

УДК 539.3

**О ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА МИКРОТРЕЩИНУ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ
ПРОВОДЯЩЕМ МАТЕРИАЛЕ***

© 2015 г.

Кукуджанов К.В., Левитин А.Л.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация*

kconstantin@mail.ru, alex_lev@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 01.07.2015

Рассматриваются процессы, протекающие в материале при обработке металлических образцов кратковременными импульсами электрического тока большой плотности. Изучаются изменения электрического и температурного полей в материале и их влияние на фазовые трансформации и напряженно-деформированное состояние в окрестности микродефектов в форме плоских трещин. Предлагается квазистационарная модель воздействия электромагнитного поля на предварительно поврежденный упругопластический материал с упорядоченной системой дефектов. Модель учитывает плавление материала и 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.

Моделирование показало, что в окрестности микродефектов возникают высокие значения плотности тока с большими градиентами поля, вызывающие быстрый локальный нагрев в окрестности кончика микротрещины, сопровождаемый тепловым расширением и плавлением материала. Это приводит к большим сжимающим напряжениям в окрестности микротрещины, интенсивному пластическому течению материала и, как следствие, смыканию берегов, уменьшению длины трещины и выбросу расплавленного материала в трещину. В результате микротрещина оказывалась полностью залеченной.

Ключевые слова: электропластичность, прямое численное моделирование, материал с дефектами, локализация электромагнитного поля и температуры, фазовые переходы, плавление.

Введение

Воздействие интенсивным и кратковременным электромагнитным полем с плотностью тока 10^9 А/м² и временем действия 10^{-4} с на проводящий материал приводит к тому, что упругие свойства материала практически не изменяются, в то время как пластические свойства материала существенно улучшаются, а именно предел текучести уменьшается, а пластические деформации при разрушении существенно

* Выполнено при поддержке РФФИ (грант № 15-08-08693).

увеличиваются (от нескольких десятков до сотни процентов для разных материалов и сплавов [1–5]). Это явление названо *электропластическим эффектом*. Данный эффект широко используется в промышленности, в особенности при технологической обработке труднодеформируемых материалов. Однако до сих пор отсутствует единое мнение о природе этого явления, а дискуссия о его фундаментальных основах и физическом механизме еще продолжается [1–8].

Одним из объяснений электропластического эффекта является гипотеза о залечивании (трансформации) дефектов, возникающих в материале в процессе пластического деформирования. Деформирование осуществляется до или одновременно с воздействием электромагнитного поля [3–8]. В этих работах под залечиванием понималось как выплавление кратеров (пор) в кончиках трещин, так и возникновение сжимающих напряжений в них, препятствующих дальнейшему развитию трещин, а также сближение берегов трещин. Для подтверждения этой гипотезы авторами был предложен ряд моделей. В работах [6, 7, 9, 10] предложены квазистационарные модели электротермоупругого деформирования материала с трещинами при воздействии на него коротким интенсивным импульсом тока, перпендикулярным плоскости трещины. Аналитические решения ряда плоских задач о воздействии на полубесконечную и конечную трещины (в виде математических разрезов), находящиеся в неограниченной среде, показали, что в кончиках трещин плотность тока неограниченно возрастала, а нормальные температурные напряжения оказывались сжимающими, препятствующими развитию трещин. Плавление в кончике трещины возникало только для приложенных токов, превышающих 10^{10} А/м². В работах [4, 8] предложены квазистационарная и динамическая модели электротермопластического деформирования материала и поэтапный численный метод решения получающихся уравнений (решение термомеханической задачи строилось на основе решения электротермической задачи). Решения ряда плоских задач для трещин и пор различных размеров показали, что в материале под действием тока вблизи трещин и пор наблюдается локализация температуры, приводящая к плавлению в окрестности кончиков трещин. Возникающие в окрестности трещин сжимающие напряжения приводят не просто к замедлению роста трещины, но и к ее частичному закрытию.

