

Напряженное состояние в металле с дефектами при пропускании импульсов электрического тока

Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния металлического тела с дефектами типа макротрещины и пор, возникающего при пропускании импульсного электрического тока высокой плотности. С использованием метода конечных элементов исследована кинетика локального нестационарного напряженно-деформированного состояния металла вблизи дефектов при действии импульсов электрического тока и механической нагрузки. Показано, что в результате указанного термомеханического воздействия в окрестности дефектов формируются локальные области остаточной напряженности, влияющей на уровень максимальных напряжений при последующем механическом нагружении. Эффект возможного “залечивания” микродефектов кристаллической решетки при локальном термомеханическом воздействии иллюстрируется результатами моделирования с использованием метода молекулярной динамики.

Ключевые слова: импульсный электрический ток, трещина, пора, метод конечных элементов, молекулярная динамика.

Введение. Исследование эффектов, вызванных воздействием электрического тока на металлические материалы, представляет практический интерес для разработки современных технологий металлообработки. Наиболее полно изучено пластифицирующее действие тока [1–3], использованное в технологических процессах волочения проволоки и производства тонколистового проката [4, 5].

Менее изучено влияние электрического тока на повышение стойкости режущего инструмента, прочности деталей машин при циклическом нагружении, в том числе при наличии трещин и концентраторов напряжений. Однако результаты выполненных исследований [6–8] свидетельствуют о перспективности использования электрического тока для решения указанных задач.

Большинство исследований, посвященных влиянию электрического тока на поврежденный металл, как правило, ограничивалось оценкой концентрации электрического тока у вершины трещины либо изучением влияния тока на изменение структуры металла у вершины и ее затупление [9–11]. Кинетика локального напряженно-деформированного состояния (НДС) металла вблизи дефектов при совместном действии импульсного электрического тока (ИЭТ) и механической нагрузки изучена недостаточно для понимания механизма влияния ИЭТ на максимальную напряженность при последующем нагружении.

В данной работе приведены результаты численного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) кинетики НДС в области острого дефекта и отверстия (поры), обусловленной пропусканием импульсного электрического тока высокой плотности, а также совместным действием тока и механического нагружения. Результаты моделирования методом

молекулярной динамики поведения кристаллической решетки с микродефектами иллюстрируют влияние локального нагрева и повышения давления, вызванных действием ИЭТ, на “залечивание” дефектов.

Численное моделирование НДС в полосе с дефектом типа ромбовидной трещины. Рассматривается поведение металлической полосы шириной 20 мм и длиной 200 мм с симметричным центральным сквозным дефектом – ромбовидным отверстием, занимающим треть сечения (длина диагоналей 6,67 и 0,83 мм) в плоском деформированном состоянии (ПДС) и плоском напряженном состоянии (ПНС).

Используемые для моделирования значения параметров упругопластического деформирования металла примерно соответствуют таковым для низкоуглеродистой стали: предел текучести, изменяющийся линейно от $\sigma_T^0 = 300$ МПа при нулевой температуре до $\sigma_T^{750} = 100$ МПа при 750°C, модуль деформационного упрочнения $M = \sigma_T$, модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, удельное электрическое сопротивление $\rho = 10^{-7}$ Ом·м, объемная теплоемкость $C_V = 3,6$ МПа/(м³·К). Конечноэлементная модель (со сгущением в области концентраторов) обеспечивает характерный размер конечного элемента в области острого концентратора не выше 0,3 мм.

Методом конечных элементов моделировали следующие режимы нагружения: циклическое нагружение растягивающим напряжением на концах полосы 100 МПа (нагрузка–выдержка–разгрузка–выдержка) при постоянной начальной температуре (за период времени 0..0,3 мс), за которым следовало циклическое термомеханическое нагружение (нагрев–выдержка–охлаждение–выдержка) при действии растягивающего напряжения на концах полосы 100 МПа (0,3...0,9 мс), после чего проводилось циклическое нагружение разгрузка–выдержка–нагрузка–выдержка при начальной температуре (0,9...1,1 мс).

Длительность каждого расчетного этапа (нагрузка, разгрузка, нагрев, охлаждение, выдержка) составляла 50 мкс. Нагрев осуществлялся пропуском импульсного электрического тока, вызванного разностью потенциалов между сечением с концентратором и концом полосы, линейно возрастающей до максимальной величины 56,5 В за 50 мкс.

