

УДК 539.3

ПРОЦЕССЫ ЗАЛЕЧИВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН В МЕТАЛЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ*

© 2016 г.

Кукуджанов К.В.^{1,2}

¹*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Москва, Российская Федерация*

²*Московский физико-технический институт, Москва, Российская Федерация*

kconstantin@mail.ru

Поступила в редакцию 25.04.2016

Рассматриваются процессы трансформации дефектов типа плоских микротрещин с линейными размерами порядка 10 мкм, протекающие в материале при обработке металлических образцов кратковременными импульсами электрического тока высокой плотности. Исследование осуществляется численно на основе связанной модели воздействия интенсивным электромагнитным полем на предварительно поврежденный термоупругопластический материал с упорядоченной системой дефектов, 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 эйлеро-лагранжева метода. На основе предложенной модели показано, что при определенных условиях плоские микротрещины могут завариваться и, таким образом, полностью залечиваться. Этот процесс происходит путем одновременного уменьшения длины микротрещины, выброса струи расплавленного металла из вершины внутрь трещины и смыкания ее берегов (уменьшение поперечного размера плоской микротрещины). Исследуется влияние расстояния между трещинами на процессы деформирования и залечивания микродефектов. Численное моделирование показало, что при расстояниях между трещинами, равных 10 их длинам и более, время, требуемое для полного залечивания дефекта, слабо зависит от расстояния между дефектами, и взаимодействием микродефектов можно пренебречь. Взаимодействие между микротрещинами в металле начинает заметно сказываться на процессе их залечивания, когда расстояние между ними сокращается примерно до 5–6 длин микротрещин. При дальнейшем уменьшении расстояния между дефектами вплоть до того, когда оно становится равным одной длине микротрещины, описанный процесс залечивания качественно не меняется, однако существенно замедляется: выброс расплавленного материала в трещину сохраняется, но уменьшение размеров трещины, особенно в поперечном направлении, значительно сокращается.

Ключевые слова: залечивание микротрещин, торможение трещин, взаимодействие микродефектов, электропластичность, высокоэнергетическое электромагнитное поле, импульс тока, фазовые переходы, плавление, испарение.

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

Введение

Предположение о том, что при электропластическом деформировании в материале может происходить залечивание дефектов под действием кратковременных импульсов высокоэнергетического электромагнитного поля, высказывалось рядом авторов [1–3]. В настоящее время эту гипотезу стало возможно перенести в разряд экспериментально наблюдаемого явления [4–8]. При этом эксперименты свидетельствуют о том, что в материале не просто возникают сжимающие напряжения с выплавлением кратеров (пор) в кончиках микротрещин, а наблюдается изменение самой формы дефекта вплоть до его полного исчезновения. Однако предлагаемые до настоящего времени математические модели [3, 9–12] не позволяли объяснить этот экспериментальный факт. Для решения поставленной задачи была предложена модель воздействия электромагнитного поля на предварительно поврежденный материал с дефектами [13, 14], с помощью которой удалось математически описать экспериментально наблюдаемый процесс трансформации микродефектов в проводящем материале. В частности, в [13] было показано, что при определенных условиях микротрещины могут полностью залечиваться, так что берега трещины оказываются «сваренными» расплавленным металлом. В [14] было показано, что модель правильно воспроизводит основные экспериментально наблюдаемые особенности электротермомеханических процессов в окрестности дефектов.

В [13, 14] решение начально-краевой задачи проводилось для определенного представительного элемента (ячейки периодичности) материала при выбранных граничных условиях на его поверхности. В связи с этим представляется важным прояснить, как выявленный процесс залечивания микротрещины зависит от граничных условий, которые могут использоваться в модели, и оценить ошибку, которую мы допускаем, решая задачу для одного представительного элемента, вместо того, чтобы решать ее для образца с упорядоченной системой дефектов в целом. Также следует разобраться, в какой мере расстояние между микротрещинами (размер представительного элемента) влияет на процесс залечивания микротрещин и напряженно-деформированное состояние в их окрестности. Поиску ответов на эти вопросы посвящена настоящая статья.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассматривается токопроводящий материал с упорядоченной структурой дефектов, который состоит из периодически распределенных представительных элементов, содержащих дефекты типа плоских микротрещин с закругленными кончиками (рис. 1а). Материал подвергается воздействию короткоимпульсного высокоэнергетического электромагнитного поля определенной интенсивности посредством приложения к наружным границам образца разности потенциалов, вызывающей на этих границах импульс тока (плотностью от 10^8 до 10^{10} А/м² и продолжительностью 10^{-5} – 10^{-4} с) с вектором плотности, перпендикулярным плоскости микротрещин (рис. 1б). Решение ищется для областей интегрирования, представленных на рис. 1в–1е, содержащих одну, четыре и шесть микротрещин (1, 4 и 6 частей представительных элементов).