Между тем ни одна из моделей [4, 6–10] не позволяет последовательно проследить, во-первых, весь процесс эволюции дефектов под воздействием импульса тока и, во-вторых, обратного влияния напряженно-деформированного состояния в окрестности дефекта на электрическое и температурное поля. Кроме того, эти модели, за исключением [8], основываются на применимости закона теплопроводности Фурье к рассматриваемым процессам, а также не учитывают изменений агрегатного состояния и физико-механических свойств металла от температуры, в то время как наблюдаемые в экспериментах значения температурного поля достигают температуры испарения металла и его градиенты в окрестности трещин очень велики [11, 12]. Для устранения указанных недостатков в настоящей работе предлагаются квазистационарная модель воздействия высокоэнергетического короткоимпульсного электромагнитного поля на микротрещины в металле и численный метод решения получающейся системы уравнений. Изучаются изменения электромагнитного и температурного полей, агрегатного и напряженно-деформированного состояний в окрестности микротрещин. Исследование этих процессов позволит глубже понять механизм электропластического эффекта с точки зрения гипотезы о залечивании

дефектов и приблизиться к объяснению экспериментально наблюдаемых изменений пластических свойств металлов.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассматривается токопроводящий материал с упорядоченной структурой дефектов, который состоит из периодически распределенных представительных элементов, как показано на рис. 1 (справа), содержащих дефекты типа плоских микротрещин с закругленными кончиками. Материал подвергается воздействию короткоимпульсного высокоэнергетического электромагнитного поля определенной интенсивности (плотность тока от 10^8 до 10^{10} А/м² и продолжительность импульса 10^{-5} – 10^{-4} с). Решение ищется для представительного элемента материала, показанного на рис. 1 (слева).

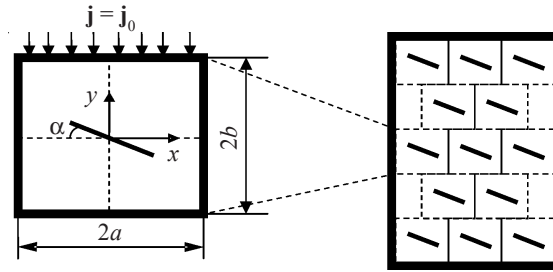


Рис. 1. Представительный элемент и упорядоченная структура дефектов

Электрический потенциал φ и плотность тока \mathbf{j} в проводящем материале определяются законом сохранения заряда (в предположении, что ток в образце является установившимся, а внутренние источники заряда отсутствуют), записанным в вариационной постановке [13], и законом Ома:

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

где V – произвольный объем, ограниченный кусочно-гладкой поверхностью S ; \mathbf{n} – внешняя нормаль к S ; T – температура, \mathbf{E} – вектор интенсивности электрического поля, определенный 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 ; $\delta \varphi$ – вариация электрического потенциала, удовлетворяющая граничным условиям задачи.

Поле перемещений \mathbf{u} определяется из принципа виртуальной работы [13]:

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

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор полных деформаций, \mathbf{f} – вектор объемных сил, \mathbf{t} – вектор поверхностных сил, $\delta \mathbf{u}$ и $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ – вариации перемещений и соответствующих им полных деформаций. Принимается аддитивность скоростей упругих $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el}$, пластических $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ и температурных $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th}$ деформаций:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th}. \quad (3)$$

Определяющие соотношения изотропного упругопластического тела с условием пластического течения Мизеса имеют вид:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\sigma} &= \lambda(T) \boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{I} + 2\mu(T) \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{el}}, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}} = \dot{\Lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\Lambda} \mathbf{s}, \quad \bar{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}_Y(T), \\ \bar{\boldsymbol{\sigma}} &= \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad d\varepsilon^{\text{th}} = \alpha(T) \mathbf{I} dT,\end{aligned}\quad (4)$$

где $\lambda(T)$, $\mu(T)$ – упругие модули Ламе, $\alpha(T)$ – коэффициент термического расширения, $\boldsymbol{\sigma}_Y(T)$ – предел текучести, \mathbf{s} – девиатор тензора напряжений, \mathbf{I} – единичный тензор.

