

В работах [9–10] путем измерения скорости распространения ультразвуковых волн в образцах из рельсовой стали, подвергнутых циклической нагрузке, установлено, что усталостные микротрещины залечиваются после воздействия на образец, содержащий такие

трещины, импульсами тока, что значительно увеличивает время жизни образца до его усталостного разрушения при циклическом нагружении.

В работе [11] путем определения плотности методом гидростатического взвешивания для образцов из аустенитных сталей с различным содержанием углерода, подвергнутых циклической нагрузке до и после воздействия электротокном установлено, что микротрещины после воздействия на образец импульсами тока залечиваются, о чем свидетельствует увеличение плотности материала после воздействия на него током.

В работе [12] при исследовании явления электропластичности в тестах на растяжение титановых образцов с помощью оптической микроскопии установлено, что микродефекты, возникшие при пластической деформации, после воздействия на образец импульсами тока залечиваются, о чем свидетельствуют приведенные в работе фотографии микроструктуры материала.

В работе [13] при исследовании с помощью оптической микроскопии (SEM) образцов из нержавеющей стали в тестах на многоцикловое растяжение до и после воздействия электротокном установлено, что усталостная мезотрещина в образце залечиваются после воздействия на нее импульсами тока. При этом происходит процесс сварки берегов трещины.

Таким образом, стало возможным утверждать, что теоретические предположения о возможности залечивания дефектов под действием коротких импульсов тока высокой плотности, сделанные в работах [2–5], в настоящее время перешли из разряда гипотезы в разряд экспериментально наблюдаемых фактов [6–13].

Для исследования физических процессов, происходящих в окрестности трещин, под действием интенсивным импульсов тока и объяснения эффекта залечивания исследователями предложен ряд математических моделей [14–25]. Из данных моделей получалось, что в вершинах трещин возможно возникновение сжимающих нормальных напряжений в направлении, перпендикулярном поверхности трещины, а также что имеет место сближение берегов трещин, сопровождаемое при определенных условиях выплавлением кратеров (пор) в их вершинах. Это, по мнению авторов, создавало препятствия для дальнейшего развития трещин в материале и означало залечивание дефектов.

Однако вышеперечисленные эксперименты [6–13] свидетельствовали о том, что в окрестности микротрещин происходило не просто возникновение сжимающих напряжений с выплавлением кратеров (пор) в вершинах, а изменение самой формы дефекта, вплоть до его полного исчезновения. Таким образом, математические модели [3–4, 14–25] не позволяли объяснить наблюдаемые факты, о чем достаточно подробно говорилось в [1].

Для решения поставленной задачи в работах [1, 26–27] предложены модели воздействия электромагнитного поля на предварительно поврежденный материал с дефектами, с помощью которых удалось математически описать экспериментально наблюдаемый процесс трансформации микродефектов в проводящем материале. В частности, в [1, 27] показано, что при определенных условиях микротрещины могут полностью залечиваться. Этот процесс происходит путем одновременного уменьшения длины микротрещины, выброса струи расплавленного металла из вершины внутрь трещины и смыкания ее берегов. В результате берега трещины оказываются «сваренными» расплавленным металлом. В [1] показано, что модель правильно воспроизводит основные особенности электротермомеханических процессов в окрестности дефектов, наблюдаемые экспериментально.

Между тем моделирование (решение начально-краевой задачи) проводилось для определенного представительного элемента (ячейки периодичности) материала при выбранных граничных условиях на его поверхности [1, 27]. В связи с этим представляется

важным выяснить, в какой мере на выявленный процесс залечивания микротрещин (и напряженно-деформированное состояние в их окрестности) влияет расстояние между соседними микротрещинами и их взаимное расположение относительно друг друга.

Для выяснения этого вопроса, в свою очередь, следует, во-первых, оценить ошибку, которую мы допускаем, решая задачу для одного представительного элемента, вместо того чтобы решать ее для всего образца с совокупностью дефектов, и во-вторых, разобраться, как рассматриваемые процессы зависят от граничных условий, которые могут использоваться в модели.

## 1. Постановка задачи, основные уравнения и граничные условия

Рассматривается токопроводящий материал, содержащий одинаковые дефекты типа плоских микротрещин с закругленными вершинами. При этом считается, что дефекты в материале могут располагаться или упорядоченно или хаотически, как показано на рис. 1. В первом случае (рис. 1, а и рис. 1, б) выделение представительного элемента объема (ячейки периодичности) не представляет труда. Во втором случае будем считать, что дефекты распределены по объему в общем равномерно, так что разброс расстояний между центрами микродефектов невелик. В этом случае примем за представительный элемент шар (в плоском случае круг) радиусом  $r_{cp}$ , равным среднему расстоянию между дефектами в материале, как показано на рис. 1, в.

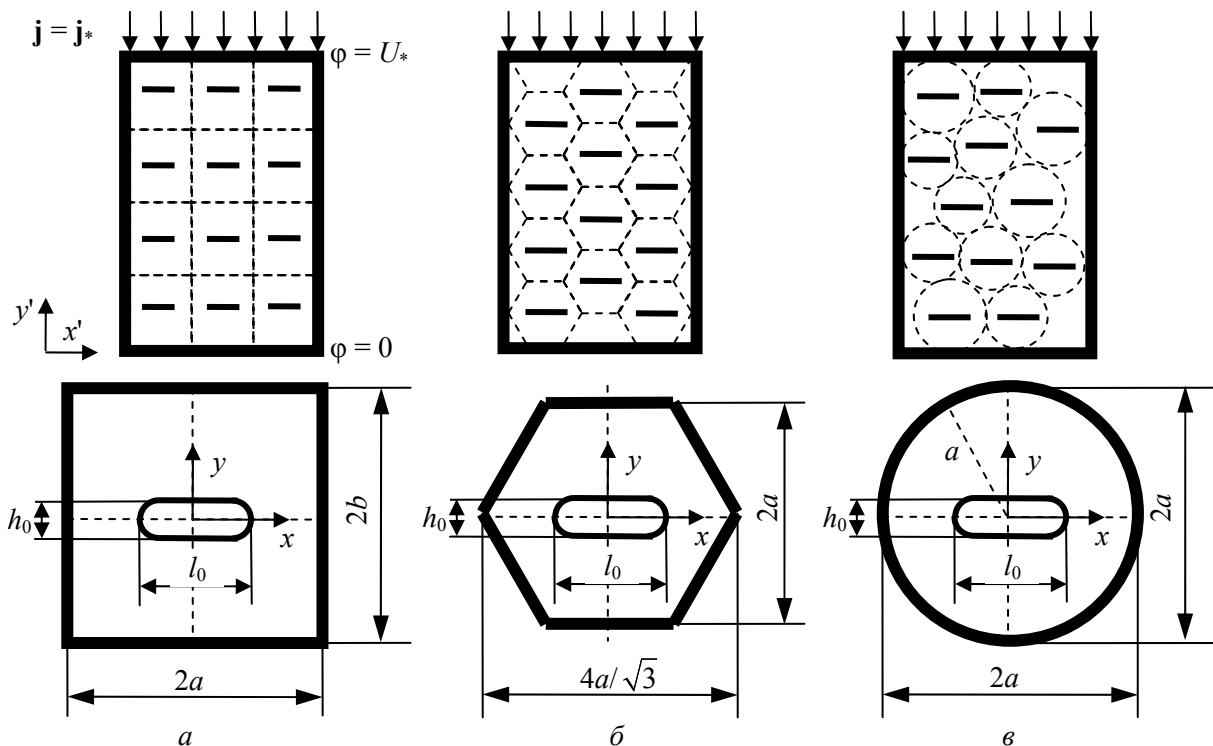


Рис. 1. Расположение дефектов в материале (вверху) и соответствующие представительные элементы (внизу) для микродефектов:  $a$  – в узлах прямоугольной решетки;  $b$  – в узлах гексагональной решетки;  $v$  – при хаотическом расположении

Материал подвергается воздействию короткоимпульсного высокоэнергетического электромагнитного поля определенной интенсивности посредством приложения к наружным границам образца разности потенциалов, вызывающей на этих границах ток с векто-

ром плотности, перпендикулярным плоскости микротрещин, как показано на рис. 1. Будем рассматривать электромагнитные поля, вызывающие в образце ток с плотностью от  $10^8$  до  $10^{10}$  А/м<sup>2</sup> в течение промежутка времени  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с.

Решение ищется в областях интегрирования, содержащих от одной до шести микротрещин или от одной до шести частей представительных элементов, как показано на рис. 2.

