

На правах рукописи

Лановая

ЛАНОВАЯ Анна Владимировна

**МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ И ЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИН
В ДЕФЕКТНЫХ ПРОВОДНИКАХ С ТОКОМ,
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 01.04.07 – «физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Белгород 2009

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Плужникова Т.Н.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Камышанченко Н.В.;

кандидат физико-математических наук
Пермякова И.Е.

Ведущая организация: Сибирский государственный
индустриальный университет

Защита состоится 26 февраля 2009 г. в 16⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д.212.015.04 при Белгородском государственном университете по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгородского государственного университета.

Автореферат разослан 22 января 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук, доцент



Беленко В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надежность и долговечность конструкций во многом определяется сопротивляемостью материала разрушению.

Наличие пор и трещин в материалах облегчает процессы разрушения с точки зрения уменьшения энергетических затрат.

Общепринятая теория прочности и разрушения с дислокационных позиций описывает достаточно большое количество микромеханизмов разрушения, которые подтверждаются экспериментально. Работа каждого из механизмов или их совместное действие является причиной возникновения критического напряженного состояния в очагах разрушения. Многообразие геометрических форм дефектов и внешних воздействий может порождать новые механизмы разрушения в сочетании с уже известными.

Физические свойства материалов, их структура, сопротивление разрушению, а также влияние внешних условий на зарождение трещин и их распространение являются важными факторами в развитии теорий прочности материалов, зарождения и управления процессами разрушения, а также залечивания дефектов различной геометрии внешними механическими, температурными и электромагнитными полями.

Механизмы разрушения довольно разнообразны, но все они, в конечном итоге, приводят к появлению нескольких типов трещин: трещина нормального отрыва, трещина продольного или поперечного сдвига. Последние могут встречаться и в проводниках с электрическим током, работающих, как правило, при одновременном воздействии магнитных полей. Электрические и магнитные поля, концентрируясь на дефектах, создают в зависимости от их направления благоприятные условия как для активизации роста трещин при зарождении процесса разрушения, так и для их торможения, схлопывания и залечивания. Материал при этом реанимируется с частичным или полным восстановлением сплошности. Исходя из изложенного, изучение процессов зарождения и развития разрушения, торможения и залечивания трещин в условиях действия электромагнитных полей, является актуальной задачей.

Цель работы. Аналитическое и экспериментальное исследование процессов разрушения и залечивания трещин в проводящих материалах с электрическим током, находящихся в магнитных полях.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

- Аналитически и экспериментально исследовать роль дефектов в проводящих материалах и степени концентрации на них электромагнитной энергии для установления её критического значения, приводящего к разрушению проводников.

- Установить механизмы разрушения и залечивания трещин в проводниках с электрическим током и установить связь плотности тока с известными критериями разрушения: пределом текучести материала и критическим коэффициентом интенсивности напряжений.
- Установить механизмы влияния внешнего магнитного поля различных направлений на процессы разрушения и залечивания трещин в проводниках с током.
- Экспериментально исследовать очаги разрушения и залечивания трещин в проводниках методом электронно-оптического муара, установив при этом по изменению муаровых картин геометрические характеристики дефектов и напряженность магнитного поля в вершине трещины.
- Оценить качество восстановления сплошности материалов, используя металлографические исследования и механические испытания образцов с залеченной трещиной.

Научная новизна:

- Показано, что при определенных параметрах электрического тока дефекты в виде отверстия, центральной и краевой трещин в проводнике являются причиной его локального разрушения по пондеромоторному или термомеханическому механизмам.
- Предложены механизмы разрушения и залечивания трещин в проводниках и найдены критические значения тока, при которых происходит расклинивание или схлопывание трещины.
- Впервые установлены механизмы разрушения дефектного проводника с током, находящегося во внешнем магнитном поле. Аналитически и экспериментально установлены параметры магнитного поля и тока, при которых происходит разрушение проводников.
- Показано, что внешнее магнитное поле, направленное встречно магнитному полю тока в вершине трещины, вызывает ее залечивание. Предложен механизм залечивания, найдены и экспериментально подтверждены значения магнитного поля и тока, при которых происходит восстановление сплошности материалов.
- Аналитически и экспериментально показано, что с помощью картин электронно-оптического муара по степени их искажения и изменению фрактальной размерности можно судить о наличии дефекта и его геометрических размерах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Аналитические и экспериментальные результаты исследования электромагнитной ситуации вокруг дефектов различной геометрии в плоских проводниках с электрическим током.

- Механизмы разрушения и залечивания трещин в проводниках с электрическим током при различных его направлениях по отношению к дефектам и аналитическая оценка параметров тока, необходимого для осуществления этих процессов.
- Механизмы разрушения и залечивания трещин в плоских проводниках с током, находящихся во внешнем магнитном поле различной ориентации и напряженности, в которых критерием разрушения считаются механические напряжения от пондеромоторных сил, достигающие предела текучести материала, а критерием залечивания - наличие расплавленного в вершине трещины металла, по объему достаточного для заполнения расплавом полости трещины при ламинарном его движении, обусловленным наложением внешнего магнитного поля.
- Экспериментальные результаты исследования структуры и механических свойств металлических проводников с залеченной трещиной.
- Экспериментальные результаты исследования протяженности зон разрушения и залечивания трещин в плоских проводниках с током, полученные при использовании электронно-оптического муара. Критерии оценки размеров дефектов, использующие степень искажения муаровых картин и их фрактальную размерность.