Ставится задача исследовать процессы изменения электрического и температурного полей, напряженно-деформированного состояния, происходящие фазовые трансформации в образце и влияние этих процессов на залечивание микротрещин.

Для решения поставленной задачи используется модель воздействия электромагнитного поля на предварительно поврежденный материал с дефектами, предложенная в [13, 14]. Решение получающейся системы уравнений ищется методом конечных элементов.

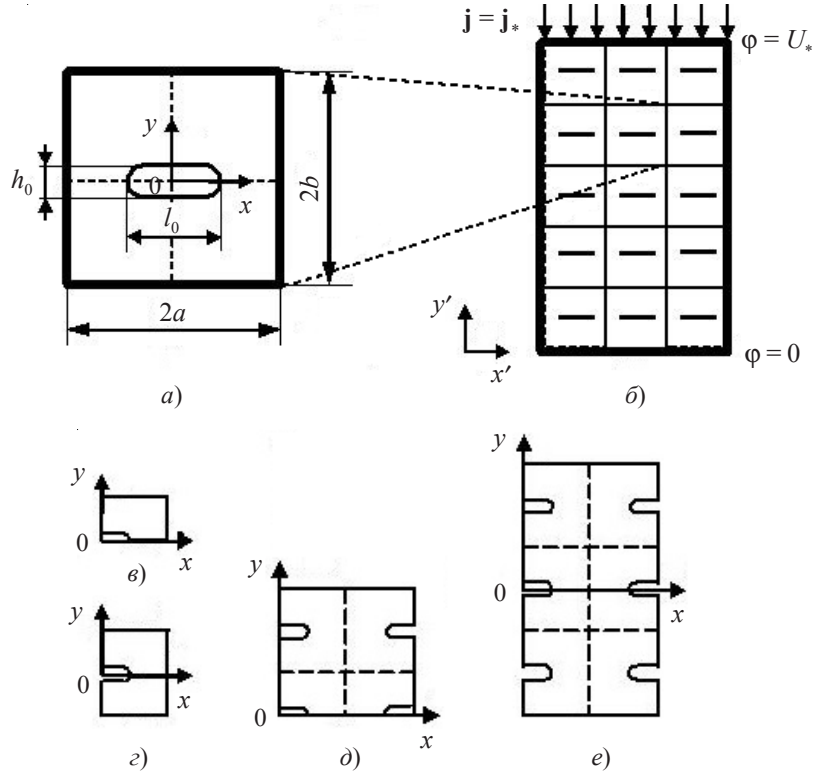


Рис. 1

Полная система уравнений для вектора перемещений \mathbf{u} , электрического потенциала φ и температуры T рассматриваемой модели имеет вид:

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

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

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \lambda(T) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} : \mathbf{I} + 2\mu(T) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el}, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \dot{\Lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\Lambda} \mathbf{s},$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y(T), \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad d\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \alpha(T) \mathbf{I} dT, \tag{1}$$