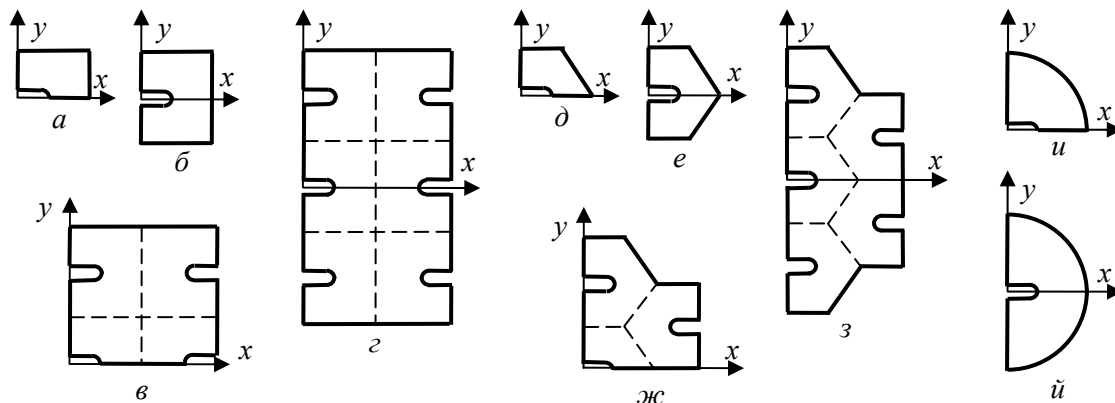


Рис. 2. Рассматриваемые области интегрирования для прямоугольных (а–з), гексагональных (д–з) и круговых (u–й) представительных элементов

При этом ставится задача исследовать процессы изменения электрического и температурного полей в материале и их влияние на фазовые трансформации, напряженно-деформированное состояние, а также процесс залечивания микродефектов. Для решения поставленной задачи используется модель воздействия электромагнитного поля на предварительно поврежденный материал с дефектами [1]. Решение получающейся системы уравнений ищется методом конечных элементов.

В процессе рассматриваемого воздействия в материале протекают следующие физические процессы: электромагнитный, механический и тепловой. Характерное время каждого из этих процессов приблизительно обратно пропорционально скорости распространения соответствующих возмущений. Следовательно, время, требуемое для установления электромагнитных и механических процессов, рассматриваемых в настоящей работе, составляет соответственно  $10^{-13}$ – $10^{-12}$  с и  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  с, что существенно меньше времени внешнего воздействия источника тока ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с). Поэтому для получения электрического потенциала в проводящем материале используется закон сохранения заряда (в предположении, что ток в образце является установившимся), выписанный в вариационной постановке [1]. При этом для проводника считается справедливым закон Ома. Поле перемещений определяется из уравнений равновесия, записанных в форме принципа виртуальной работы [28]. Перемещения предполагаются конечными. Принимается аддитивность скоростей упругих, пластических и температурных деформаций. Для скоростей упругих и пластических деформаций полагается справедливым соответственно закон Гука для изотропного тела и ассоциированный закон течения с условием пластичности Мизеса.

Поле температуры определяется из закона сохранения энергии. Поскольку время электромагнитного воздействия на материал мало ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с), а градиенты температуры в окрестности вершин трещин очень велики ( $10^7$  °С/м) [6–7], то теплопроводностью следует пренебречь и считать процесс адиабатическим. В получающемся эволюционном уравнении для температуры учитывается тепло, выделяемое в единице объема в текущей

конфигурации тела за единицу времени за счёт протекания электрического тока в соответствии с законом Джоуля–Ленца, тепло, выделяемое при пластическом деформировании, а также скрытое тепло, поглощаемое в процессе плавления и испарения.

Температура в рассматриваемых процессах изменяется в диапазоне от комнатной до температуры испарения металла [6–8]. Поэтому в предлагаемой модели все физико-механические характеристики материала (плотность, удельная теплоемкость, электропроводность, коэффициент температурного расширения, упругие модули, предел текучести и т.д.), входящие в вышеприведенные уравнения, зависели от температуры. В точках, где материал расплавился, происходило резкое изменение всех физических свойств материала, а где материал полностью испарился, полагались нулевыми вектор плотности тока и тензор напряжений, а температура – равной температуре испарения.

Таким образом, полная система уравнений для вектора перемещений  $\mathbf{u}$ , электрического потенциала  $\varphi$  и температуры  $T$  рассматриваемой электротермомеханической модели имеет вид [1]

$$\int_V \nabla \delta \varphi \sigma^E(T) \nabla \varphi dV = \int_S \delta \varphi j dS, \quad \mathbf{j} = \sigma^E(T) \mathbf{E} = -\sigma^E(T) \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}}, \quad (1)$$

$$\int_V \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV = \int_S \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} dS + \int_V \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} dV, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th}, \quad (2)$$

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \lambda(T) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} : \mathbf{I} + 2\mu(T) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el}, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \dot{\Lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\Lambda} \mathbf{s}, \quad \bar{\sigma} = \sigma_Y(T), \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad d\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \alpha(T) \mathbf{I} dT, \quad (3)$$

$$\rho(T) c(T) \dot{T} = r^E + r^{pl} + r^{melt} + r^{evap}, \quad r^E = \eta^E \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = \eta^E \nabla \varphi \cdot \sigma^E \cdot \nabla \varphi, \quad r^{pl} = \eta^{pl} \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}, \quad (4)$$

$$T = T_{melt}, \quad t_s \leq t \leq t_1, \quad \int_{t_s}^{t_1} (r^E + r^{pl}) dt = \rho \Lambda_{melt}, \quad (5)$$

$$T = T_{evap}, \quad t_{el} \leq t \leq t_{ev}, \quad \int_{t_{el}}^{t_{ev}} (r^E + r^{pl}) dt = \rho \Lambda_{evap}, \quad (6)$$

где  $V$  – произвольный объем, ограниченный кусочно-гладкой поверхностью  $S$ ;  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к  $S$ ;  $T$  – температура;  $\mathbf{E}$  – вектор интенсивности электрического поля, определенной как отрицательный градиент электрического потенциала  $\mathbf{E} = -\partial \varphi / \partial \mathbf{x}$ ;  $\sigma^E(T)$  – электропроводность;  $j = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{n}$  – плотность тока по нормали к поверхности  $S$ ;  $\delta \varphi$  – вариации электрического потенциала, удовлетворяющие граничным условиям задачи;  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – тензор полных деформаций;  $\mathbf{f}$  – вектор объёмных сил;  $\mathbf{t}$  – вектор поверхностных сил;  $\delta \mathbf{u}$  и  $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$  – вариация перемещений и соответствующих им полных деформаций;  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th}$  – соответственно тензоры скоростей упругих пластических и температурных деформаций;  $\lambda(T)$ ,  $\mu(T)$  – упругие модули Ламе;  $\sigma_Y(T)$  – предел текучести;  $\mathbf{s}$  – девiator тензора напряжений;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор;  $\alpha(T)$  – коэффициент термического расширения;  $\rho(T)$  – плотность;  $c(T)$  – удельная теплоемкость;  $\dot{T}$  – материальная производная температуры;  $r^k$  – тепло, выделяемое в единице объема в текущей конфигурации тела за единицу времени ( $k = E, pl, melt, evap$ );  $r^E$  – тепло, выделяемое за счёт протекания электрического тока;  $r^{pl}$  – тепло, выделяемое при пластическом деформировании;  $r^{melt}$  – тепло, поглощаемое в процессе плавления;  $r^{evap}$  – тепло, поглощаемое в процессе испарения;  $\eta^E$  – эмпириче-

ский коэффициент, который определяется как доля мощности электрического тока в единице объема, рассеявшейся в тепло;  $\eta^{pl}$  – эмпирический коэффициент, который определяется как доля пластической мощности в единице объема, рассеявшийся в тепло;  $T_{melt}$  – температура плавления материала;  $t_s$  – момент времени, при котором материал начинает плавиться;  $t_l$  – момент времени, в который материал полностью расплавится;  $\Lambda_{melt}$  – скрытая теплота плавления;  $T_{evap}$  – температура испарения материала;  $t_{el}$  – момент времени, при котором материал начинает испаряться;  $t_{ev}$  – момент времени, в который материал полностью испарился;  $\Lambda_{evap}$  – скрытая теплота испарения.