Практическая значимость. Экспериментально показано, что процессы разрушения можно предотвратить, если локальные участки нагружать попутными вдоль берегов трещины токами или внешними полями определенной ориентации, частично или полностью восстанавливая сплошность проводника в зоне разрушения.

Зарождение трещин в проводниках с током, находящимся во внешнем магнитном поле, можно использовать при механических испытаниях на вязкость разрушения.

Кроме того, результаты работы могут быть использованы как дополнение к теории прочности и пластичности твердых тел.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на II Международной школе «Физическое металловедение», XVIII Уральской школе «Актуальные проблемы физического материаловедения» Тольятти, 2006 год, на XVI и XVII Петербургских чтениях по проблемам прочности, Санкт-Петербург, 2006, 2007 годы, на XI Державинских чтениях ИМФИ ТГУ им. Державина, Тамбов, 2006 год, на Международной школе – конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений», Тамбов, 2007 год, на III Международном форуме - конкурсе «Актуальные проблемы современной науки», Самара, 2007 год, на IV Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», Москва, МИСиС, 2008 год.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 18 работах, указанных в конце автореферата.

Личный вклад автора. В опубликованных работах в соавторстве автору принадлежат планирование и проведение экспериментов, обсуждение результатов и написание статей.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 05-01-00759).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе и списка цитируемой литературы из 237 наименований, содержит 143 страницы текста, 56 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, практическая значимость, научная новизна, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор и анализ литературных данных по теме диссертации.

Рассмотрены механизмы разрушения и залечивания трещин в материалах, сделан краткий анализ работ по зарождению, распространению и залечиванию дефектов в кристаллических материалах.

Особое внимание уделено вопросам, связанным с внешним воздействием электромагнитных полей и их влиянием на механические характеристики и разрушение материалов. Рассмотрены процессы залечивания дефектов в механических, тепловых и электромагнитных полях.

В заключении обзора сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе исследовалось разрушение проводников с дефектами и их залечивание электрическим током.

В качестве объекта исследования использовали медные пластины шириной $b=10$ см и толщиной $h=1$ мм ($\sigma_T=2,5 \cdot 10^8$ Па).

Рассмотрены пондеромоторный и термомеханический механизмы разрушения проводников с током, ослабленных отверстием с радиусом R . В качестве критерия перехода от одного механизма к другому взята температура рекристаллизации.

Критерием разрушения стенок отверстия считали достижение напряжениями от пондеромоторных усилий предела текучести материала (σ_T). При этом критическое значение плотности тока определяли по формуле:

$$j_{кр} = 1,25 \sqrt{\frac{\sigma_T R}{hb}} \quad (1).$$

Кроме того, ток, обтекая отверстие, неравномерно нагревает его кромки (термомеханический механизм разрушения) и может привести к их плавлению. Критическое значение плотности тока в этом случае:

$$j_{кр} = \frac{1}{b} \sqrt{T_{пл} \sigma \rho C \chi} \quad (2),$$

где $T_{пл}$ - температура плавления, σ - проводимость, ρ - плотность, C - теплоемкость, χ - коэффициент температуропроводности.

Найденные критические значения плотности тока для медной пластины составили по пондеромоторному механизму ($j_{кр} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$); а по тепловому механизму ($j_{кр} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$).

Таким образом, разрушение пондеромоторными силами наступает при меньших плотностях тока по сравнению с термомеханическим разрушением.

Далее предложен механизм разрушения плоских проводников с трещиной током, протекающим вдоль ее берегов (рис. 1).

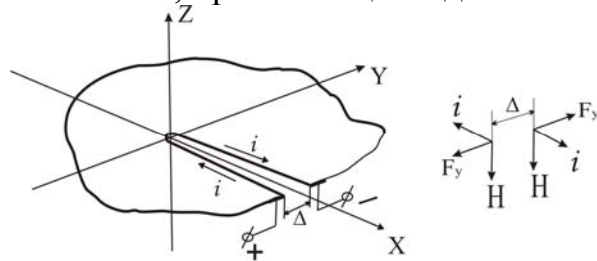


Рис. 1. Электромагнитная ситуация в пластине с трещиной при обтекании ее током i . Δ - расстояние между берегами трещины, H - напряженность магнитного поля тока, F_y - пондеромоторная сила.

Согласно основному положению механики разрушения трещина начинает расти, когда коэффициент интенсивности напряжений (K_{1C}) достигает критического значения, которое зависит от протяженности пластической области перед ее вершиной и предела текучести материала. Полагая, что протяженность пластической области (a) соизмерима с радиусом вершины трещины

$$a = \frac{K_{1C}^2}{\sigma_T^2},$$

и учитывая равенство механических напряжений от пондеромоторных сил пределу текучести, найдем значение плотности тока, при превышении которой начинается механическое разрушение:

$$j_{кр} = \frac{1,77\Delta}{hb} \sqrt{\frac{\sigma_T}{\mu_0}} \quad (3),$$

где μ_0 - магнитная постоянная.