Поле температур T определяется из закона сохранения энергии. Время электромагнитного воздействия на материал составляет 10^{-5} – 10^{-4} с, поэтому теплопроводностью следует пренебречь и считать процесс адиабатическим. Кроме того, согласно экспериментам [11, 12], градиенты температуры, измеряемые в окрестности трещины при воздействии на нее короткими импульсами тока, оказываются очень большими, превышающими 10^7 °С/м. При таких значениях $\text{grad } T$ закон теплопроводности Фурье не выполняется [14, 15]. В связи с этим эволюционное уравнение для температуры имеет вид:

$$\rho(T) c(T) \dot{T} = r^{\text{E}} + r^{\text{pl}} + r^{\text{melt}}, \quad (5)$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, \dot{T} – материальная производная температуры по времени, r – тепло, выделяемое в единице объема в текущей конфигурации тела за единицу времени (в том числе: r^{E} – выделяемое за счет протекания электрического тока, r^{pl} – выделяемое при неупругом деформировании, r^{melt} – поглощаемое в процессе плавления). С учетом законов Джоуля – Ленца и Ома имеем:

$$r^{\text{E}} = \eta^{\text{E}} \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = \eta^{\text{E}} \nabla \varphi \cdot \boldsymbol{\sigma}^{\text{E}} \cdot \nabla \varphi, \quad r^{\text{pl}} = \eta^{\text{pl}} \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}}, \quad (6)$$

где η^{E} , η^{pl} – соответственно коэффициенты преобразования электрической и неупругой энергий в тепловую.

Температура в рассматриваемых процессах изменяется в диапазоне от комнатной до температуры испарения материала. Поэтому в предлагаемой модели все физико-механические характеристики материала (плотность, удельная теплоемкость, электропроводность, коэффициент температурного расширения, упругие модули, предел текучести и т.д.) зависят от температуры.

Фазовый переход сопровождается поглощением тепловой энергии, во время которого температура остается постоянной:

$$T = T_{\text{melt}}, \quad t_{\text{sol}} \leq t \leq t_{\text{liq}}, \quad \int_{t_{\text{sol}}}^{t_{\text{liq}}} (r^{\text{E}} + r^{\text{pl}}) dt = \rho \Lambda_{\text{melt}}, \quad (7)$$

где T_{melt} – температура плавления материала, t_{sol} – время начала плавления твердой фазы, определяемое как момент времени достижения в точке температуры $T \geq T_{\text{melt}}$, t_{liq} – время полного перехода объема среды в расплавленное состояние, определяемое из последнего соотношения в (7), Λ_{melt} – скрытая теплота плавления.

В точках, где материал расплавился, происходит резкое изменение всех физических свойств материала: электропроводности, теплоемкости, плотности, коэффициента линейного расширения и прочих механических характеристик материала. Такое изменение свойств материала соответствует имеющимся экспериментальным данным [16, 17]. На рис. 2 представлены данные для цинка о зависимостях некоторых из этих характеристик от температуры (вертикальными штриховыми ли-

ниями отмечены температура плавления 419 °С и испарения 906 °С). Таким образом, при достижении температуры плавления материал не теряет способности проводить электрический ток (рис. 2а) и происходит дальнейшее нагревание расплава. Падение упругих модулей и предела текучести (рис. 2б, в) позволяет описывать дальнейшее поведение материала определяющими уравнениями (3)–(5).