Рассмотрим подробно электрические (на потенциал  $\phi$ ) и механические (на  $\mathbf{u}$  и  $\boldsymbol{\sigma}$ ) граничные условия для случая плоской деформации, которые было бы логично использовать в данной задаче, а также начальные условия.

В силу симметрии представительных элементов (см. рис. 1) используемые области интегрирования состояли из половин или четвертей представительных элементов (см. рис. 2).

Граничные условия для  $\phi$  ставились исходя из предположения, что электрическое поле на границе области интегрирования можно рассматривать как не возмущенное наличием дефектов (т.е. как если бы дефекты в материале отсутствовали). В образце без дефектов, к наружной границе которого приложена разность потенциалов (см. рис. 1 (в центре)), невозмущенный потенциал  $\phi_*$  известен и является линейной функцией от одной координаты  $y$ :  $\phi_* = \phi_*(y') = U_*(y'/L)$ , где  $U_*$  – значение разности потенциалов, приложенной к наружным границам образца;  $L$  – длина образца;  $y'$  – координата в системе координат, связанной с образцом (см. рис. 1).

Исходя из этого на границах областей интегрирования (см. рис. 2), которые не проходят по поверхностям трещин и осям симметрии представительных элементов, можно задать или «невозмущенный» потенциал или соответствующую «невозмущенную» плотность тока, связь между которыми определяется законом Ома (второе уравнение (1)). Однако дефекты в модельном материале имеются, и понятно, что такие условия на границах областей интегрирования должны выполняться приближенно, причем точность их выполнения повышается с увеличением расстояния от дефекта до границы области (см. рис. 2). Между тем следует разобраться, какое из этих условий лучше отражает состояние на границе и, следовательно, какое из них следует предпочесть применительно к рассматриваемой задаче.

Если граница области интегрирования проходила по вертикальной оси симметрии представительного элемента, то на ней ставилось условие равенства нулю производной по нормали к оси, что соответствовало отсутствию нормальной к границе компоненты вектора плотности тока. Если же граница области интегрирования проходила по горизонтальной оси симметрии представительного элемента, то на ней ставилось условие постоянства потенциала на данной границе, что соответствовало отсутствию касательной к границе компоненты вектора плотности тока.

Поскольку трещина ток не проводила, то там, где граница области интегрирования проходила по поверхности трещины, ставилось условие равенства нулю производной потенциала  $\phi$  по нормали к границе, что соответствовало отсутствию нормальной к границе компоненты вектора плотности тока.

Кроме того, принималось, что форма электромагнитного импульса такова, что электрические граничные условия не зависят от времени, т.е. заданные на границе разность



потенциалов или плотность тока считались постоянными в течение всего времени действия электромагнитного импульса  $\tau_0$ .

В результате рассматриваемого воздействия электрическим полем напряженно-деформированное состояние в представительном элементе с рассматриваемым дефектом, находящимся в окружении других таких же дефектов, оказывалось или таким же (в случаях, изображенных на рис. 1, а и 1, б), или примерно таким же (в случае, изображенном на рис. 1, в), как НДС окружающих дефектов. Поэтому на границе области интегрирования, которая не проходила по поверхности трещины и осям симметрии представительного элемента, можно положить равными нулю нормальную к данной границе компоненту вектора перемещений и касательную компоненту тензора напряжений. Если граница области интегрирования проходила по вертикальной и горизонтальной оси симметрии представительного элемента, то на ней также ставилось условие равенства нулю нормальной к данной границе компоненты вектора перемещений и касательной компоненты тензора напряжений.

Поверхность трещины принималась свободной от напряжений.

Конкретизируя изложенное, выпишем электрические и механические граничные условия для областей интегрирования, показанных на рис. 2, а–б, д–е, и–й и содержащих одну трещину. Граничные условия для областей интегрирования (см. рис. 2), содержащих более одной трещины, задавались аналогично.

Для областей интегрирования, состоящих из прямоугольных элементов (см. рис. 1, а, рис. 2, а, б), на горизонтальных участках границы области (за исключением поверхности трещины) задавались два различных условия: или постоянная по пространству разность потенциалов, или постоянный по пространству вектор плотности электрического тока, нормальный к границе (при этом значения разности потенциалов и плотности тока связаны друг с другом, как указано ниже). На вертикальных границах области интегрирования ставилось условие отсутствия нормальной к границе производной потенциала.

Для области интегрирования, равной половине представительного элемента (см. рис. 2, б), электрические граничные условия соответственно имели вид

$$\varphi(x, b, t) = \varphi_*(b), \quad (7a)$$

$$\varphi(x, -b, t) = -\varphi_*(b) \quad (7b)$$

$$j_y(x, b, t) = j_*, \quad j_x(x, b, t) = 0, \quad (8a)$$

$$j_y(x, -b, t) = j_*, \quad j_x(x, -b, t) = 0, \quad (8b)$$

$$\partial\varphi / \partial x|_{x=0} = 0, \quad (9a)$$

$$\partial\varphi / \partial x|_{x=a} = 0. \quad (9b)$$

При этом считалось что значения  $\varphi_0$  и  $j_0$  в (7)–(8) связаны соотношением

$$j_0 = j_* = \sigma^E(T_0)\varphi_*(b)/b, \quad (10)$$

означающим, что электрическое поле на границе рассматривается как невозмущенное. Граничные условия (9b) являются результатом наличия в рассматриваемом случае еще одной оси симметрии задачи и не противоречит вышеизложенному условию невозмущенности поля на границе.

Механические граничные условия имели вид

$$x = 0: \quad u_x = 0, \quad \sigma_{xy} = 0, \quad (11a)$$

$$x = a: \quad u_x = 0, \quad \sigma_{xy} = 0, \quad (11b)$$

$$y = b: \quad u_y = 0, \quad \sigma_{xy} = 0, \quad (11c)$$

$$y = -b: \quad u_y = 0, \quad \sigma_{xy} = 0. \quad (11d)$$

Для области интегрирования, равной четверти представительного элемента (рис. 2, *a*), электрические граничные условия принимались в виде (7а) или (8а), (9а), (9б), а вместо условия (7б) использовалось условие

$$\varphi(x, 0, t) = \varphi_*(0) = 0 \quad (7c)$$

или вместо условия (8б) – граничное условие

$$j_x(x, 0, t) = 0. \quad (8c)$$

Механические граничные условия имели вид (11а)–(11с), а вместо условия (11d) использовалось условие

$$y = 0: \quad u_y = 0, \quad \sigma_{xy} = 0 \quad (11e)$$

Для областей интегрирования, состоящих из шестиугольных и круговых элементов (рис. 1, *б*, *в*), выбирались следующие граничные условия.

На участке границы  $\Gamma_1$ :  $y = \Phi(x)$ , которая не проходит по поверхности трещины и осям симметрии представительного элемента (см. рис. 2, *д*, *е*, *и*, *й*), задавались невозмущенный потенциал, отсутствие нормальной к границе компоненты вектора перемещений и отсутствие касательной компоненты тензора напряжений:

$$\varphi(x, y, t)|_{\Gamma_1} = \varphi_*(y), \quad (7d)$$

$$\mathbf{u}_n|_{\Gamma_1} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma}_\tau|_{\Gamma_1} = 0, \quad (11f)$$

где  $\mathbf{u}_n$  – нормальная компонента вектора перемещений на границе  $\Gamma_1$ ;  $\boldsymbol{\sigma}_\tau$  – касательные компоненты тензора напряжений на границе  $\Gamma_1$ .

На участке границы области интегрирования  $\Gamma_2$ , который проходил по горизонтальной оси симметрии представительного элемента (см. рис. 2, *д*, *е*, *и*, *й*), задавались условие постоянства потенциала на данной границе (7с) и отсутствие нормальной к границе компоненты вектора перемещений и касательной компоненты тензора напряжений в виде условия (11с).

На участке границы области интегрирования  $\Gamma_3$ , который проходил по вертикальной оси симметрии представительного элемента (рис. 2, *д*, *е*, *и*, *й*), задавались отсутствие нормальной к границе компоненты вектора плотности тока (9а) и отсутствие нормальной к границе компоненты вектора перемещений, а также отсутствие касательной компоненты тензора напряжений в виде условия (11а).

На участке границы области интегрирования  $\Gamma_4$ , где граница области интегрирования проходила по поверхности трещины, ставилось условие равенства нулю производной потенциала  $\varphi$  по нормали поверхности, а поверхность считалась свободной от напряжений.