С другой стороны, при обтекании трещины током возникает магнитное поле на «полувитке» ее вершины, которое порождает механические напряжения, обусловленные пинч-эффектом. При этом плотность тока, соответствующая началу разрушения, определяется из выражения:

$$j_{кр} = \frac{2,22\Delta}{hb} \sqrt{\frac{\sigma_T}{\mu_0}} \quad (4).$$

Экспериментально установлено, что импульс тока длительностью 100 мкс и плотностью 10^8 А/м^2 является наименьшим, приводящим к зарождению трещины в устье надреза. При этом геометрия надреза не нарушается (рис. 2).

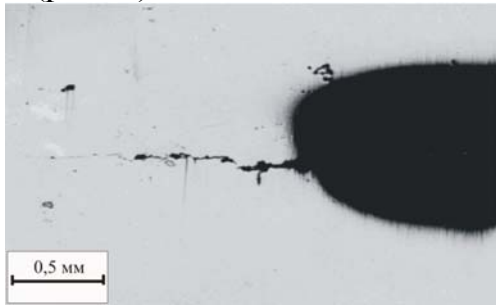


Рис. 2. Трещина, зародившаяся в устье надреза.

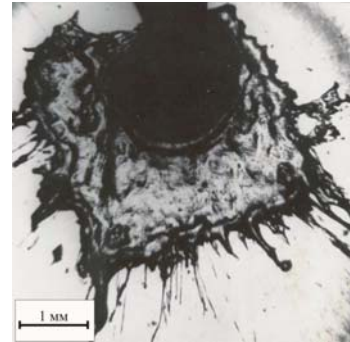


Рис. 3. Общий вид термомеханического разрушения вершины трещины.

При бóльших длительностях ток успевал нагревать локальную область до температур плавления, что приводило к изменению геометрии вершины и выплавлению металла из этой зоны с образованием отверстия (рис. 3).

Плотность тока, при которой наступает термомеханическое разрушение, равна:

$$j_y^{kp} = \sqrt{\frac{\chi L}{a l_T \rho \sqrt{l_T / a}}} \quad (5),$$

где L - объемная плотность энергии, необходимая для плавления, l_T - длина трещины.

При токе с меньшей плотностью тепловая волна опережает фронт разрушения и для аккумуляции энергии, необходимой на плавление, требуется определенное время.

Экспериментально установлено, что при плотности тока до $3 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$ видимого разрушения вершины трещины нет. Однако на дне дефекта при большем увеличении наблюдается сетка микротрещин по всей поверхности, причем их количество возрастает по мере приближения к вершине (рис. 4).

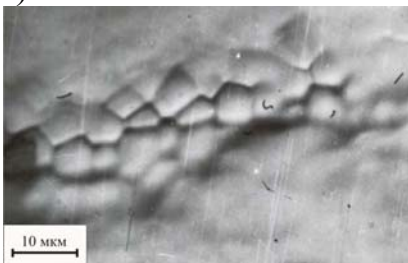


Рис. 4. Образование сетки микротрещин на донной поверхности дефекта.

Выплавленный металл осаждается на поверхности веерообразно, что обусловлено распределением электродинамических усилий в активной зоне. Киносъемка процесса разрушения (рис. 5) показала, что скорость разрушения постоянна.

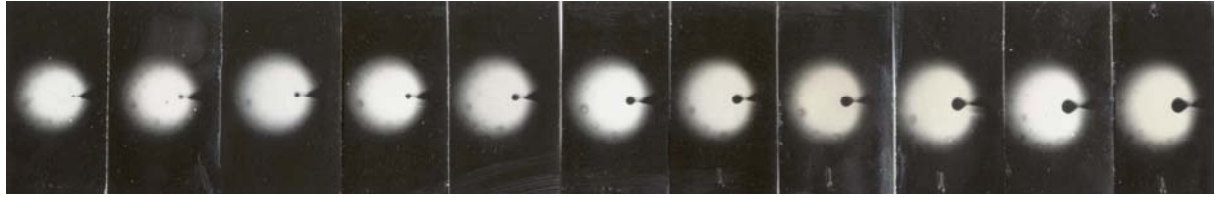


Рис. 5. Кинограмма процесса термомеханического разрушения медной пластины с трещиной. Скорость съемки 1000 кадр/сек.

Отмечено, что термомеханическому разрушению предшествовало пондеромоторное, сопровождающееся образованием микротрещины в вершине имеющегося надреза (рис. 5, кадр 1), поэтому рост радиуса выплавляемого отверстия является продолжением уже начавшегося разрушения.

Таким образом, разрушение вершины трещины под действием тока проходит две стадии: механическую и термомеханическую, которые определяются длительностью токового воздействия и контролируются распределением тока в пластине с дефектом. Поэтому, если локальный нагрев в дефектной зоне не дает видимых изменений в ее геометрии, это еще не означает сохранение работоспособности проводника с током.

Установлено, что при определенных направлениях по отношению к дефекту, ток может залечивать трещину (рис. 6).