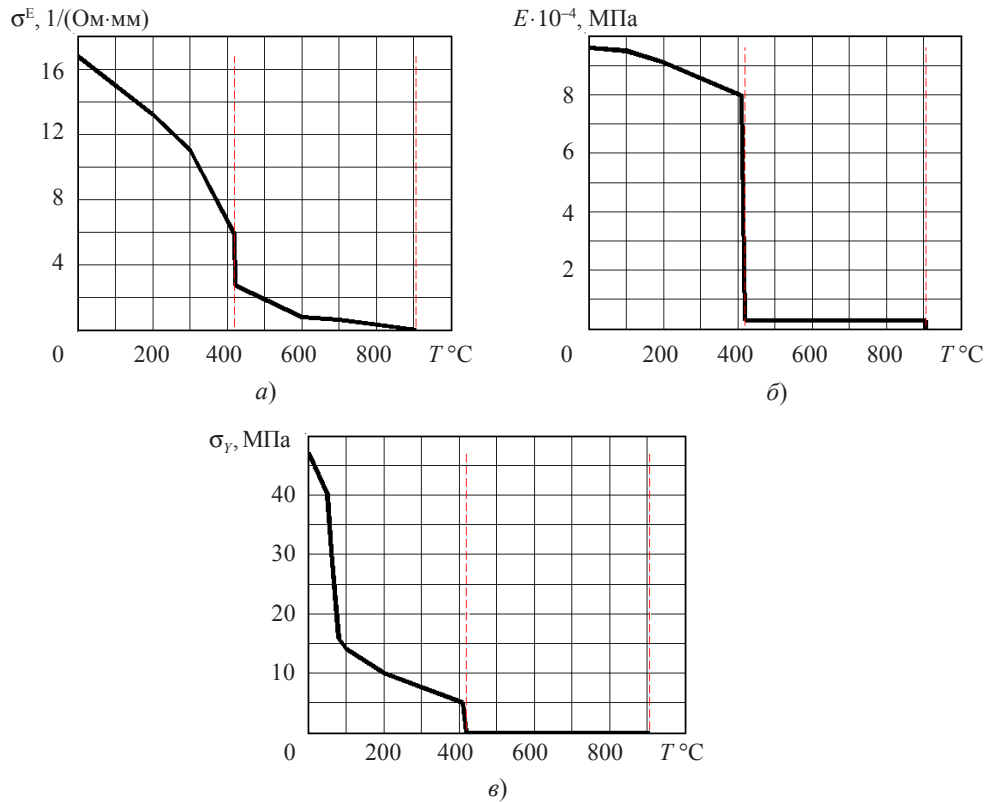


Рис. 2. Зависимости электропроводности σ^E (а), модуля Юнга E (б), предела текучести σ_y (в) от температуры T

В силу симметрии область интегрирования полагалась равной половине представительного объема (для горизонтальных микротрещин) с граничными условиями (см. рис. 1):

$$j(x, b) = j_0, \quad j(x, -b) = 0, \quad \partial\varphi/\partial x|_{x=0} = \partial\varphi/\partial x|_{x=a} = 0, \quad (8)$$

$$x = 0, a: \quad u_x = 0, \quad \sigma_{xy} = 0; \quad y = \pm b: \quad u_y = 0, \quad \sigma_{xy} = 0. \quad (9)$$

Трещина не проводила ток, поэтому нормальная производная потенциала на ее границе полагалась равной нулю. Поверхность трещины свободна от напряжений. Начальное поле температуры полагалось однородным с $T_0 = 20$ °С.

Температура T не является степенью свободы задачи, она вычисляется из уравнений (5)–(7), которые решаются непосредственно в каждой точке интегрирования с использованием аппроксимации обратной разностью по времени. Связанная нелинейная система уравнений (1)–(6) вместе с граничными условиями образует краевую задачу, которая решается методом конечных элементов относительно вектора перемещений \mathbf{u} и электрического потенциала φ на каждом временном шаге. Расче-

ты проводились для плоской деформации с использованием линейных четырехузловых изопараметрических конечных элементов. Перестройка сетки осуществлялась на основе смешанного эйлера-лагранжева метода.

2. Результаты численного моделирования

Рассматривалось плоское деформированное состояние. Плотности тока на границе представительного элемента были постоянными в течение всего времени действия электромагнитного импульса τ . Начальное расстояние между берегами и диаметр в кончике микротрещин принимались равными 1 мкм. Размеры представительного элемента: $a = 120$ мкм, $b = 80$ мкм. Расчеты проводились для образцов из цинка.