Начальные поля температуры, перемещений и электрического потенциала полагались однородными ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\mathbf{u}_0 = 0$ ,  $\varphi_0 = 0$ ).

## 2. Результаты численного моделирования

Все уравнения системы (1)–(6) связаны, совместно с граничными условиями (7)–(11) и начальными условиями они решаются численно. Расчеты проводились для плоской деформации с использованием линейных четырехузловых изопараметрических и трехузловых конечных элементов. Перестройка сетки осуществлялась на основе смешанного эйлера-лагранжева метода. Эволюционное уравнение для температуры решалось непосредственно в каждой точке интегрирования с использованием аппроксимации производной температуры обратной разностью по времени. Для вычислений использовался пакет программ АСТРА, разработанный под руководством проф. Н.Г. Бураго в лаборатории моделирования в МДТТ ИПМех РАН.

Моделирование проводилось для образцов из цинка [1, 27]. Начальная длина всех микротрещин  $l_0$  принималась равной 10 мкм. Начальное расстояние между берегами принималось  $h_0 = 1$  мкм, а радиус кривизны в вершине микротрещины  $r_0 = 0,5$  мкм.

Размеры представительного элемента изменялись в диапазоне 20–240 мкм, что соответствовало расстояниям между вершинами трещин 10–230 мкм (см. рис. 1). Остановимся подробнее на причинах выбора именно такого интервала расстояний между дефектами. Действительно, средние размеры зерен подавляющего большинства металлов и сплавов, включая цинк, составляют десятки микрон, поэтому рассматривать при таких размерах зерен расстояния между вершинами межзеренных трещин менее 10 мкм, нецелесообразно. Кроме того, представляется, что при меньшем расстоянии между микротрещинами материал уже нельзя считать неразрушенным в смысле макро- (мезо-) разрушения. С другой стороны, рассматривать расстояния, большие 230 мкм, также не имеет смысла, поскольку, как будет видно из приведенных ниже результатов моделирования, дальнейшее увеличение этого расстояния никак не влияет на изучаемые процессы. Таким образом, рассматриваемый интервал в принципе охватывал весь диапазон возможных расстояний между микродефектами, которые могли возникнуть в материале в процессах его электропластического деформирования или эксплуатации, предшествующих макроразрушению.

Разность потенциалов (на единицу длины), используемая в расчетах, составляла 534,3 мВ/мм, которой соответствовал ток в материале без дефектов плотностью 8,95 кА/мм<sup>2</sup>.

Расчеты показывают, что при пропускании электрического тока через образец с микротрещинами в их окрестности возникают большие градиенты электрического поля, приводящие к значительному увеличению плотности тока в окрестности вершин трещин по сравнению с плотностью тока, приложенного к образцу. Это вызывает быстрый неоднородный локальный нагрев в окрестности вершины микротрещины и плавление материала, сопровождаемые его тепловым расширением (в то же время нагрев не происходит в области центра трещины на ее берегах). Это приводит к большим сжимающим напряжениям (давление может составлять свыше 100 МПа) в окрестности микротрещины и как следствие одновременному смыканию берегов (уменьшению ширины), уменьшению длины трещины и выбросу расплавленного материала в трещину (рис. 3).

На рис. 3, *а* и 3, *б* показаны границы залечивающейся микротрещины и поле температуры в ее окрестности при приложении к границе области интегрирования разности потенциалов для различных расстояний между дефектами (но при одинаковой длине залеченной трещины). Штриховой линией на рисунках показана первоначальная граница трещины (при  $t = 0$ ). Расстояние между центрами соседних микротрещин 60 и 20 мкм со-

ответственно. Приводятся результаты моделирования для микротрещины с центром в точке  $x = 0, y = 0$  в области интегрирования (см. рис. 2, ж (3 микротрещины с гексагональным расположением (см. рис. 1, б)).

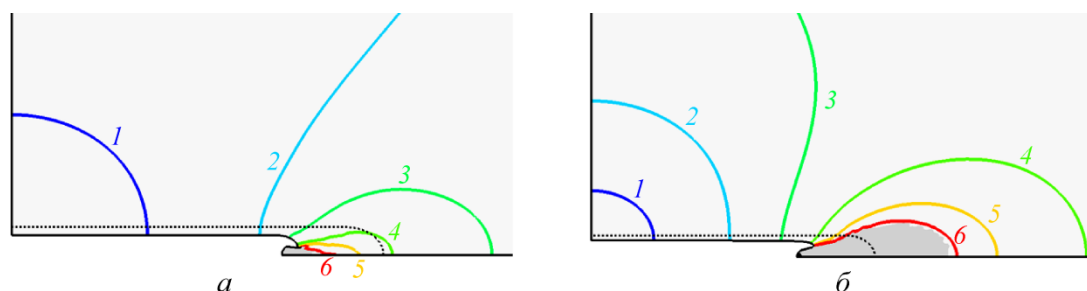


Рис. 3. Залечивание микротрещины (штриховой линией показана первоначальная граница трещины) и изолинии температуры  $^{\circ}\text{C}$  (1 – 25, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 200, 5 – 300, 6 – 400, тёмно-серым цветом показана область плавления ( $T \geq 419^{\circ}\text{C}$ ), черным – область испарения  $T = 906^{\circ}\text{C}$ ); а – в момент времени  $t = 19,2$  мкс при расстоянии между микротрещинами 60 мкм; б – в момент времени  $t = 71,0$  мкс при расстоянии между микротрещинами 20 мкм

Данный процесс происходит до тех пор, пока струя расплавленного металла не оказывается полностью зажатой берегами трещины (рис. 4). Таким образом, берега трещины оказываются «сваренными» расплавленным металлом. Далее весь описанный процесс повторяется снова уже для микротрещины новых меньших размеров, что приводит к полному залечиванию микротрещины.

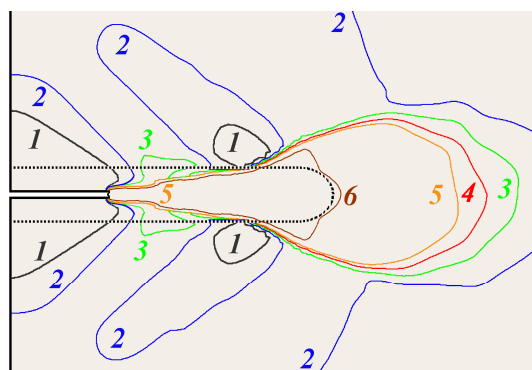


Рис. 4. Границы микротрещины и изолинии интенсивности пластических деформаций (1 – 0,010; 2 – 0,0375; 3 – 0,0650; 4 – 0,0925; 5 – 0,120; 6 – 1,00) при воздействии импульсом тока величиной  $8,95 \text{ кА/мм}^2$  и расстояние между центрами соседних микротрещин 180 мкм (штриховой линией показана первоначальная граница трещины)

На примере областей интегрирования, состоящих их квадратных ( $a = b$ ) представительных элементов (см. рис. 1, а), рассмотрим, как процессы залечивания зависят от граничных условий (7)–(8), и оценим точность соблюдения граничных условий (7), (8) и (11) на границе одного представительного элемента. Для этого решим задачи о воздействии электромагнитным полем на 4 и 6 микротрещин соответственно в областях интегрирования (см. рис. 2, в, г). На границах данных областей задавалась или разность потенциалов (7), или соответствующая ей плотность тока (8). Рассматривался представительный элемент с центром в точке  $x = 0, y = 0$ , который находился внутри областей интегрирования (см. рис. 2, в, г) (далее – «внутренний представительный элемент»). Изучались значения электрического потенциала, плотности тока, нормальных перемещений и касательных

напряжений на вертикальных и горизонтальных прямых, образующих границы внутреннего представительного элемента, а также на вертикальной и горизонтальной осях симметрии элемента и отклонения этих получаемых в расчетах значений от значений, определяемых из условий (7)–(11). Величина отклонения определяла точность соблюдения условий (7)–(11) на границах и осях симметрии внутреннего представительного элемента. Одновременно исследовалось влияние граничных условий (7)–(8) на процессы залечивания микротрещины и НДС во внутреннем представительном элементе. Данные расчеты проводились во всем рассматриваемом диапазоне расстояний между микротрещинами (от 10 до 230 мкм) и сравнивались с расчетами для областей интегрирования, содержащих один представительный элемент (см. рис. 2, *а* и 2, *б*), при задании на его границах условий (7)–(11).