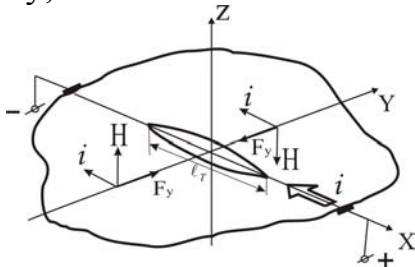


Рис. 6. Электромагнитная ситуация и механизм схлопывания центральной трещины в проводнике с током.

Рассматривая электромагнитную ситуацию вокруг центральной трещины, и полагая, что схлопывание происходит за пределами упругих деформаций, получили расчетную формулу для определения плотности тока, достаточной для залечивания центральной трещины:

$$j = 0,2 \cdot 10^3 \frac{\sigma_T}{Eb} \quad (6),$$

где E - модуль упругости материала.

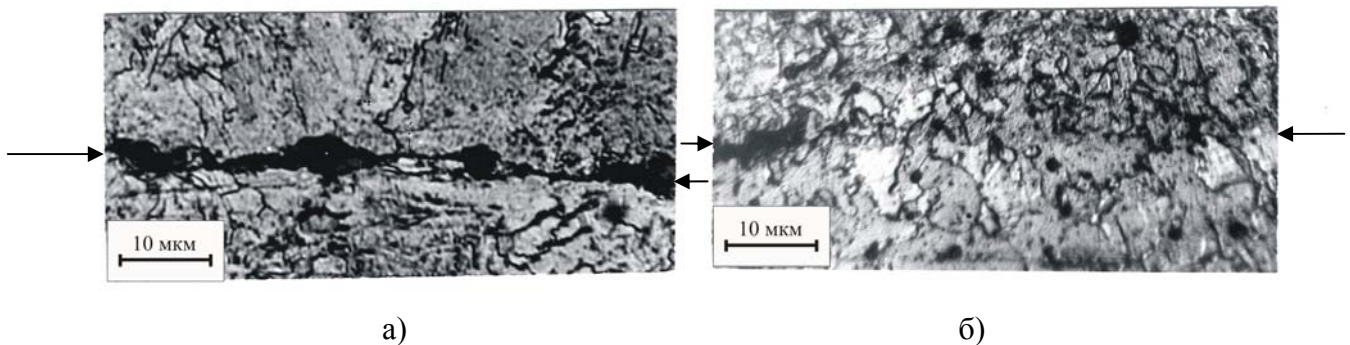


Рис. 7. Структура залеченной трещины в меди: а) плотность тока $4 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$, длительность импульса 10^{-4} с ; б) плотность тока $4 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$, длительность импульса 1 с. Стрелками отмечено русло трещины.

Экспериментально установлено, что импульс тока с амплитудой $4 \cdot 10^7$ А/м² и длительностью 100 мкс схлопывает центральную трещину частично (рис. 7а).

Ликвидация пор и пустот требует, очевидно, нагрева берегов трещины и для полного залечивания необходимо увеличить длительность импульса тока (рис. 7б).

Эффект схлопывания может наблюдаться и на краевой трещине, если ток по пластине пропускать вдоль ее берегов (рис. 8).

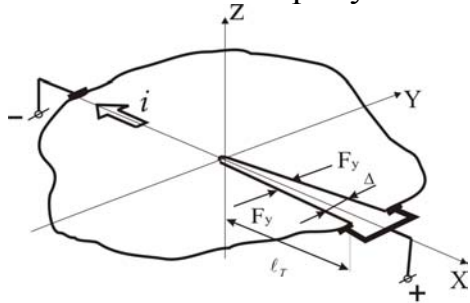


Рис. 8. Схлопывание краевой трещины в проводнике с током.

Металлографические исследования показали, что структура образца с залеченной трещиной имеет более мелкое зерно по сравнению с матрицей. В ориентации зерен наблюдается текстура, обусловленная действием пондеромоторных сил, при этом сплошность металла в зоне дефекта полностью не восстановлена. Такое явление можно устранить, если процесс схлопывания осуществлять во внешнем магнитном поле, направление которого совпадает с полем тока и способствует процессу залечивания и кристаллизации металла в области восстановления сплошности.

В третьей главе рассматривается разрушение проводников с трещинами и их залечивание в магнитном поле.

Предложены механизмы разрушения проводников с током и трещиной, находящихся во внешнем магнитном поле определенного направления.

Механизм разрушения проводника с трещиной во внешнем магнитном поле, направленном попутно току (рис. 9).

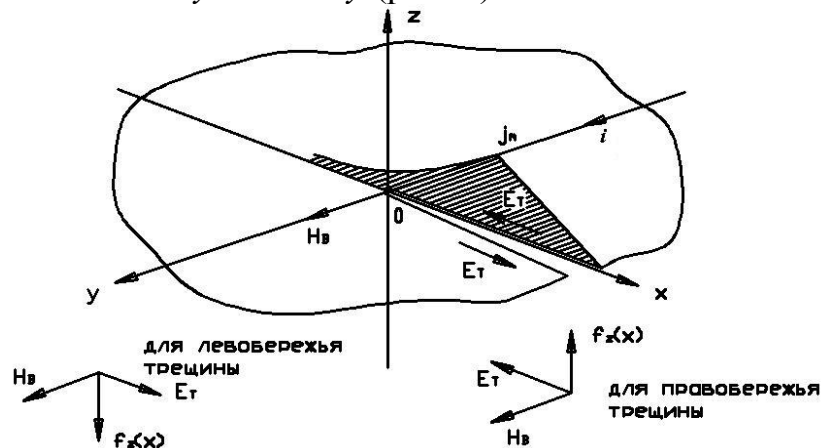


Рис. 9. Электромагнитная ситуация в пластине с трещиной. H_0 – напряженность внешнего магнитного поля; ℓ_T – длина трещины; a – радиус при вершине, E_T – распределение напряженности электрического поля тока вдоль трещины.