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

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

где V – произвольный объем, ограниченный кусочно-гладкой поверхностью S ; \mathbf{n} – внешняя нормаль к S ; T – температура; $\mathbf{E} = -\partial\varphi/\partial\mathbf{x}$ – вектор интенсивности электрического поля, определенный как отрицательный градиент электрического потенциала; $\sigma^E(T)$ – электропроводность; $j = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{n}$ – плотность тока по нормали к поверхности S ; $\delta\varphi$ – вариация электрического потенциала, удовлетворяющая граничным условиям задачи; \mathbf{u} – вектор перемещений; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений; $\boldsymbol{\epsilon}$ – тензор полных деформаций; \mathbf{f} – вектор объемных сил; \mathbf{t} – вектор поверхностных сил; $\delta\mathbf{u}$ и $\delta\boldsymbol{\epsilon}$ – вариации перемещений и соответствующих им полных деформаций; $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{el}}$, $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{pl}}$, $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{th}}$ – соответственно тензоры скоростей упругих, пластических и температурных деформаций; $\lambda(T)$, $\mu(T)$ – упругие модули Ламе; $\sigma_y(T)$ – предел текучести; \mathbf{s} – девиатор тензора напряжений; Λ – некоторый неотрицательный скалярный коэффициент; Φ – функция текучести; \mathbf{I} – единичный тензор; $\alpha(T)$ – коэффициент термического расширения; $\rho(T)$ – плотность; $c(T)$ – удельная теплоемкость; \dot{T} – материальная производная температуры; r – количество тепла, выделяемое (поглощаемое) в единицу времени в единице объема в текущей конфигурации тела за счет различных физических процессов, верхние индексы у величины r соответствуют протеканию электрического тока (E), пластическому деформированию (pl), плавлению (melt), испарению (evap); η^E и η^{pl} – эмпирические коэффициенты, определяющие доли соответственно энергии электрического тока и энергии пластического деформирования, которые превращаются в тепловую энергию; T_{melt} – температура плавления материала; t_s – момент времени, в который материал начинает плавиться; t_l – момент времени, в который материал полностью расплавится; Λ_{melt} – скрытая теплота плавления; T_{evap} – температура испарения материала; t_{el} – момент времени, в который материал начинает испаряться; t_{ev} – момент времени, в который материал полностью испарится; Λ_{evap} – скрытая теплота испарения.

В силу симметрии область интегрирования можно составить из половин или четвертей представительных элементов, как показано на рис. 1*в–1е*. Рассмотрим по отдельности электрические (на потенциал φ) и механические (на \mathbf{u} и $\boldsymbol{\sigma}$) граничные условия для случая плоской деформации. Для области интегрирования, равной половине представительного элемента (см. рис. 1*з*), электрические граничные условия имеют вид:

$$\varphi(x, b, t) = \varphi_*(b), \quad (2)$$

$$\varphi(x, -b, t) = -\varphi_*(b), \quad (3)$$

$$j_y(x, b, t) = j_*, \quad j_x(x, b, t) = 0, \quad (4)$$

$$j_y(x, -b, t) = j_*, \quad j_x(x, -b, t) = 0, \quad (5)$$

$$\partial\varphi/\partial x|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

$$\partial\varphi/\partial x|_{x=a} = 0. \quad (7)$$

Считается, что значения φ_* и j_* в (7), (8) связаны соотношением

$$j_* = \sigma^E(T_0)\varphi_*(b)/b. \quad (8)$$

Здесь φ_* – невозмущенный потенциал, который известен и является линейной функцией одной координаты y : $\varphi_* = \varphi_*(y') = U_*(y'/L)$, где U_* – значение разности потенциалов, приложенной к наружным границам образца, L – длина образца, y' – коор-

дината в системе координат, связанной с образцом (см. рис. 1б). Условия (2)–(7) означают, что электрическое поле на границе представительного элемента рассматривается как невозмущенное, то есть при отсутствии дефектов в образце. Естественно, в модельном материале с дефектами граничные условия предложенного вида могут выполняться лишь приближенно. Механические граничные условия имеют вид:

$$x = 0: \quad u_x = 0, \quad \sigma_{xy} = 0, \quad (9)$$

$$x = a: \quad u_x = 0, \quad \sigma_{xy} = 0, \quad (10)$$

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

$$y = -b: \quad u_y = 0, \quad \sigma_{xy} = 0. \quad (12)$$

Граничные условия для других областей интегрирования задаются аналогично. Например, для области интегрирования, равной четверти представительного элемента (см. рис. 1в), граничные условия принимаются в виде (2) или (4), (6), (7), (9)–(11). При этом вместо (3), (5), (12) используются соответственно условия:

$$\varphi(x, 0, t) = \varphi_*(0) = 0, \quad (13)$$

$$j_x(x, 0, t) = 0, \quad (14)$$

$$y = 0: \quad u_y = 0, \quad \sigma_{xy} = 0. \quad (15)$$

Разность потенциалов или плотность тока считаются постоянными в течение всего времени действия электромагнитного импульса τ_0 . Начальные поля температуры, перемещений и электрического потенциала полагаются однородными ($T_0 = 20^\circ\text{C}$, $u_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$).