Моделирование показало, что при расстояниях между трещинами от 60 мкм до 230 мкм для рассматриваемых областей интегрирования на границах внутреннего представительного элемента и его горизонтальной оси с высокой точностью выполняются все «граничные» условия (7)–(8), (9) и (11). Причем с увеличением этого расстояния от 60 до 160 мкм различия между решениями постепенно уменьшались, а при расстояниях между трещинами, больших 160 мкм на границах и внутри внутреннего представительного элемента, решения совпадали между собой при задании любого из условий (7) или (8) на внешних границах области интегрирования.

Расчеты для расстояний между трещинами в диапазоне от 60 до 20 мкм показали хорошее выполнение только условий (7), (9) и механических граничных условий (11). Очевидно, что максимальное отклонение в соблюдении данных условий на границе внутреннего представительного элемента будет наблюдаться при минимальном из рассматриваемых расстояний между трещинами. Определим точность соблюдения условий (7), (8), (11) как максимум модуля отклонения значения, рассчитанного на границах внутреннего представительного элемента, от значения, определенного данным условием, отнесенного к максимальному значению измеряемой величины в процентах. Моделирование для расстояний между трещинами 20 мкм показало, что точность соблюдения условий составила для условия (7а) и (7б) – 0,017 %, (7д) – 0,017 %, первого условия (11б) – 0,010 %, первого условия (11с) – 0,011 %, для второго условия (11б) – 0,019 %, второго условия (11с) – 0,057 %, а для условий (7с) – 0,004 %, первого и второго условий (11е) – 0,005 % и 0,008 % соответственно. С увеличением расстояния между вершинами трещин до 60 мкм эта точность дополнительно возрастала.

Между тем условия (8а)–(8б) на горизонтальной границе внутреннего представительного элемента выполнялись с недостаточной точностью. Для расстояний между трещинами 20 мкм точность выполнения условий (8а)–(8б) оказалась 15,6 %, т.е. существенно ниже точности условий (7а)–(7б). Поэтому задавать на границе представительного элемента для областей интегрирования (см. рис. 2) невозмущенную плотность электрического тока в рассматриваемой модели неоправданно.

Вышеизложенное проиллюстрировано рис. 5–6. На рис. 5, *а* представлены зависимости длины трещины (расстояния  $l$  между ее вершинами (см. рис. 1, *а*)) от времени для различных областей интегрирования (см. рис. 2, *а–г*) при различающихся граничных условиях на их горизонтальных поверхностях: когда задана разность потенциалов (условие (7)) или соответствующая ей плотность тока (условия (8)). В то время как на рис. 5, *б* представлены аналогичные зависимости для ширины микротрещины (максимального расстояния  $h$  между берегами трещины, которое наблюдается в ее центре в точке  $x = 0, y = 0$  (см. рис. 1)) от времени.

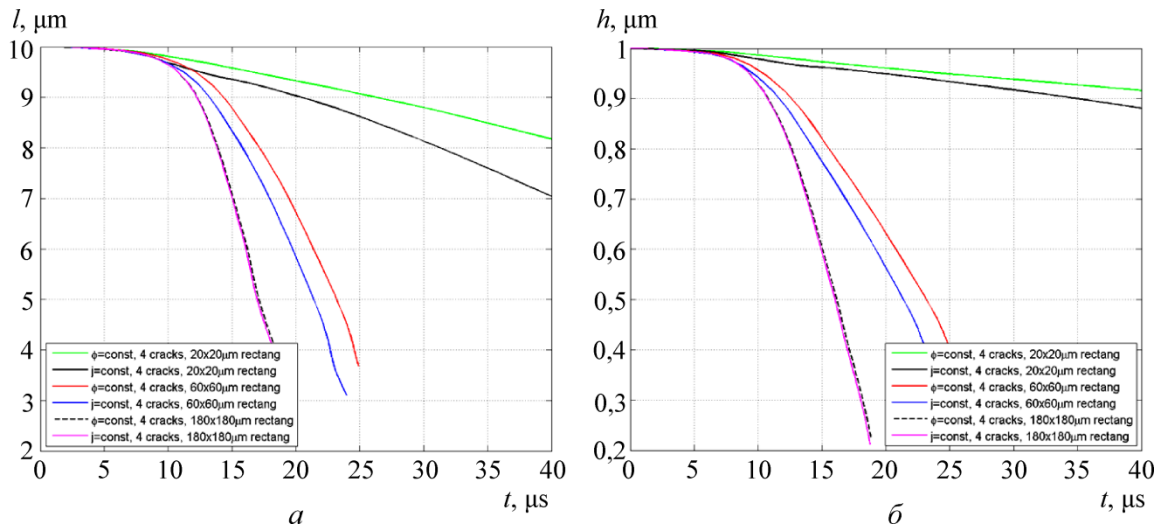


Рис. 5. Зависимости длины трещины  $l$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) для областей интегрирования различных размеров, содержащих 4 микротрещины (рис. 2, в), при задании на их горизонтальных поверхностях разности потенциалов ( $\phi = \text{const}$ ) или соответствующей ей плотности тока ( $j = \text{const}$ ) (а); аналогичные зависимости ширины трещины  $h$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) (б)

Из рис. 5 видно, что выбор граничных условий (7) или (8) начинает заметно влиять на процесс залечивания и при расстояниях между вершинами микротрещин становится менее 5–6 длин этих трещин. Для больших расстояний не играет особой роли, какое именно из условий выбрать – оба решения (с граничными условиями (7) или (8)) стремятся друг к другу с увеличением расстояния между дефектами. Однако различия между этими решениями увеличиваются по мере уменьшения расстояния между трещинами, что видно в том числе из представленных кривых (см. рис. 5). Процесс залечивания протекает быстрее при граничных условиях с заданной плотностью тока по сравнению с граничным условием с заданной соответствующей ей разностью потенциалов. Это объясняется тем, что при постановке граничного условия (7) происходит падение плотности тока на границе по сравнению с его «невозмущенным» значением (10).

Таким образом, в дальнейшем используется условие (7) как более точное и имеющее ясный физический смысл. Причем значение разности потенциалов на границе представительного элемента определяется исходя из условия «невозмущенности» электрического потенциала в материале. Однако при этом следует иметь в виду, что оба решения стремятся друг к другу с увеличением расстояния между трещинами, а процесс залечивания проходит при условии (8) несколько быстрее.

Для оценки возможности решения задачи и моделирования процессов залечивания в области, состоящей из одного представительного элемента с выбранными граничными условиями, вместо ее решения для всего образца рассмотрим отличия получающихся решений для областей интегрирования, состоящих из нескольких прямоугольных ( $a = b$ ) и шестиугольных представительных элементов (рис. 2, а–г и рис. 2, д–з).

Расчеты для областей интегрирования, содержащих 1, 4 и 6 микротрещин (квадратных представительных элементов), приведенных на рис. 2, а–г, показали, что имеет место очень хорошее совпадение результатов, полученных при моделировании процесса залечивания микротрещины (центр которой находится в точке  $x = 0$ ,  $y = 0$ ). Зависимости длины и ширины микротрещины от времени практически совпадали между собой в большей части исследуемого диапазона размеров представительных элементов (рис. 6). Даже моделирование для элемента размером 20 мкм (когда имеет место наиболее сильное взаимодействие микродефектов) показало хорошее согласование этих кривых (см. рис. 6).