Анализ электромагнитной ситуации вокруг трещины показывает, что возникает деформированное состояние около ее вершины, приводящее к сдвигу одной береговой плоскости по отношению к другой. Использование бигармонического уравнения линейной теории упругости позволило найти механические напряжения в вершине трещины. Значения напряжений сопоставлены с пределом текучести материала. В этом случае предельная скорость деформирования связана с балансом плотности потока электромагнитной энергии и энергии разрушения. Механические напряжения при этом равны:

$$\sigma_f = \frac{E_T \cdot H_B}{V} = \frac{j}{\sigma V} \left(1 + \sqrt{\ell_T / a} \right) H_B \quad (7),$$

где σ_f - напряжение от пондеромоторных сил, V – скорость деформирования.

Анализ формулы (7) показал, что пондеромоторные силы не могут создать напряженного состояния в вершине трещины, способного разрушить проводник (рис. 10) при заданных параметрах. Однако экспериментальные исследования показали, что зарождение трещины все же наблюдается. Это говорит о том, что вместе с пондеромоторными напряжениями действуют термические, которые снижают предел текучести материала и уменьшают работу разрушения.

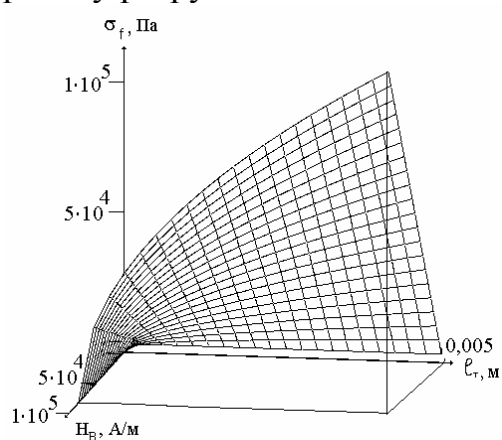


Рис. 10. Зависимость механических напряжений от величины внешнего магнитного поля и длины трещины.

Механизм разрушения проводника с трещиной во внешнем магнитном поле, направленном ортогонально току (рис. 11).

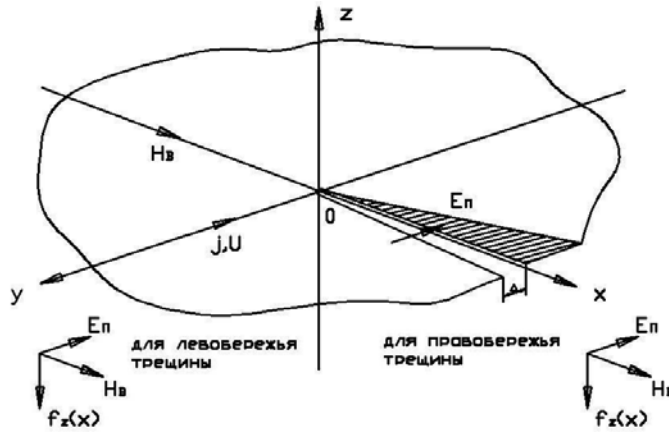


Рис. 11. Электромагнитная ситуация в пластине с трещиной.

Распределение электрического потенциала по берегам трещины найдено с помощью уравнения Лапласа

$$\nabla^2 U = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad (8),$$

при следующих граничных условиях: 1) внешние поверхности и трещина являются изоляторами, т.е. $\frac{\partial U}{\partial x} = 0$ (при $x = 0$ и $x = b$); $\frac{\partial U}{\partial y} = 0$ (при $y = 0$ и $x = \ell_T$); 2) живое сечение пластины ($y > \pm \frac{\Delta}{2}$; $\ell_T < x < b$) является эквипотенциальной поверхностью.

Наложение на активизируемую током зону внешнего магнитного поля попутно полю тока ускоряет процесс разрушения. При встречной ориентации этих полей процесс разрушения замедляется. При компенсации поля тока внешним полем – разрушение прекращается. Превышение внешнего поля над полем тока приводит к залечиванию трещины. Причем, этому процессу предшествует термомеханическое разрушение ее вершины. Оценена скорость залечивания:

$$v_{\text{зал}} = \frac{4,7 j_y^3 \ell_T}{\Delta \sigma^2 L^2 \chi} (H_B - H_{Z0}) = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с},$$

где $(H_B - H_{Z0})$ – разность напряженностей внешнего магнитного поля и магнитного поля тока в вершине дефекта.