При пропускании электрического тока через образец с дефектами (см. рис. 1) в окрестности дефектов в виде плоских трещин возникают большие градиенты электрического потенциала, приводящие к резким изменениям поля плотности тока, в том числе к существенному увеличению плотности тока в окрестности кончиков трещин по сравнению с плотностью тока, приложенного к образцу. 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. 3а показана зависимость максимальной плотности тока j в кончике плоской микротрещины от ее длины l_0 (количество дефектов в образце предполагалось постоянным). На рис. 3б показана зависимость максимальной плотности тока j в верхнем кончике плоской микротрещины длиной 50 мкм от угла наклона плоскости трещины к оси x . Расчеты выполнялись при воздействии импульсом тока величиной $1,5 \cdot 10^2$ А/мм².

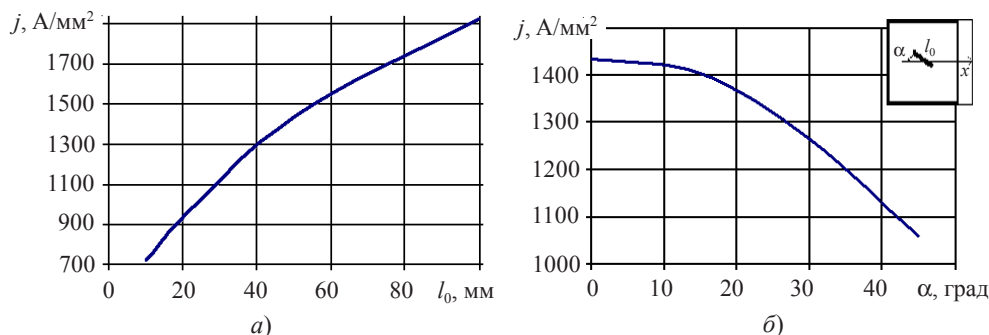


Рис. 3. Зависимость плотности тока от размера микротрещины (а) и наклона микротрещины (б)

Максимальная плотность тока является интегральным показателем локализации поля. Расчеты показывают, что от ее величины в том числе зависят размеры зон нагрева, плавления, фазовых переходов в кончиках микротрещин, а также скорость протекания процессов деформирования и залечивания трещин. Из приведенных графиков видно, что увеличение размера микротрещины на порядок приводит к уменьшению максимальной плотности тока в ее вершине лишь в 2,8 раза, а максимальная плотность тока в кончике трещины остается практически постоянной в диапазоне углов 0–15°. Ее дальнейшее падение не превышает 25% при изменении угла в достаточно большом диапазоне, охватывающем наиболее вероятные углы образования дефектов при предварительном пластическом деформировании металла

перед обработкой материала током (полагаем, что это деформирование осуществляется в направлении тока вдоль оси y). Заметим, что на берегах микротрещин в их центральной части (на расстоянии половины длины трещины от ее кончика) имеются области, в которых плотность тока составляет всего несколько A/mm^2 , то есть в 100 раз меньше плотности приложенного тока.

В результате воздействия короткого и интенсивного тока в окрестности микродефектов возникают высокие значения плотности тока с большими градиентами поля ($10^8-10^{10} A/(mm^2 \cdot m)$). Это вызывает быстрый локальный нагрев в окрестности кончика микротрещины (скорость нагрева $0,8-2,0 \cdot 10^7 \text{ } ^\circ C/c$), сопровождаемый тепловым расширением и плавлением материала. Получаемые в расчетах градиенты температуры в окрестности микротрещины достигали $10^7-10^8 \text{ } ^\circ C/m$. Вдали от трещины температура поднималась не более, чем на $10 \text{ } ^\circ C$ (в то же время нагрев не происходил и в области центра трещины на ее берегах). Это приводило к большим сжимающим напряжениям в окрестности микротрещины (давление достигало 100 МПа) и, как следствие, к смыканию берегов, уменьшению длины трещины и выбросу расплавленного материала в трещину (рис. 4).