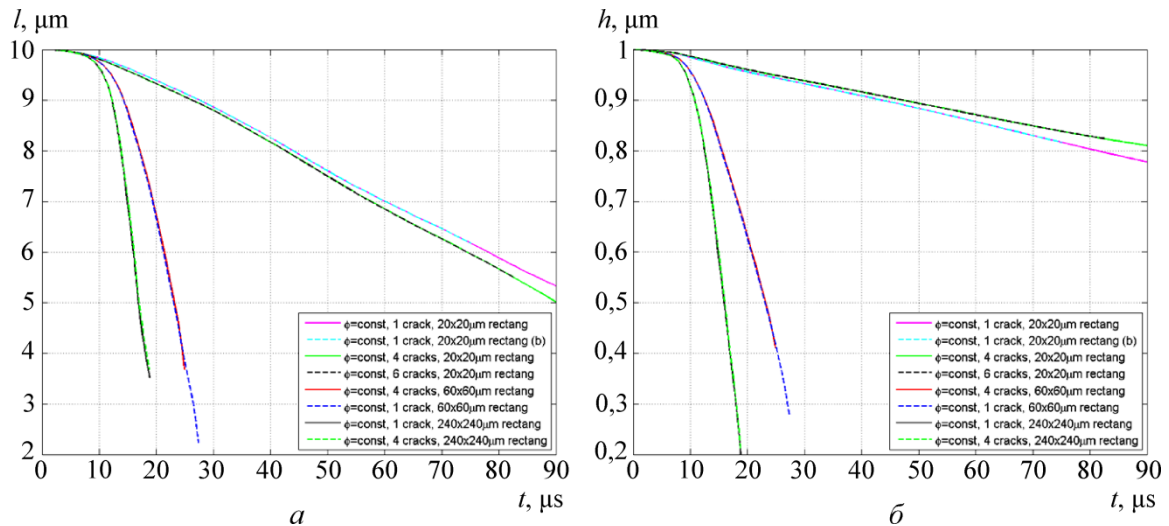


Рис. 6. Зависимости длины трещины  $l$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) для областей интегрирования различных размеров, содержащих 1, 4 и 6 микротрещин (см. рис. 2,  $a$ – $z$ ) в квадратных представительных элементах, при задании на их горизонтальных поверхностях разности потенциалов ( $\varphi = \text{const}$ ) ( $a$ ); аналогичные зависимости ширины трещины  $h$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) ( $b$ )

Аналогичные расчеты, выполненные для областей интегрирования, содержащих 1, 3 и 5 микротрещин (шестиугольных представительных элементов), приведенных на рис. 2,  $d$ – $z$ , также показали, что имеет место хорошее совпадение результатов, полученных при моделировании процесса залечивания микротрещины (центр которой находится в точке  $x = 0, y = 0$ ). И в этом случае зависимости длины и ширины микротрещины от времени практически совпадали между собой в достаточно большой части исследуемого диапазона размеров представительных элементов. Для элемента размером 20 мкм также имеется достаточно неплохое согласование этих кривых (рис. 7). В этом случае моделирование показало, что точность соблюдения условий (7), (11) ниже, чем для квадратных представительных элементов. При расстоянии между центрами трещин 20 мкм она составила для условия (7d) – 1,37 %, для первого условия (11f) – 3,77 %, для второго условия (11f) – 10,75 %, а для условий (7c) – 0,008 %, первого и второго условий (11e) – 0,008 и 0,009 % соответственно. С увеличением расстояния между микротрещинами до 60 мкм эта точность существенно возрастала (для условия (7d) – 0,12 %, для первого условия (11f) – 0,76 %, для второго условия (11f) – 2,69 %), что нашло свое отражение в практически полном совпадении кривых на рис. 7 для областей интегрирования, содержащих 1 и 3 микротрещины.

Как сообщалось выше, точность соблюдения условий на горизонтальной оси симметрии представительного элемента (7c) и (11e) очень высока. Об этом свидетельствуют полное совпадение результатов расчетов (см. рис. 6 и 7) для областей интегрирования, содержащих 4 и 6 микротрещин (см. рис. 2,  $v, z$ ) и 3 и 5 микротрещин (см. рис. 2,  $ж, з$ ), а также 1 и 1/2 микротрещины (половину и четверть представительного элемента), показанных на рис. 2,  $a, б$ .

На основании вышеизложенного при моделировании процесса залечивания микротрещин в материале с упорядоченной структурой дефектов (см. рис. 1,  $a, б$ ) можно без существенной потери точности ограничиться рассмотрением в качестве области интегрирования одной четверти представительного элемента (см. рис. 2,  $a, д$ ), задавая на соответствующей границе разность потенциалов, определенную исходя их условия невозмущенности электрического поля (7d), и механические граничные условия (11f). Точность со-

блюдения этих условий возрастает по мере увеличения расстояния между соседними трещинами, так что при расстояниях между трещинами, составляющих 5–6 их длин, процесс залечивания будет протекать одинаково, независимо от того, моделируем мы его в области, состоящей из одного или нескольких представительных элементов.

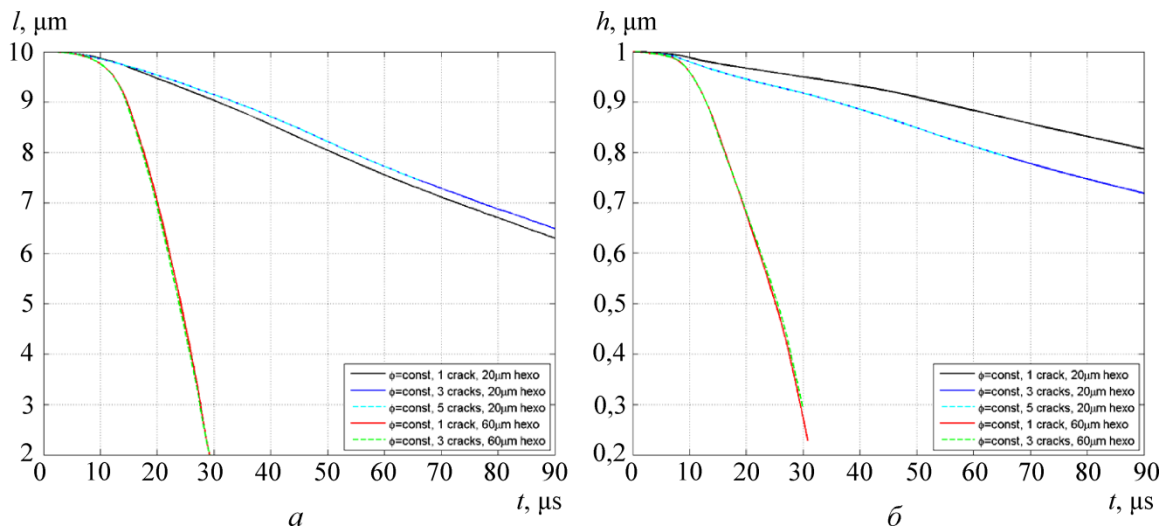


Рис. 7. Зависимости длины трещины  $l$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) для областей интегрирования различных размеров, содержащих 1, 3 и 5 микротрещин (рис. 2,  $e-h$ ) в шестиугольных представительных элементах, при задании на их границе разности потенциалов ( $\varphi = \text{const}$ ) (а); аналогичные зависимости ширины трещины  $h$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) (б)

По аналогии представляется, что для материала с хаотической структурой дефектов (см. рис. 1,  $в$ ) также можно ограничиться рассмотрением в качестве области интегрирования одной четверти представительного элемента (см. рис. 2,  $в$ ), задавая на его границах условия (7d), (11f), которые будут приближенно отражать состояние в таком материале.

На осях симметрии любого из рассматриваемых представительных элементов принимаются условия (7с), (11е) и (9а), (11а).

Таким образом, выбранные граничные условия позволяют без существенной потери точности ограничиться при моделировании процессов залечивания и взаимодействия микротрещин рассмотрением в качестве области интегрирования одной четверти симметричного представительного элемента (вместо рассмотрения областей интегрирования, содержащих несколько представительных элементов).

Рассмотрим теперь, как на выявленный процесс залечивания микротрещин (и напряженно-деформированное состояние в их окрестности) влияет расстояние между соседними микротрещинами и их взаимное расположение относительно друг друга.

На рис. 8 представлены зависимости длины  $l(t)$  и ширины  $h(t)$  микротрещины от времени для различных областей интегрирования, представляющих одну четверть квадратного, шестиугольного и кругового представительных элементов (см. рис. 2,  $а, д, и$ ) с граничными условиями (7d), (11f). Размеры представительных элементов подбирались так, чтобы расстояния между центрами соседних микротрещин были одинаковыми. Таким образом, исследуются состояния, когда трещины находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, но их взаимные расположения различаются.

Из сравнения данных кривых видно, что все решения достаточно близки даже при расстоянии между трещинами 20 мкм (т.е. при расстоянии между вершинами трещин, равном их длине). С увеличением расстояния между микротрещинами все три решения



стремятся друг к другу. Таким образом, имеет место уменьшение влияния взаимного расположения трещин на процессы их залечивания при увеличении расстояния между трещинами. Начиная с расстояний, превышающих 60 мкм, процессы залечивания происходят практически одинаково при любом расположении трещин относительно друг друга.