2. Результаты численного моделирования

Расчеты проводились для плоской деформации с использованием линейных четырехузловых изопараметрических и трехузловых конечных элементов. Для вычислений применялся пакет программ АСТРА, разработанный в лаборатории моделирования Института проблем механики РАН.

Моделирование проводилось для образцов из цинка [13, 14]. Начальные длины всех микротрещин l_0 принимались равными 10 мкм, расстояние между берегами $h_0 = 1$ мкм, а радиус кривизны в кончике микротрещины – 0,5 мкм. Размеры представительного элемента изменялись в диапазоне 20–240 мкм (соответственно расстояния между кончиками трещин 10–230 мкм). Разность потенциалов (на единицу длины) составляла 534,3 В/мм, чему соответствовал ток в материале без дефектов плотностью 8,95 кА/мм². Применялось неравномерное разбиение области интегрирования со сгущением сетки в окрестности трещины. В окрестности трещины, ограниченной расстоянием $l_0/2$ до ее поверхности, использовались четырехузловые, в остальной области – трехузловые элементы. Шаг сетки в окрестности трещины составлял $h_0/40$, в то время как в остальной части области он изменялся (в зависимости от размера представительного элемента) в диапазоне от $h_0/40$ до $3h_0$.

Воздействие током приводит к одновременному смыканию берегов (уменьшению ширины) микротрещин, уменьшению их длины и выбросу расплавленного материала в трещину. На рис. 2 показаны границы залеченной микротрещины и

поле температуры в ее окрестности при воздействии импульсом тока величиной $8,95 \text{ кА/мм}^2$ для различных расстояний между дефектами (но при одинаковой длине залеченной трещины): *а*) в момент времени $t = 22,1 \text{ мкс}$ при расстоянии между микротрещинами 60 мкм ($a = b = 30 \text{ мкм}$); *б*) в момент времени $t = 76,6 \text{ мкс}$ при расстоянии между микротрещинами 20 мкм ($a = b = 10 \text{ мкм}$). Пунктирной линией показана первоначальная граница трещины при $t = 0$, цветными линиями – изолинии температуры в $^{\circ}\text{C}$ (1 – 25, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 200, 5 – 300, 6 – 400), темно-серым цветом показана область плавления ($T \geq 419 \text{ }^{\circ}\text{C}$), черным – область испарения ($T = 906 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Моделирование проводилось для области интегрирования, показанной на рис. 1*д*. Рассматриваемый процесс происходит до тех пор, пока струя расплавленного металла не оказывается полностью зажатай берегами трещины, а берега не оказываются «сваренными» расплавленным металлом.

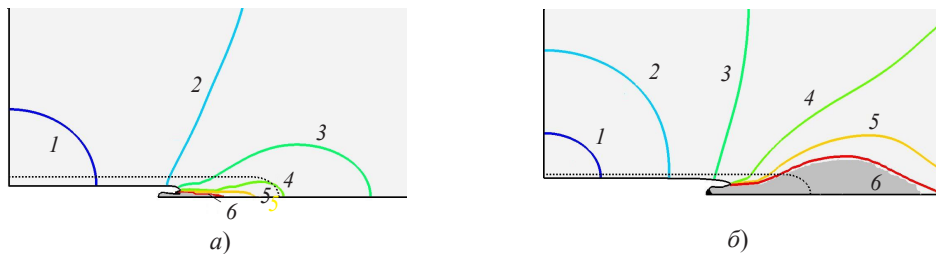


Рис. 2

На рис. 3*а* представлены зависимости длины трещины от времени для областей интегрирования различных размеров, содержащих 4 микротрещины, как показано на рис. 1*д*, при различающихся граничных условиях на их горизонтальных поверхностях: когда задана разность потенциалов $\varphi = \text{const}$ (условия (2), (13)) или соответствующая ей плотность тока $j = \text{const}$ (условия (4), (14)). На рис. 3*б* представлены аналогичные зависимости для ширины микротрещины (максимального расстояния h между берегами трещины, которое наблюдается в ее центре) от времени. Зависимости приведены для микротрещины с центром в точке $x = 0, y = 0$ (см. рис. 1*д*).