Действие предложенных механизмов проверено экспериментально. При проведении экспериментов использовали пластины из армко-железа размером 80x30x0,5 мм с краевым надрезом в виде узкого канала шириной $\Delta=0,2$ мм и длиной 15 мм.

Кинофильмирование процесса залечивания показало, что наблюдается небольшое расхождение по длине залеченного участка, полученного экспериментально и найденного теоретически. Это говорит о том, что не весь расплав участвует в восстановлении сплошности. Часть его образует наплывы по берегам трещины. В результате механических испытаний установлено, что образцы с залеченной трещиной имеют большее сопротивление разрушению, чем те же образцы с трещиной исходной длины. Разрабо-

танная методика может быть предложена как метод повышения прочностных характеристик металлов с дефектами (рис. 12).

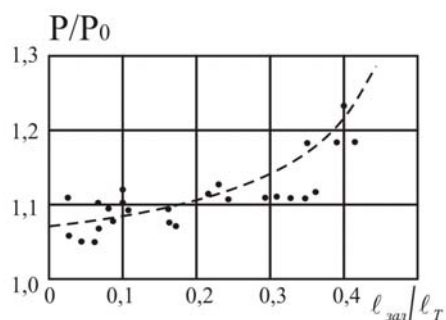


Рис. 12. Зависимость степени упрочнения (P/P_0) от степени залечивания ($l_{зал} / l_T$), P_0 – разрушающая нагрузка для образцов с исходной длиной трещины, равной 15 мм.

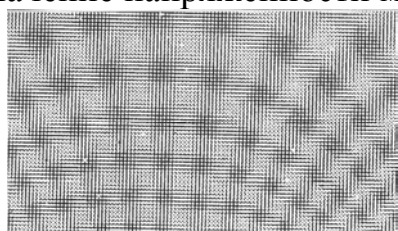
Четвертая глава посвящена исследованию локальных участков разрушения и залечивания методом электронно-оптического муара. Приведены экспериментальные результаты и аналитические оценки напряженности магнитного поля вокруг отверстия и трещины.

Для оценки геометрических параметров дефектов методом электронно-оптического муара вводили коэффициент искажения муарового изображения $K=P_a/P_0$ (где P_a – количество черных пикселей на искаженной локальным полем муаровой картине; P_0 – количество черных пикселей на муаровой картине бездефектного образца) и использовали также фрактальную размерность $d_f = \ln M(R) / \ln R$ (где $M(R)$ – топографически изменяющийся плоский массив или в данном случае количество черных пикселей после фильтрации муарового изображения; R – общее количество пикселей), которые определялись при компьютерной обработке муаровых изображений (рис. 13).

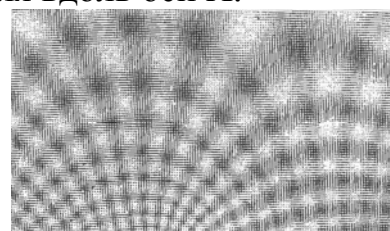
Это позволило оценить геометрические параметры разрушения и залечивания дефектов в проводниках как по коэффициенту искажения (рис. 14), так и по изменению фрактальной размерности муарового изображения (рис. 15), которые связаны с изменением концентрации магнитного поля на этих дефектах (например, для трещины (9)):

$$H_z(x) = \frac{H_{Zm}}{1 + \left(\frac{z}{10a}\right)^2} \quad (9),$$

где H_{Zm} – напряженность магнитного поля вдоль оси z , $H_z(x)$ – максимальное значение напряженности магнитного поля вдоль оси X .



а)



в)

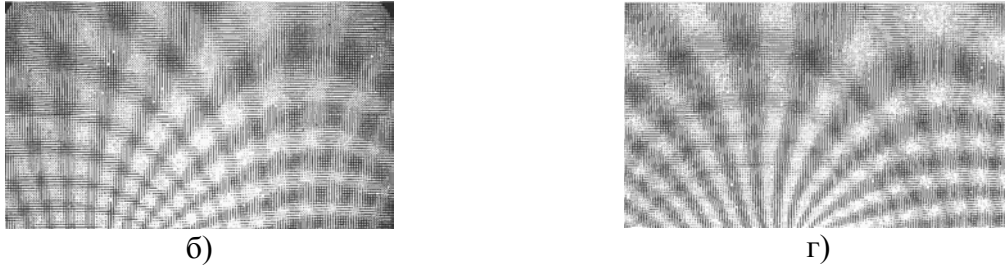


Рис. 13. Муаровые узоры, соответствующие магнитному полю плоской пластины при постоянном токе: а) бездефектная пластина, б) пластина с центральным отверстием, в) пластина с краевой трещиной, г) пластина с залеченной трещиной.

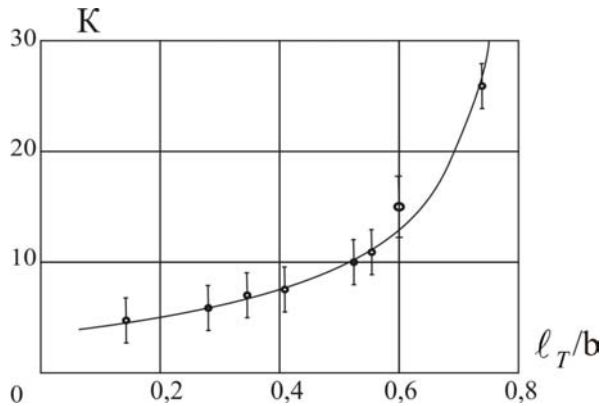


Рис. 14. Зависимость коэффициента К от протяженности трещины в пластине с неизменным током: l_T – длина трещины; b – ширина пластины. Радиус при вершине трещины $a = \text{const}$.