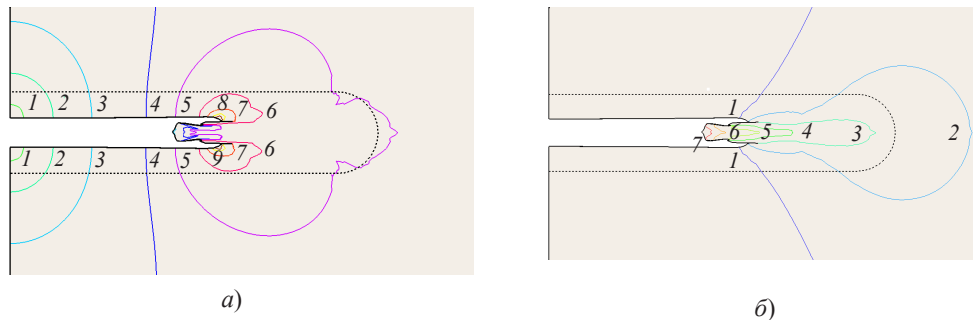


Рис. 4. Изолинии распределения электрического тока (а) и распределения температуры (б) в окрестности микротрещины в момент времени 24,5 мкс

На рис. 4 показаны соответственно поля плотности тока (а) и температуры (б) в момент времени $t = 24,5$ мкс в окрестности вершины микротрещины длиной 10 мкм при воздействии импульсом тока величиной $7,3 \cdot 10^3 A/mm^2$ и длительностью 50 мкс. На рис. 4а цифрам соответствуют изолинии: 1 – 0,5; 2 – 1,5; 3 – 3,0; 4 – 6,0; 5 – 9,0; 6 – 15; 7 – 21; 8 – 27; 9 – 30 kA/mm^2 , а на рис. 4б: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 300, 5 – 350, 6 – 400, 7 – 419 $^\circ C$. Пунктирной линией на рисунках показана первоначальная граница трещины ($t = 0$). Смыкание берегов, уменьшение длины трещины и выброс металла внутрь трещины начинаются практически одновременно, но не сразу после воздействия током: требуется некоторое время (примерно 19 мкс), чтобы область кончиков трещины достаточно прогрелась и в ней началось плавление. На рис. 4 хорошо видна расширяющаяся струя металла, только часть которого расплавлена. Это обусловлено тем, что сжимающие напряжения так велики, что материал не успевает нагреться до температуры плавления и пластически вытекает из зоны максимальной концентрации плотности тока. При этом максимальная плотность тока наблюдается уже не в точке начальной вершины трещины, а вокруг новых концентраторов (см. рис. 4а).

Процесс одновременного уменьшения трещины и выброса металла приводит к тому, что берега трещины начинают контактировать со струей материала. В этих местах начинает течь ток, а температура повышается (сплошные горизонтальные

черные линии в области кончика трещины на рис. 4). Этот процесс происходит до тех пор, пока струя не оказывается полностью зажатай берегами трещины к моменту времени $t = 26,4$ мкс. Длина трещины примерно за 8 мкс уменьшается с 10 мкм до 2,68 мкм, а толщина – с 1 мкм до 0,11 мкм (рис. 5). Таким образом, берега трещины оказываются «сваренными» расплавленным металлом в ее центральной части. Далее весь описанный процесс повторяется снова уже для микротрещины новых меньших размеров, что приводит к полному залечиванию микротрещины.

Описанный процесс деформирования сопровождается очень интенсивным пластическим течением в окрестности микротрещины. На рис. 5 показана интенсивность пластической деформации при $t = 26,4$ мкс. Вязкого разрушения материала и образования новой несплошности (дефекта) на месте залеченной микротрещины происходить не должно, поскольку пластическая деформация происходит в условиях сильного всестороннего сжатия.