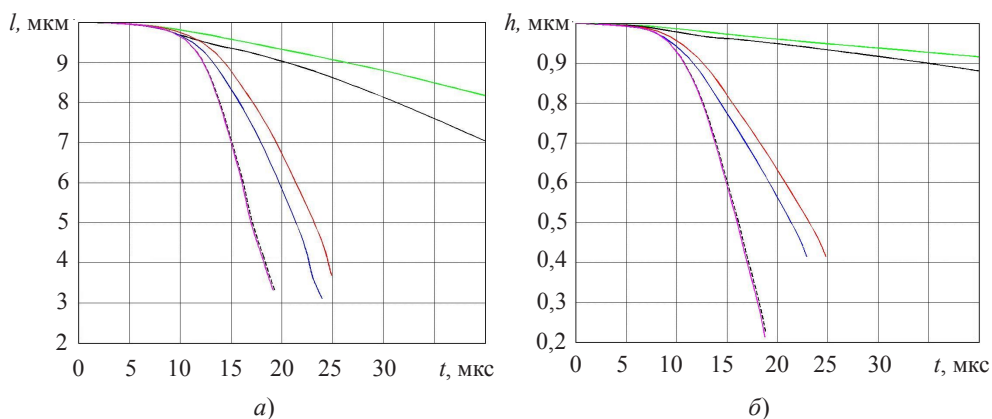


Рис. 3

Кривые на рис. 3 соответствуют: зеленая – $\varphi = \text{const}$, элемент $20 \times 20 \text{ мкм}$; черная – $j = \text{const}$, элемент $20 \times 20 \text{ мкм}$; красная – $\varphi = \text{const}$, элемент $60 \times 60 \text{ мкм}$; синяя –

$j = \text{const}$, элемент 60×60 мкм; черная штриховая – $\varphi = \text{const}$, элемент 180×180 мкм; розовая – $j = \text{const}$, элемент 180×180 мкм.

Моделирование показало, что при расстоянии между трещинами в исследуемом диапазоне для областей интегрирования, изображенных на рис. 1*д, е*, на прямых, образующих границы представительного элемента, центр которого находится в точке $x = 0, y = 0$ (далее – внутренний представительный элемент), с высокой точностью (менее 0,06% для расстояний между трещинами 20 мкм) соблюдаются условия (2), (3), (9)–(12), (13)–(15). Однако для расстояний между трещинами в диапазоне от 60 мкм до 20 мкм условия (4), (5) на горизонтальной границе данного представительного элемента соблюдались с недостаточной точностью (15,61%). При этом точность соблюдения конкретного условия определялась как максимум модуля отклонения значения, рассчитанного на границах внутреннего представительного элемента, от значения, определенного этим условием, отнесенного к максимальному значению измеряемой величины, в процентах. Из рис. 3 видно, что выбор граничных условий (2), (3), (13) или (4), (5), (14) начинает заметно влиять на процесс залечивания при расстояниях между кончиками микротрещин не менее 5–6 длин этих трещин.

Таким образом, в дальнейшем используются условия (2), (3), (13) как более точные и имеющие ясный физический смысл, при этом разность потенциалов на границе представительного элемента определяется исходя из условия «невозмущенности» электрического потенциала в материале. Следует иметь в виду, что оба решения стремятся друг к другу с увеличением расстояния между трещинами, а процесс залечивания проходит при условиях (4), (5), (14) несколько быстрее.