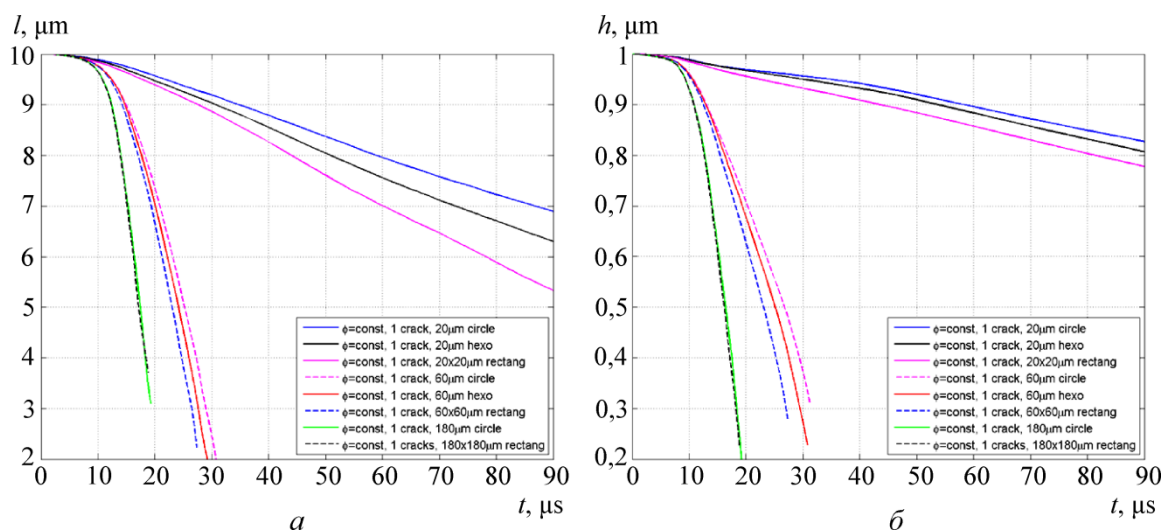


Рис. 8. Зависимости длины трещины  $l$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) для областей интегрирования различных размеров, представляющих одну четверть квадратного, шестиугольного и кругового представительных элементов, при задании на их границе разности потенциалов ( $\varphi = \text{const}$ ) (а); аналогичные зависимости ширины трещины  $h$  (мкм) от времени  $t$  (мкс) (б)

Из анализа рис. 5–8 видно, что взаимодействие между микротрещинами начинает заметно сказываться на процессе их залечивания, когда расстояние между ними сокращается примерно до 5–6 длин микротрещин. Если же расстояние между трещинами превышает 6 и более их длин, то время, требуемое для залечивания микротрещин, становится слабозависящим как от расстояния между дефектами, так и от взаимного расположения этих дефектов относительно друг друга.

Моделирование показало, что взаимодействие микротрещин, вызванное уменьшением расстояния между ними вплоть до 10–20 мкм, качественно не меняет вышеописанный процесс залечивания, однако приводит к его существенному замедлению (что вполне объяснимо из энергетических соображений). Выброс расплавленного материала в трещину по-прежнему имеет место. Однако процессы уменьшения длины микротрещины и сближение берегов микротрещины замедляются во времени (см. рис. 3, рис. 5–8). Причем из сравнения кривых на рис. 5–8 видно, что с уменьшением расстояния между дефектами процесс сближения берегов замедляется сильнее, нежели процесс уменьшения длины трещины.

На рис. 9 и рис. 10 соответственно представлены в сравнении поля температуры  $T$  и нормальных напряжений  $\sigma_{xx}$  в окрестности микротрещины при расстоянии между вершинами микротрещин соответственно 10 и 50 мкм в момент времени 13,9 мкс.

Из сравнения данных полей видно, что взаимодействие микротрещин приводит к уменьшению сжимающих напряжений в окрестности дефекта, притом, что картины оказываются качественно схожи. Аналогичная картина наблюдается и для  $\sigma_{yy}$ . Замедление процесса залечивания приводит к тому, что часть расплавленного материала в вершине струи успевает не только расплавиться, но и испариться (см. рис. 3, б).

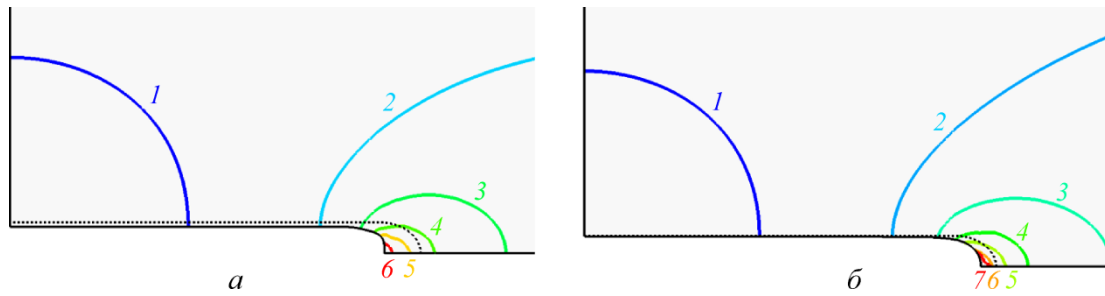


Рис. 9. Изолинии температуры °С (1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 419) в момент времени  $t = 13,9$  мкс при расстоянии между центрами микротрещин 60 мкм (а); 20 мкм (б)

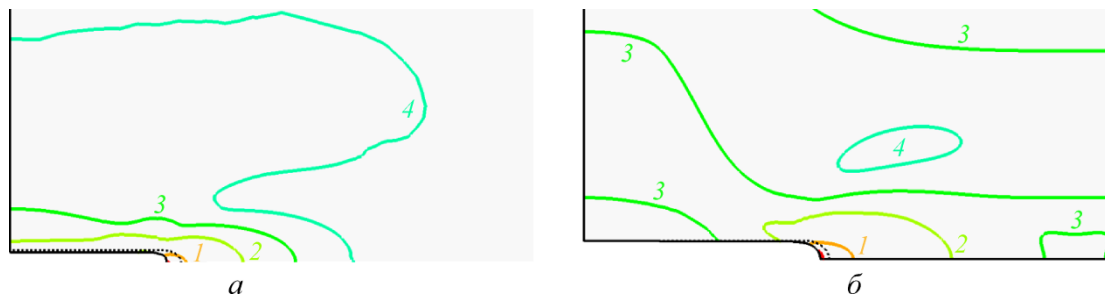


Рис. 10. Изолинии напряжений  $\sigma_{xx}$  МПа (1 – 10; 2 – 30; 3 – 50; 4 – 70) в момент времени  $t = 13,9$  мкс при расстоянии между центрами микротрещин 60 мкм (а); 20 мкм (б)

## Заключение

При моделировании процесса залечивания микротрещин можно без потери точности ограничиться рассмотрением в качестве области интегрирования одной четверти представительного элемента (см. рис. 2, а), задавая на ее границах разность потенциалов (7), определенную исходя из условия невозмущенности электрического поля (10) и механические условия (11). При этом точность соблюдения данных условий на границе внутреннего представительного элемента возрастает по мере увеличения расстояний между соседними трещинами, так что при расстояниях между трещинами, превышающих 5–6 их длин, процессы залечивания будут протекать одинаково, независимо от того, моделируем мы их в области интегрирования, состоящей из одного или нескольких представительных элементов.

Имеет место уменьшение влияние взаимного расположения дефектов на процессы их залечивания при увеличении расстояния между микротрещинами. Начиная с расстояний, превышающих 6 длин трещин, время залечивания микротрещины оказывается примерно одинаковым при любом расположении трещин относительно друг друга.

Моделирование показало, что взаимодействие между микротрещинами начинает заметно сказываться на процессе их залечивания, когда расстояние между ними сокращается до 5–6 длин микротрещин. Если же расстояние между трещинами превышает шесть и более их длин, то процессы залечивания микротрещин становятся практически не зависящими как от расстояния между дефектами, так и от расположения дефектов относительно друг друга.