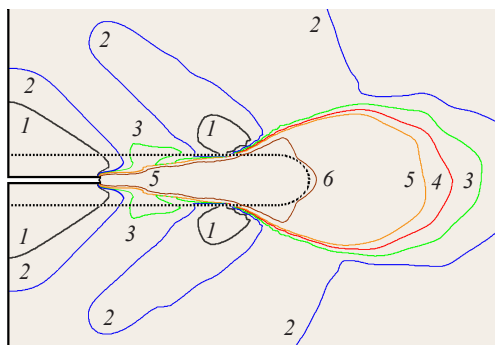


Рис. 5. Границы трещины и изолинии интенсивности пластических деформаций в момент времени $t = 26,4$ мкс (1 – 0,01; 2 – 0,0375; 3 – 0,065; 4 – 0,0925; 5 – 0,12; 6 – 1,00)

Полученные численные результаты согласуются с имеющимися экспериментами [11, 12], в которых при воздействиях короткими импульсами тока большой плотности на трещину в окрестности ее кончика наблюдалось резкое повышение температуры: измеренная скорость нагрева составляла 10^7 °C/с, градиенты температуры – $1,7 \cdot 10^7$ °C/м, причем вдали от трещины температура не превышала 10 °C. В кончике трещины наблюдалось плавление и испарение материала, сопровождаемое микровзрывом с образованием кратера.

Заключение

При рассматриваемых в работе условиях в металле может происходить полное залечивание дефектов типа плоских микротрещин. Залечивание происходит не только и не столько по механизмам выплавления кратеров (пор) в кончиках трещин или возникновения сжимающих напряжений в них, препятствующих дальнейшему развитию и способствующих сближению берегов трещин [3–8, 11, 12], а как одновременный процесс смыкания берегов, уменьшения длины трещины и выброса расплавленного материала внутрь трещины. В результате такого залечивания берега микротрещины оказываются «сваренными» расплавленным металлом.

Список литературы

1. Троицкий О.А. Электропластический эффект в процессах обработки металлов давлением. *Металлургия машиностроения*. 2010. №4. С. 45–48.
2. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 287, No 2. P. 276–287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3.
3. Беклемишев Н.Н. *Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля*: Дис. ... доктора физ.-мат. наук. М., 1986. 305 с.
4. 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.
5. Xiaoxin Ye, Yanyang Yang, Guolin Song, Guoyi Tang. Enhancement of ductility, weakening of anisotropy behavior and local recrystallization in cold-rolled Ti-6Al-4V alloy strips by high-density electropulsing treatment. *Appl. Phys. A*. 2014. Vol. 117, No 4. P. 2251–2264. DOI: 10.1007/s00339-014-8655-1.
6. Клоушников В.Д., Овчинников И.В. Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла. *Изв. АН СССР. МТТ*. 1988. №4. С. 118–122.
7. Овчинников И.В. *Влияние воздействия электрического тока на пластичность металлов*: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1989. 123 с.
8. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы деформирования упругопластического материала с дефектами при электродинамическом нагружении. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. №1. С. 106–120. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.07.
9. Кудрявцев Б.А., Партон В.З., Рубинский Б.Д. Электромагнитное и температурное поле в проводящей пластинке с разрезом конечной длины. *Изв. АН СССР. МТТ*. 1982. №1. С. 110–118.
10. Партон В.З., Кудрявцев Б.А., Рубинский Б.Д. Распространение трещины под действием электромагнитного поля. *Докл. АН СССР*. 1980. Т. 250, №5. С. 1096–1100.
11. 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.
12. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. Разрушение вершины трещины сильным электромагнитным полем. *Докл. АН СССР*. 1977. Т. 237, №2. С. 325–327.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (6 ed.). Elsevier, 2005.
14. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Физматлит, 2008. 656 с. ISBN: 978-5-9221-0938-3.
15. Лычев С.А., Манжиров А.В., Юбер С.В. Замкнутые решения краевых задач связанной термоупругости. *Изв. РАН. МТТ*. 2010. №4. С. 138–154.
16. Пикунов М.В. *Металлургия расплавов. Курс лекций*. М.: МИСиС, 2005. 286 с.
17. Пикунов М.В. *Плавка металлов. Кристаллизация сплавов. Затвердевание отливок*. М.: МИСиС, 1997. 374 с.