Расчеты для областей интегрирования различных размеров, содержащих 1, 4 и 6 микротрещин (в квадратных ($a = b$) представительных элементах), приведенных на рис. 1*в–е*, при задании на их горизонтальных поверхностях разности потенциалов $\varphi = \text{const}$ показали, что имеет место хорошее совпадение результатов, полученных при моделировании процесса залечивания микротрещины (центр которой находится в точке $x = 0, y = 0$): зависимости длины (рис. 4*а*) и ширины (рис. 4*б*) микротрещины от времени практически совпадали между собой в большей части исследуемого диапазона размеров представительных элементов.

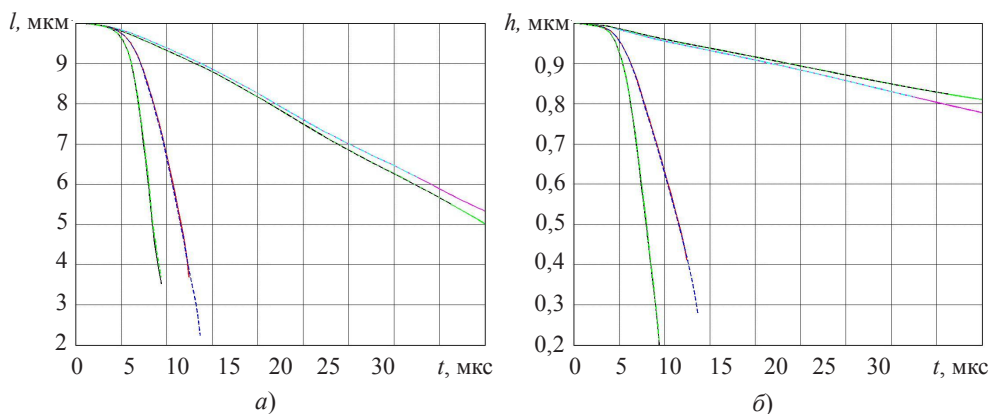


Рис. 4

Даже для элемента с размером 20 мкм, когда имеет место наиболее сильное взаимодействие между дефектами, наблюдается хорошее согласование этих кри-

вых (см. рис. 4). Это является следствием того, что предлагаемые в модели электрические граничные условия (2), (3), (13) и механические граничные условия (9)–(12), (15) соблюдаются с высокой точностью на границах внутреннего представительного элемента (в том числе для малых расстояний между трещинами).

Кривые на рис. 4 соответствуют: розовая – 1 микротрещина, элемент 20×20 мкм; голубая штриховая – 1 микротрещина, элемент $(1/2) 20 \times 20$ мкм; зеленая – 4 микротрещины, элемент 20×20 мкм; черная штриховая – 6 микротрещин, элемент 20×20 мкм; красная – 4 микротрещины, элемент 60×60 мкм; синяя штриховая – 1 микротрещина, элемент 60×60 мкм; черная – 1 микротрещина, элемент 240×240 мкм; зеленая штриховая – 4 микротрещины, элемент 240×240 мкм.

Из рис. 3 и 4 видно, что взаимодействие между микротрещинами начинает заметно сказываться на процессе их залечивания, когда расстояния между ними сокращаются примерно до 5–6 длин микротрещин. Взаимодействие микротрещин, вызванное уменьшением расстояния между ними вплоть до 10–20 мкм, качественно не меняет вышеописанный процесс залечивания, однако приводит к его существенному замедлению. Это легко объяснимо тем, что при одинаковой приложенной к образцу удельной электромагнитной энергии на залечивание одной трещины приходится энергии тем меньше, чем больше микротрещин имеется в единице объема. Выброс расплавленного материала в трещину по-прежнему имеет место. Однако процессы уменьшения длины микротрещины и сближение берегов микротрещины замедляются во времени (см. рис. 2–4). При малых расстояниях между дефектами это замедление приводит к тому, что часть материала в кончике струи успевает не только расплавиться, но и испариться (см. рис. 2б).

На рис. 5 представлены зависимости длины трещины от времени для областей интегрирования различных размеров ($a \neq b$), представляющих одну четверть прямоугольного представительного элемента, при задании на их границе разности потенциалов $\varphi = \text{const}$ (рис. 5а) и аналогичные зависимости ширины трещины от времени (рис. 5б).