Уменьшение расстояния между трещинами вплоть до 1–2 их линейных размеров (с учетом изменения их взаимного расположения) качественно не меняет описанный про-

цесс залечивания, однако приводит к его существенному замедлению: выброс расплавленного материала в трещину сохраняется, но уменьшение трещины особенно в поперечном направлении значительно сокращается.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-08693).*

## Библиографический список

1. Кукуджанов К.В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 138–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09
2. Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля. – Препринт № 372. ИПМ АН СССР / Н.Н. Беклемишев, В.Н. Кукуджанов, В.А. Порохов [и др.]. – М., 1989. – 56 с.
3. Беклемишев Н.Н. Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М.: 1986. – 305 с.
4. Ключников В.Д., Овчинников И.В. Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла // Изв. АН СССР. МТТ. – 1988. – № 4. – С. 118–122.
5. Овчинников И.В. Влияние воздействия электротока на пластичность металлов: дис. д-ра физ.-мат. наук. – М., 1989. – 123 с.
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. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. Разрушение вершины трещины силовым электромагнитным полем // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 237, № 2. – С. 325–327.
8. Finkel' V.M., Ivanov V.M., Golovin Yu.I. Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields // Strength of Materials. – 1983. – Vol. 15. – No. 4. – P. 501–506. DOI: 10.1007/BF01522429
9. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts / L.B. Zuev, V.Ya. Tsellermaer, V.E. Gromov, V.V. Murav'ev // Tech. Phys. – 1997. – Vol. 49. – No. 2. – P. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774
10. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability / L.B. Zuev, O.V. Sosnin, D.Z. Chirakadze, V.E. Gromov, V.V. Murav'ev // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 1998. – Vol. 39. – No. 4. – P. 639–641.
11. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства). Т. 1. Институт компьютерных исследований / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. – Москва; Ижевск, 2004. – 590 с.
12. Song Hui, Wang Zhong-jin, Gao Tie-jun. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // Trans. Nonferrous Soc. China. – 2007. – Vol. 17. – P. 87–92.
13. Atsushi Hosoi, Tomoya Kishi, Yang Ju. Healing of Fatigue Crack Treated with Surface-Activated Pre-Coating Method by Controlling High-Density Electric Current // 13th International Conference on Fracture, June 16–21, 2013, Beijing, China. – P. 233–245.
14. Салганик Р.Л. Термоупругое равновесие тела с трещинами при разогреве, вызванном пропуском тока перпендикулярно трещинам // Изв. АН СССР. МТТ. – 1978. – № 5. – С. 141–152.
15. Салганик Р.Л. Разогрев материала с эллипсоидальной неоднородностью вследствие электрических потерь // Изв. АН СССР. МТТ. – 1980. – № 6. – С. 98–109.
16. Кудрявцев Б.А., Партон В.З., Рубинский Б.Д. Электромагнитное и температурное поле в пластине с разрезом конечной длины // Изв. АН СССР. МТТ. – 1982. – № 1. – С. 110–118.
17. Партон В.З., Кудрявцев Б.А., Рубинский Б.Д. Распространение трещины под действием сильного электрического поля // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 250, № 5. – С. 1096–1100.

18. Овчинников И.В. Определение ресурса пластичности при воздействии тока // Проблемы прочности. – 1993. – №6. – С. 54–59.
19. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов // Известия РАН. МТТ. – 2010. – № 3. – С. 188–199. DOI: 10.3103/S0025654410030167
20. 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
21. Коломиец А.В., Кукуджанов В.Н., Кукуджанов К.В. О переходе неоднородных упруго-пластических материалов с дефектами в макроразрушенное состояние. – Препринт № 1053 ИПМ РАН. – М., 2013. – 42 с.
22. Моделирование неупругого разрушения неоднородных материалов при электродинамическом и термомеханическом воздействиях / А.В. Коломиец, В.Н. Кукуджанов, К.В. Кукуджанов, А.Л. Левитин. – Препринт № 1054, ИПМ РАН. – М., 2013. – 35 с.
23. Liu T.J.C. Effects of temperature-dependent material properties on stress and temperature in cracked metal plate under electric current load // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. – 2010. – Vol. 4. – No. 5. – P. 387–392.
24. Numerical Calculation and Experimental Research on Crack Arrest by Detour Effect and Joule Heating of High Pulsed Current in Remanufacturing / J. Yu, H. Zhang, D. Deng, S. Hao, A. Iqbal // Chinese journal of mechanical engineering. – 2014. – Vol. 27. – No. 4. – P. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075
25. 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. 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. – P. 1207–1213. DOI: 10.1007/s12541-014-0458-y
26. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы деформирования упругопластического материала с дефектами при электродинамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 1. – С. 106–120. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.07
27. Кукуджанов К.В. Левитин А.Л. О воздействии высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в упругопластическом проводящем материале // Проблемы прочности и пластичности. – 2015. – № 77. – С. 217–226.
28. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (6ed.). – Elsevier, 2005.

## References

1. Kukudzhанov K.V. Modeling the treatment of high-energy pulsed electromagnetic field of the micro-cracks in a polycrystalline metal. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 138-158. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09
2. Beklemishev N.N., Kukudzhанov 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 problem mekhaniki Akademii nauk SSSR, Moscow, 1989, 56 p.
3. Beklemishev N.N. Plastichnost i prochnost metallicheskih materialov s uchetom impul'snogo vysokoenergeticheskogo elektromagnitnogo polya [Plasticity and Strength of Metals materials under action high-energy pulsed electromagnetic field]. Ph.D. thesis, Moscow, 1986. 305 p.

4. 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.
5. Ovchinnikov I.V. Vliianie vozdeistviia elektrotoka na plastichnost' metallov [Influence of Electric Current Action on Plasticity of Metals]. Ph.D. thesis, Moscow, 1989. 123 p.
6. Finkel' V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Possibility of Braking Rapid Cracks by Pulses of Current. *Sov. Phys. Dokl.*, 1976, vol. 227, no. 4, pp. 848-851.
7. Finkel' V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Fracture of crack tip by high-energy electromagnetic field. *Doklady akademii nauk SSSR*, 1977, vol. 237, no. 2, pp. 325-327.
8. Finkel' V.M., Ivanov V.M., and Golovin Yu.I. Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields. *Strength of Materials*, 1983, vol. 15. no. 4, pp. 501-506. DOI: 10.1007/BF01522429
9. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E., Murav'ev V.V. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts. *Tech. Phys.*, 1997, vol. 49, no. 2, pp. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774
10. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Murav'ev V.V. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, vol. 39, no. 4, pp. 639-641.
11. Troitskii O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Y.S., Shlyapin A.D. Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennikh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva Vol. 1 [Physical fundamentals and technologies of processing advanced materials (theory, technology, structure, and properties)]. Vol. 1., Moscow-Izhevsk, 2004. – 590 p.
12. Song Hui, Wang Zhong-jin, Gao Tie-jun. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet. *Trans. Nonferrous Soc. China*, 2007, vol. 17, pp. 87-92.
13. Atsushi Hosoi, Tomoya Kishi, Yang Ju. Healing of Fatigue Crack Treated with Surface-Activated Pre-Coating Method by Controlling High-Density Electric Current. *13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China*, pp.233-245.
14. 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.
15. 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.
16. Kudrjatzhev B.A., Parton V.Z. Rubinskiy B.D. Electromagnetic and temperature field in the plate with a cut of finite length, *Mech. Solids*, 1982, vol. 1, no. 1, pp. 110-118.
17. Parton V.Z., Kudrjatzhev B.A., Rubinskiy B.D., Crack propagation under the influence of a strong electric field, *Sov. Phys. Dokl.*, 1981, vol. 250, no. 5, pp. 1096-1100.
18. Ovchinnikov I.V. Determination of plasticity resource under the action of current. *J. Problems of Strength*, 1993, vol. 6, pp 54–59.
19. 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
20. Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. A Model of Thermoelectroplasticity 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
21. 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 Akademii nauk SSSR, Moscow, 2013. 42 p.
22. Kolomiets A.V., Kukudzhанov V.N., Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Modelirovanie neuprugogo razrusheniia neodnorodnykh materialov pri elektrodinamicheskom i termomekhanicheskom vozdeistviikh [Modeling of the inelastic fracture of heterogeneous materials under electrodynamic and thermomechanical loading]. Preprint No. 1054, Institut problem mekhaniki Akademii nauk SSSR, Moscow, 2013, 35 p.

23. Liu T.J.C. Effects of temperature-dependent material properties on stress and temperature in cracked metal plate under electric current load. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2010, vol. 4, no. 5, pp. 387–392.
24. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S., and Iqbal A. Numerical Calculation and Experimental Research on Crack Arrest by Detour Effect and Joule Heating of High Pulsed Current in Remanufacturing. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2014, vol. 27, no. 4, pp. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075
25. 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. 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
26. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Deformation processes of elastoplastic material with defects under electrodynamic loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 106–120. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.07
27. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. About the treatment of high energy pulsed electromagnetic field on the micro-cracks in elastoplastic conductive material. *Problems Of Strength And Plasticity*, 2015, no. 77, pp. 217-226
28. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 6ed. Elsevier, 2005.