Максимальная рассчитанная плотность электрического тока в элементе у острой вершины дефекта составляла $2,04 \cdot 10^{10}$ А/м², у края полосы в сечении с дефектом – $9,06 \cdot 10^9$ А/м², на концах полосы (в области однородной по сечению плотности тока) – $7,85 \cdot 10^9$ А/м². Температура нагрева $T = 567, 78$ и 59°C соответственно.

Расчеты выполняли без учета влияния теплопроводности, так как она существенна только при длительности этапа более 0,1 с. Этап охлаждения задавали снижением температуры до исходной за 50 мкс, поскольку длительность нагрева–охлаждения не влияет на локальное НДС у дефекта при деформировании материала (если не учитывать ползучесть).

На рис. 1 приведены результаты расчетов напряжений и деформаций в полосе с ромбовидным дефектом, обусловленных указанными выше режимами нагружения при ПДС. Видно, что первый цикл нагружения при исход-

ной температуре вызывает небольшую пластическую деформацию вблизи вершины дефекта, величина которой практически не изменяется при последующих циклах нагружения. Пластическая деформация растяжения $\varepsilon_x \approx \approx 0,001$ возникает у острой вершины дефекта вдоль оси полосы, в двух других направлениях наблюдается деформация сжатия. Максимальное напряжение растяжения у этой вершины $\sigma_x \approx 375$ МПа существенно выше напряжения на концах полосы (100 МПа).

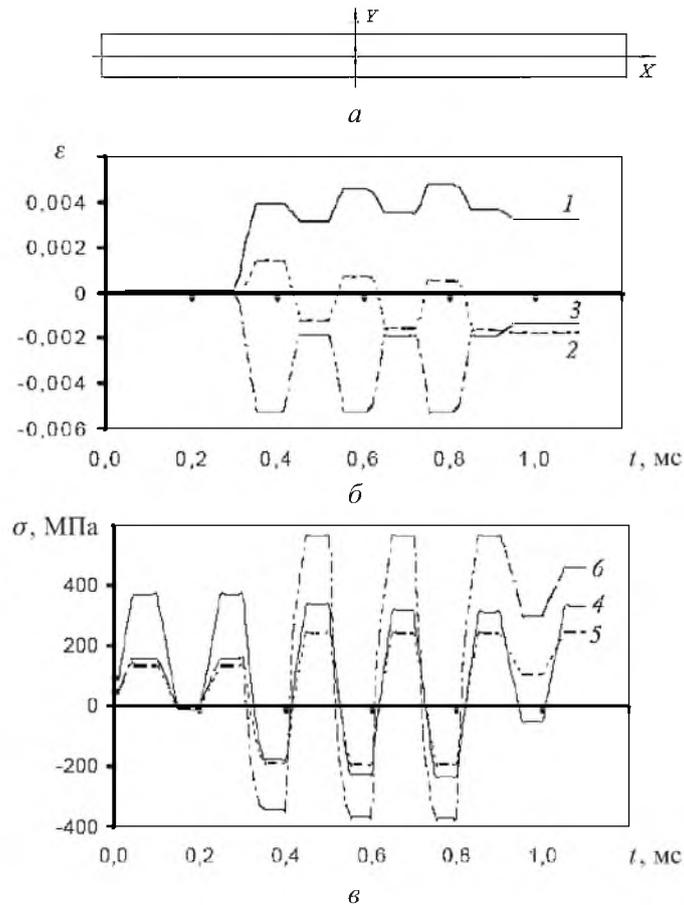


Рис. 1. Изменение во времени пластических деформаций и напряжений в полосе с ромбовидным дефектом при ПДС: a – вид полосы и ортогональных координат; b – деформации ε_x (1), ε_y (2) и ε_z (3); c – напряжения σ_x (4), σ_y (5) и σ_z (6).

Действие электрического тока в трех следующих циклах, включающих этапы нагрева ИЭТ и охлаждения, вызывает повышение температуры, которая достигает максимума вблизи вершины дефекта (567°C). Объемное термическое расширение металла в этой области приводит на этапе нагрева к возникновению локальных напряжений сжатия и существенному росту пластической деформации (рис. 1). Охлаждение нагруженной полосы после нагрева вызывает в острой вершине дефекта значительные растягивающие напряжения σ_x , величина которых несколько понижается при последующих нагреве и охлаждении.