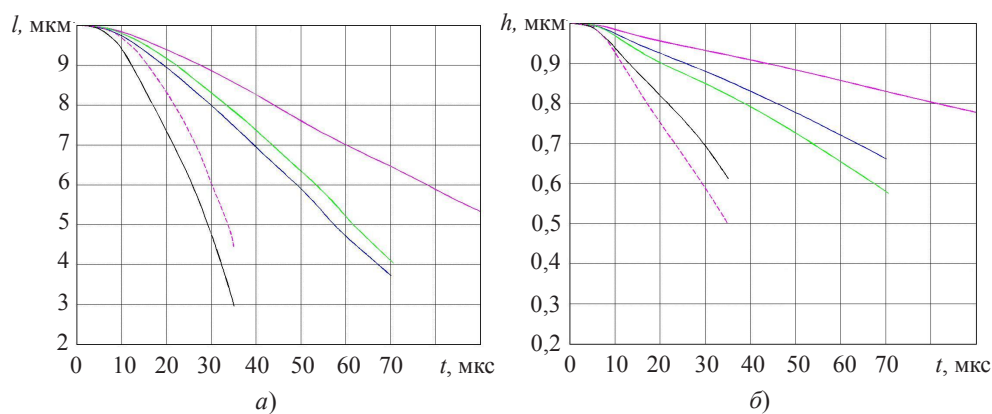


Рис. 5

Кривые на рис. 5 соответствуют: розовая – 1 микротрещина, элемент 20×20 мкм; синяя – 1 микротрещина, элемент 20×30 мкм; зеленая – 1 микротрещина, элемент 30×20 мкм; черная – 1 микротрещина, элемент 20×60 мкм; розовая штриховая – 1 микротрещина, элемент 60×20 мкм.

Из сравнения кривых для представительных элементов прямоугольной формы можно заключить, что в предлагаемой модели определяющим в величине интерва-

ла времени, требуемого для залечивания дефекта, является не расстояние вдоль осей x или y между микротрещинами (или, что то же самое, не форма представительного элемента), а параметр поврежденности, определяемый как отношение объема микротрещины к объему представительного элемента. При равной поврежденности процессы залечивания происходят одинаково.

Заключение

При моделировании процесса залечивания микротрещин можно без потери точности ограничиться рассмотрением в качестве области интегрирования одной четверти представительного элемента, задавая на ее горизонтальных границах разность потенциалов, определенную исходя из условия невозмущенности электрического поля. Уменьшение расстояния между трещинами вплоть до 1–2 их линейных размеров 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.

Список литературы

1. Беклемишев Н.Н., Кукуджанов В.Н., Порохов В.А. и др. Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля. *Препринт № 372. ИПМ АН СССР*. М., 1989. 56 с.
2. Клошников В.Д., Овчинников И.В. Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла. *Изв. АН СССР. МТТ*. 1988. № 4. С. 118–122.
3. 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.
4. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. Разрушение вершины трещины силовым электромагнитным полем. *ДАН СССР*. 1977. Т. 237, №2. С. 325–327.
5. 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. V. 17. P. 87–92.
6. 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. P. 1094–1096.
7. Atsushi Hosoi, Tomoya Kishi, Yang Ju. Healing of fatigue crack treated with surface-activated pre-coating method by controlling high-density electric current. *Proceeding 13th International Conference on Fracture*. June 16–21, 2013. Beijing, China. P. 233–245.
8. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. *Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства)*. Т. 1. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 590 с.
9. Партон В.З., Кудрявцев Б.А., Рубинский Б.Д. Распространение трещины под действием сильного электрического поля. *ДАН СССР*. 1981. Т. 250, № 5. С. 1096–1100.
10. 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.
11. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S., 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. P. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075.
12. 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/2015.1.0.

13. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. О воздействии высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в упругопластическом проводящем материале. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77, №3. С. 217–226.

14. Кукуджанов К.В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. №4. С. 138–158.