References

1. Troitskiy O.A. Elektroplasticheskiy effekt v protsessakh obrabotki metallov davleniem. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2010. №4. S. 45–48.
2. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 287, No 2. P. 276–287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3.
3. Beklemishev N.N. *Plastichnost' i prochnost' metallicheskih materialov s uchetom impul'snogo vozdeystviya vysokoenergeticheskogo elektromagnitnogo polya*: Dis. ... doktora fiz.-mat. nauk. M., 1986. 305 s.
4. Kukudzhanov 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. P. 814–827. DOI: 10.3103/S0025654411060021.
5. Xiaoxin Ye, Yanyang Yang, Guolin Song, Guoyi Tang. Enhancement of ductility, weakening

of anisotropy behavior and local recrystallization in cold-rolled Ti-6Al-4V alloy strips by high-density electropulsing treatment. *Appl. Phys. A*. 2014. Vol. 117, No 4. P. 2251–2264. DOI: 10.1007/s00339-014-8655-1.

6. Klyushnikov V.D., Ovchinnikov I.V. Plane problem of effect of an instantaneous point heat source. *Mech. Solids*. 1988. Vol. 23, No 4. P. 113–117.

7. Ovchinnikov I.V. *Vliyanie vozdeystviya elektrotoka na plastichnost' metallov*: Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. M., 1989. 123 s.

8. Kukudzhanov K.V., Levitin A.L. Deformation processes of elastoplastic material with defects under electrodynamic loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2015. No 1. P. 106–120. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.07.

9. Kudryavtsev B.A., Parton V.Z., Rubinskii B.D. Electromagnetic and thermoelastic fields in a conducting plate with a cut of finite length. *Mech. Solids*. 1982. Vol. 17, No 1. P. 102–109.

10. Parton V.Z., Kudryavtsev B.A., Rubinskii B.D. Propagation of a crack under the action of an electromagnetic fields. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*. 1980. Vol. 250, No 5. P. 1096–1100.

11. Finkel' V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Possibility of braking rapid cracks by pulses of current. *Sov. Phys. Dokl.* 1976. Vol. 21, No 4. P. 216.

12. Finkel' V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Disintegration of a crack tip with a strong electromagnetic field. *Sov. Phys. Dokl.* 1977. Vol. 22. P. 683–685.

13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (6 ed.). Elsevier, 2005.

14. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. *Courier Corporation*. 2012. 944 p. ISBN: 9780486135083.

15. Lychev S.A., Manzhairov A.V., Joubert S.V., Closed solutions of boundary-value problems of coupled thermoelasticity. *Mech. Solids*. 2010. Vol. 45, No 4. P. 610-623. DOI: 10.3103/S0025654410040102/

16. Pikunov M.V. *Metallurgiya rasplavov. Kurs lektsiy*. M.: MISiS, 2005. 286 s.

17. Pikunov M.V. *Plavka metallov. Kristallizatsiya splavov. Zatverdevanie otlivok*. M.: MISiS, 1997. 374 s.

ABOUT THE TREATMENT OF HIGH ENERGY PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE MICRO-CRACKS IN ELASTOPLASTIC CONDUCTIVE MATERIAL

Kukudzhanov K.V., Levitin A.L.

*Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

The processes occurring in the metallic samples under the impact of electrical current of high density are considered. The electric and temperature fields and their influence on the phase transformation and stress-strain state in the vicinity of micro-defects in the form of plane cracks are studied. The quasi-stationary model of the impact of electromagnetic field on the pre-damaged elastic-plastic material with an ordered system defects are proposed. The model accounts for melting of the material and the dependence of its physical and mechanical properties on the temperature. The problem is solved by finite elements method with adaptive mesh using on the base of alternative Euler-Lagrange's method.

Numerical modeling has shown, that in the vicinity of the micro-defects intensive electromagnetic field and current with large fields gradients are arise, which leads to intensive local heating and melting of the metal in the tips of the micro-cracks. This results in high compressive stresses in the vicinity of micro-cracks, intensive plastic flow of the material and, as a consequence, the clamping of micro-crack shores, decrease it length and the ejection of the molten material into the crack. As a result, micro-crack is completely healed.

Keywords: electroplasticity, direct numerical modeling, defective material, electromagnetic field and temperature localization, phase transitions, melting.