В конечном счете термическое действие электрического тока на НДС у острой вершины дефекта в растянутой полосе проявляется в снижении максимального уровня локальных растягивающих напряжений σ_x у дефекта, что является результатом развития локальных пластических деформаций и деформационного упрочнения. После разгрузки (в холодном состоянии) у острого концентратора формируется область локальных сжимающих напряжений вдоль оси полосы, по двум другим направлениям возникают остаточные растягивающие напряжения (рис. 1).

Как показывают результаты расчетов, при ПДС и ПНС (соответствует нагружению полосы малой толщины) и исходной температуре не происходит существенного пластического деформирования материала у острого дефекта, в то время как действие ПЭТ на нагруженную растяжением полосу сопровождается пластическим деформированием, т.е. деформационным упрочнением и затуплением острой вершины дефекта.

Численное моделирование НДС в полосе (стержне) с дефектом типа отверстия (поры). Рассматривается поведение металлической полосы шириной 60 мм, длиной 200 мм с расположенным в центре цилиндрическим отверстием диаметром 6 мм в условиях ПДС и ПНС, а также цилиндрического стержня диаметром 60 мм, длиной 200 мм со сферической полостью диаметром 6 мм, расположенной на его оси в центральной части. Выбранные размеры полосы (стержня) и отверстия (поры) обеспечивают оценку влияния таких дефектов, малых по сравнению с рассматриваемым объемом металла, что с учетом сохранения особенностей поведения металла при уменьшении масштаба позволяет использовать результаты приведенных ниже расчетов для оценки влияния аналогичных дефектов малых размеров.

Как и ранее, используемые для моделирования параметры упругопластического деформирования металла примерно соответствуют таковым для низкоуглеродистой стали: пределы текучести $\sigma_T^0 = 300$ МПа при нулевой температуре, $\sigma_T^{750} = 100$ МПа при 750°C, модуль деформационного упрочнения $M = \sigma_T$, модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Однако в данном случае удельное электрическое сопротивление и объемную теплоемкость принимали зависящими от температуры в соответствии с данными для железа [12].

С использованием МКЭ моделировали следующие этапы нагружения: нагрузка–выдержка–разгрузка–выдержка (два цикла при постоянной начальной температуре за период времени 0...0,2 мс) при уровне растягивающей нагрузки на концах полосы (стержня) 150 МПа, затем термомеханическое нагружение нагрев–выдержка–охлаждение–выдержка при растягивающей нагрузке на концах полосы (стержня) 150 МПа (0,3...0,6 мс) и далее – разгрузка–выдержка при начальной температуре (0,7...0,8 мс). В расчетах для этапа нагрева при действии ПЭТ теплопередачей, как и ранее, также пренебрегали.

Для цилиндрического стержня дополнительно были выполнены расчеты НДС при такой же последовательности этапов нагружения, но при воздействии сжимающей нагрузки 150 МПа.

Длительность каждого расчетного этапа (нагрузка, разгрузка, нагрев, охлаждение, выдержка) составляла 100 мкс. Нагрев осуществлялся пропуском импульсного электрического тока, вызванного разностью потенциалов 100 В (линейное повышение разности потенциалов на торцах стержня до 100 В за время 50 мкс, а затем ее снижение до нуля за такой же период времени).

Максимальная плотность электрического тока вблизи отверстия достигала 10^{10} А/м², у края полосы в сечении с дефектом – $7,4 \cdot 10^9$ А/м², на концах полосы (в области однородной по сечению плотности тока) – $7,1 \cdot 10^9$ А/м². Максимальное повышение температуры в указанных местах составляло 372 (под углом 90° – 13,5°C), 136 и 124°C соответственно.

Максимальная плотность электрического тока в поперечном сечении стержня у поверхности сферического дефекта равна $8,6 \cdot 10^9$ А/м², у поверхности стержня в сечении с порой – $7,2 \cdot 10^9$ А/м², на концах стержня – $7,1 \cdot 10^9$ А/м². Максимальное повышение температуры в указанных местах: 207, 126 и 126°C соответственно.

На рис. 2–4 приведены результаты расчетов НДС. Как следует из анализа результатов расчетов при ПНС (рис. 2) повышенный локальный нагрев металла вблизи отверстия под действием тока приводит к существенному снижению уровня максимальных напряжений нагруженной растяжением полосы и развитию пластических деформаций. После остывания уровень максимальных растягивающих напряжений у отверстия ниже, чем до обработки электрическим током, что связано с возникновением остаточных напряжений сжатия в разгруженной полосе.