References

1. Beklemishev N.N., Kukudzhinov V.N., Porokhov V.A. i dr. Plastichnost' i prochnost' metallicheskikh materialov s uchetom impul'snogo vozdeystviya vysokoenergeticheskogo elektromagnitnogo polya. *Preprint № 372. IPM AN SSSR*. М., 1989. 56 s.

2. Klyushnikov V.D., Ovchinnikov I.V. Ploskaya zadacha o vozdeystvii mgnovennogo tochechno istochnika tepla. *Izv. AN SSSR. MTT*. 1988. № 4. S. 118–122.

3. Kukudzhinov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. Model' termoelektroplastichnosti izmeneniya mekhanicheskikh svoystv metallov na osnove reorganizatsii struktury defektov pod vozdeystviem impul'snogo elektricheskogo toka. *Izv. RAN. MTT*. 2011. № 6. S. 6–21.

4. Finkel' V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Razrushenie vershiny treshchiny silovym elektromagnitnym polem. *DAN SSSR*. 1977. Т. 237, №2. S. 325–327.

5. 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. V. 17. P. 87–92.

6. 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. P. 1094–1096.

7. Atsushi Hosoi, Tomoya Kishi, Yang Ju. Healing of fatigue crack treated with surface-activated pre-coating method by controlling high-density electric current. *Proceeding 13th International Conference on Fracture*. June 16–21, 2013. Beijing, China. P. 233–245.

8. Troitskiy O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva)*. Т. 1. М.–Ижевск: Институт комп'ютерных исследований, 2004. 590 s.

9. Parton V.Z., Kudryavtsev B.A., Rubinskiy B.D. Rasprostranenie treshchiny pod deystviem sil'nogo elektricheskogo polya. *DAN SSSR*. 1981. Т. 250, № 5. S. 1096–1100.

10. 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.

11. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S., 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. P. 745–753.

DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075.

12. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Protsessy deformirovaniya uprugoplasticheskogo materiala s defektami pri elektrodinamicheskom nagruzhении. *Vestnik PNIPIU. Mekhanika*. 2015. №1. S. 106–120. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.0.

13. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. O vozdeystvii vysokoenergeticheskogo impul'snogo elektromagnitnogo polya na mikrotreshchiny v uprugoplasticheskom provodyashchem materiale. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. Т. 77, №3. S. 217–226.

14. Kukudzhinov K.V. Modelirovanie vozdeystviya vysokoenergeticheskogo impul'snogo elektromagnitnogo polya na mikrotreshchiny v polikristallicheskom metalle. *Vestnik PNIPIU. Mekhanika*. 2015. №4. S. 138–158.

THE PROCESS OF HEALING OF MICROCRACKS IN THE METAL UNDER THE HIGH DENSITY CURRENT PULSES

Kukudzhanov K.V.^{1,2}

¹*A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

The processes of transformation of the flat microcracks with linear sizes about 10 microns under the processing of metal samples short pulses of high-density electric current are considered. Investigation carried out on the basis of numerical coupled quasi-stationary model of the impact of high-energy electromagnetic field on the pre-damaged thermal elasticplastic material with an ordered system defects. The model accounts for melting and evaporation of the metal and the dependence of its physical and mechanical properties on the temperature. The problem is solved numerically by finite elements method with adaptive mesh using on the base of alternative Euler – Lagrange's method. Simulation has shown it is the welding of the crack and healing of the micro-defects. The simultaneous reduction in the length, the ejection of the molten metal into the cracks and closing of micro-crack shores leads to the fact that the shores of the crack come into contact with the jet stream and finally the jet's material is completely jammed shores cracks. The influence of the distance between the microcracks in the processes of the healing and deformation are studied. Numerical modeling has shown, that at distances between the cracks of 10 or more of their lengths, the time required for the complete healing of the defect is weakly dependent on the distance between the defects and micro-defects interaction can be neglected. Interaction between microcracks in the metal begins to significantly affect on the processes of their healing, when the distance between them is reduced to about 5–6 of lengths of microcracks. With further decrease of the distance between the defects, up to the point where it becomes equal of length of microcracks, described the healing process does not qualitatively change, however, this slows down significantly: the ejection of the molten metal into the cracks is retained, but the crack sizes reduction is particularly in the transverse direction is considerably reduced.

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