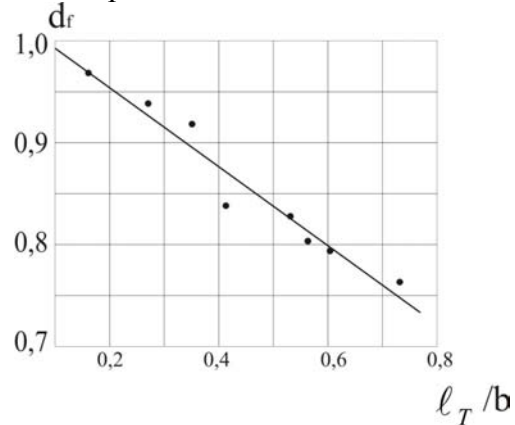


Рис. 15. Зависимость фрактальной размерности от протяженности дефекта.

Аппроксимация экспериментальных результатов позволяет найти аналитическую зависимость длины трещины от степени искажения муаровых картин (10) и геометрические параметры растущих и залеченных трещин по изменению фрактальной размерности (11):

$$l_T = \sqrt[3]{K^2 b^2 a} \quad (10),$$

$$l_T = b(1 - d_f) \quad (11).$$

Таким образом, метод электронно-оптического муара может быть использован для оценки дефектности образца.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Показано, что электрический ток в проводнике с дефектом в виде отверстия, концентрируясь на его краях, разрушает проводник по пондеромоторному или термомеханическому механизмам. Первый механизм связан с достижением электродинамическими усилиями предела текучести материала. Второй обусловлен повышением температуры в области дефекта. Установлены параметры тока (длительность и амплитуда), необходимые для реализации этих механизмов. В качестве критерия смены механизма разрушения взята температура рекристаллизации.

2. Установлено, что электромагнитное поле, локализуясь по берегам трещины в проводнике с током, формирует благоприятные условия для разрушения или ее залечивания, создает расклинивающие или схлопывающие усилия, обусловленные встречными или попутными токами вдоль берегов трещины. Результаты экспериментов на медных пластинах с центральной и краевой трещинами-разрезами подтверждают механизмы, предложенные расчетными моделями разрушения и залечивания.

3. Впервые установлено, что при определенной взаимной ориентации направления электрического тока и внешнего магнитного поля происходит разрушение дефектного проводника с током за счет развития трещины поперечного сдвига. Аналитически и экспериментально найдены параметры магнитного поля и тока, необходимые для начала разрушения по предложенному механизму. Низкие значения напряжений разрушения в этом случае обусловлены нагревом материала в вершине трещины.

4. Показано, что внешнее магнитное поле, направленное встречно магнитному полю тока в вершине трещины, способствует ее залечиванию. Предложен механизм залечивания, заключающийся в возникновении электродинамических усилий от взаимодействия внешнего магнитного поля и тока в проводнике, направленных в полость трещины и движущих расплав металла. Найдены и экспериментально подтверждены значения магнитного поля и тока, необходимые для восстановления сплошности материалов по указанному механизму.

5. Металлографические исследования показали структурную однородность частично восстановленной сплошности металла на месте трещины, а механические испытания металлических пластин с залеченной трещиной – увеличение прочности до 30% по сравнению с исходной.

6. Установлено, что степень искажения муаровых картин (обусловленная изменяющейся концентрацией магнитного поля на этих дефектах) и их фрактальная размерность могут служить мерой оценки дефектности структуры и геометрических размеров залеченных участков трещин.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лановая, А.В. Разрушение дефектных проводников с током в магнитном поле / А.В. Лановая, В.М. Иванов, А.А. Лозенков, Т.Н. Плужникова // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2008. – Т.72, №9. – С. 1341-1343.

2. Лановая, А.В. О концентрации энергии на отверстиях в плоском проводнике с током / А.В. Лановая, Н.П. Пучков, Г.А. Барышев // Вестн. Тамб. гос. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. - Тамбов, 2000. - Т.5, вып. 2-3. - С. 328-330.

3. Плужникова, Т.Н. Исследование магнитного поля одновиткового проводника по электронно-оптическим муаровым картинам / Т.Н. Плужникова, Д.Н. Лимонов, В.М. Иванов, А.В. Лановая // Вестн. Тамб. гос. ун-

та. Сер. Естественные и технические науки. - Тамбов, 2005. - Т. 10, вып. 3.- С. 233-235.

4. Плужникова, Т.Н. Критерии наличия дефектов в плоских проводниках по электронно-оптическим муаровым узорам / Т.Н. Плужникова, Д.Н. Лимонов, В.М. Иванов, А.В. Лановая // Вестн. Тамб. гос. ун-та. Сер. Естественное и технические науки. - Тамбов, 2005. - Т. 10. Вып. 3.- С. 229-232.