Как показывают результаты расчетов при ПДС, качественное влияние эффектов, вызванных обработкой электрическим током, на напряжения и деформации сохраняется, однако уровень остаточных напряжений и пластических деформаций ниже, чем при ПНС, рассмотренном выше.

Напряженно-деформированное состояние стержня со сферической плоскостью соответствует осесимметричному. Анализ результатов расчетов (рис. 3) свидетельствует, что повышенный локальный нагрев у поверхности полости под действием ИЭТ вызывает снижение уровня максимальных напряжений нагруженного растяжением стержня и сопровождается развитием пластических деформаций, меньших, чем при ПНС. После остывания уровень максимальных растягивающих напряжений у поверхности полости ниже, чем до обработки электрическим током, что связано с возникновением остаточных напряжений сжатия в разгруженном стержне.

Отметим, что уровень остаточных напряжений возрастает при повышении теплового эффекта обработки электрическим током, например при увеличении длительности или числа ее циклов, за период времени, при котором не происходит выравнивания температуры вследствие эффектов теплопроводности (для рассмотренных случаев это время составляет несколько секунд).

Действие импульсного тока на стержень со сферической порой при его сжатии характеризуется тем, что в сечении с порой в радиальном (по

отношению к оси стержня) направлении возникает пластическая деформация растяжения, в двух других направлениях – сжатия (рис. 4).

После обработки ИЭТ и разгрузки в окрестности поры создается остаточное напряжение растяжения, в результате чего при последующем растяжении уровень максимальных напряжений выше.

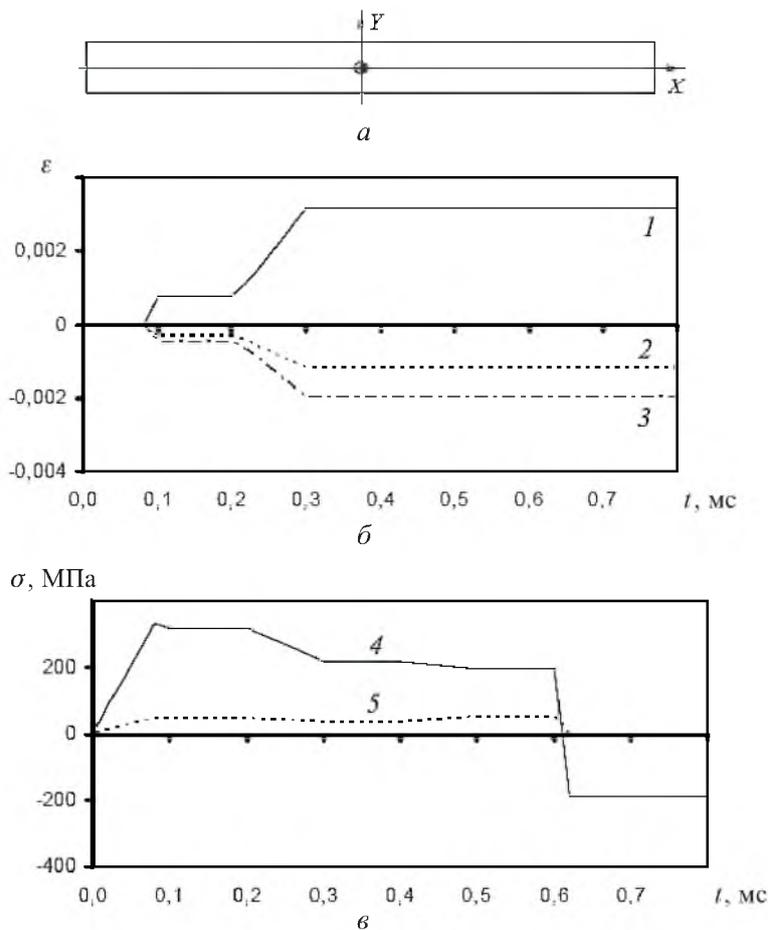


Рис. 2. Изменение во времени пластических деформаций и напряжений в полосе с отверстием при ПНС: *a* – вид полосы и ортогональных координат; *б* – деформации ϵ_y (1), ϵ_x (2) и ϵ_z (3); *в* – напряжения σ_y (4) и σ_x (5).