5. Иванов, В.М. Механизмы разрушения проводников с трещиной электромагнитным полем / В.М. Иванов, А.В. Лановая, А.А. Лозенков, Т.Н. Плужникова // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: материалы IV Междунар. шк.-конф., г. Тамбов, 24-30 июня 2007 г. – Тамбов, 2007. - С. 289-293.

6. Лановая, А.В. Механизм разрушения проводников с трещиной электромагнитным полем / А.В. Лановая, Т.Н. Плужникова, В.М. Иванов, А.А. Лозенков // Сб. тез. докл. XVII Петерб. чтений по проблемам прочности, посвященных 90-летию со дня рождения профессора А.Н. Орлова, г. СПб., 10-12 апреля 2007 г. – СПб., 2007. – Ч.1. - С. 249-251.

7. Лановая, А.В. Влияние электромагнитного поля на разрушение проводников с трещиной / А.В. Лановая, Т.Н. Плужникова, В.М. Иванов, А.А. Лозенков // Сб. тез. докл. XVII Петерб. чтений по проблемам прочности, посвященных 90-летию со дня рождения профессора А.Н. Орлова, г. СПб., 10-12 апреля 2007 г. – СПб., 2007. – Ч. 1. - С. 252-254.

8. Иванов, В.М. Фрактальное представление электронно-оптических муаровых картин на магнитных полях в проводниках с дефектами / В.М. Иванов, А.В. Лановая, Т.Н. Плужникова // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: материалы IV Междунар. шк.-конф., г. Тамбов, 24-30 июня 2007 г. – Тамбов, 2007. - С. 288-289.

9. Лановая, А.В. Разрушение дефектных проводников с током в магнитных полях / А.В. Лановая, А.А. Лозенков, Т.Н. Плужникова // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: сб. науч. тр. молодых ученых IV Междунар. шк.-конф., г. Тамбов, 24-30 июня 2007 г. – Тамбов, 2007. - С. 336-341.

10. Плужникова, Т.Н. Исследование дефектов в проводниках по электронно-оптическим муаровым картинам / Т.Н. Плужникова, В.М. Иванов, Д.Н. Лимонов, А.В. Лановая // Физическое материаловедение: сб. тез. II Междунар. шк.; Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: урал. шк. металловедов-термистов, г. Тольятти, 6-10 февр. 2006 г. – Тольятти, 2006. - С. 152.

11. Плужникова, Т.Н. Муаровые картины дефектов проводников, полученные электронно-оптическим методом / Т.Н. Плужникова, Д.Н. Лимонов, В.М. Иванов, А.В. Лановая // Сб. тез. докл. XVI Петерб. чтений по

проблемам прочности посвященных 75-летию со дня рождения В.А. Лихачева, г. СПб., 14-16 марта 2006 г. . – СПб., 2006. - С. 30.

12. Иванов, В.М. Исследование дефектов в проводящих материалах методом электронно-оптического муара / В.М. Иванов, А.В. Лановая, Д.Н. Лимонов, Т.Н. Плужникова // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: материалы IV Междунар. шк.-конф., г. Тамбов, 24-30 июня 2007 г. - Тамбов, 2007. - С. 342-343.

13. Иванов, В.М. Исследование магнитного поля проводника с трещиной по электронно-оптическим муаровым картинам / В.М. Иванов, А.В. Лановая, Е.А. Печагин, Е.Б. Винокуров, А.А. Манушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2007. – Т. 15. Вып. 3. – С. 577-579.

14. Ivanov, V.M. Fraktal Structure genesis of electron-optikal moiré on small extention magnetic dispersion fields / V.M. Ivanov, A .V. Lanovaja, E. Pechagin, E. Vinokurov, A. Lozenkov // TRANSACTIONS of the Tambov State Technical University. – 2007. - V. 13, № 3. - P. 777-781.

15. Козицкий, Н.Н. Развитие фрактальных структур электронно-оптического муара при измерении магнитных полей рассеяния в малых объемах / Н.Н. Козицкий, В.И. Полунин, А.В. Лановая, А.А. Лозенков // Актуальные проблемы современной науки: сб. тр. – Самара, 2007. - С. 154-156.

16. Иванов, В.М. Механизмы разрушения проводника с трещиной электромагнитным полем / В.М. Иванов, А.В. Лановая, А.А. Лозенков, Т.Н. Плужникова // Прочность неоднородных структур: тез. докл. IV Евраз. науч.-практ. конф. / МИСиС. – М., 2008. – С.35.

17. Ivanov, V.M. Mathematical model of electron-optical moiré pattern of magnetic field on electronic equipment element defects / V.M. Ivanov, E.B. Vinokurov, E.A. Pechagin, M.I. Potapochkina, A V. Lanovaja // TRANSACTIONS of the Tambov State Technical University. – 2008. - V. 14, № 2. - P. 247-253.

18. Способ измерения магнитных полей по электронно-оптическим муаровым картинам: положительное решение о выдачи патента / Калинин В.Ф., Иванов В.М., Печагин Е.А., Лановая А.В., Иванова Л.М.; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. -№2007123081/28(025129); заявл. 19.06.2007.