При выполнении расчетов принимали, что действие ИЭТ на НДС определяется только локальным повышением температуры, вызывающим объемное расширение и снижение предела текучести металла. Непосредственное (нетермическое) действие импульсного тока [1, 13] понижает уровень напряжений и увеличивает скорость пластической деформации. Следовательно, с учетом непосредственного действия тока на сопротивление металла деформированию следует ожидать, что тот же уровень неупругой деформации будет получен при меньшем повышении температуры по сравнению с рассмотренными вариантами.

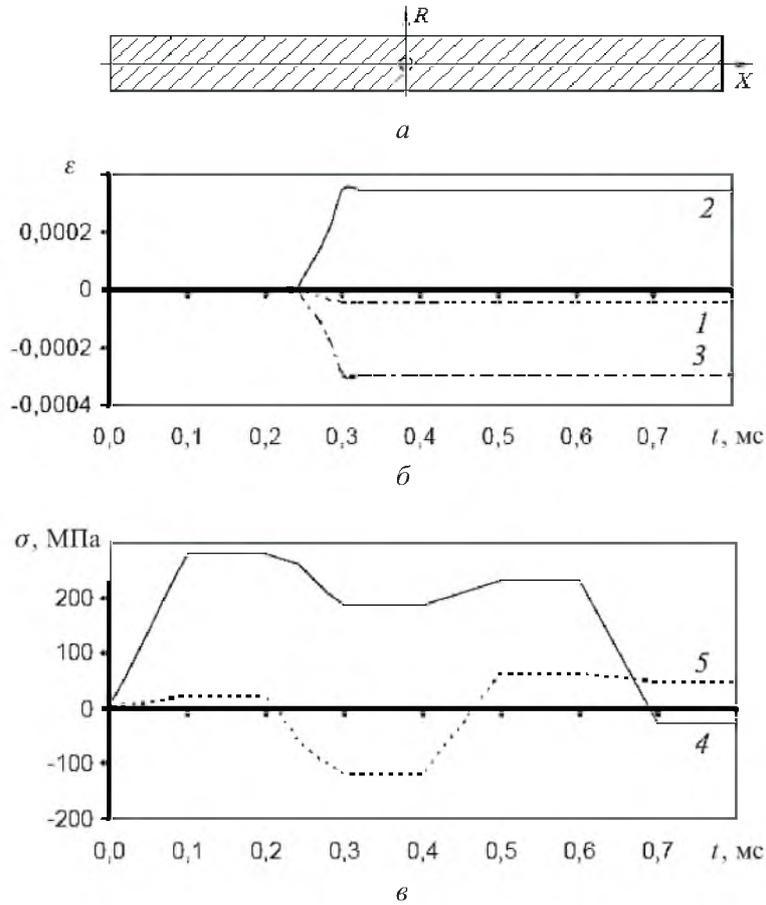


Рис. 3. Изменение во времени пластических деформаций и напряжений в стержне с полостью при растяжении: *a* – вид стержня и ортогональных координат; *б* – деформации ε_r (1), ε_x (2) и ε_φ (3); *в* – напряжения σ_x (4) и σ_φ (5).

Численное исследование влияния ИЭТ на строение металлов. Влияние ИЭТ на изменение структуры в окрестности микродефектов может быть связано как с непосредственным действием тока, так и с локальным повышением температуры и давления. В работах [14, 15] показано, что основным механизмом “залечивания” микротрещин и других дефектов кристаллической решетки является перестройка микроструктуры, сопровождающая термоактивируемые процессы движения дислокаций и точечных дефектов. Возникновение локальных областей повышенной температуры и напряженности в окрестности дефектов при действии ИЭТ стимулирует термоактивируемые процессы и аннигиляцию дефектов.

Для оценки изменений кристаллической структуры, обусловленных нагревом, в том числе в результате действия ИЭТ, и сопровождающихся “залечиванием” дефектов, можно использовать методы моделирования молекулярных систем, получившие развитие в последнее время благодаря появлению соответствующего программного обеспечения и быстродействующих персональных компьютеров. В строгом смысле применительно к металлам и

их сплавам следует говорить не о молекулярных системах, а о системах атомов, однако, следуя сложившейся традиции [16, 17], для характеристики динамики системы атомов будем использовать термин “молекулярная динамика”.

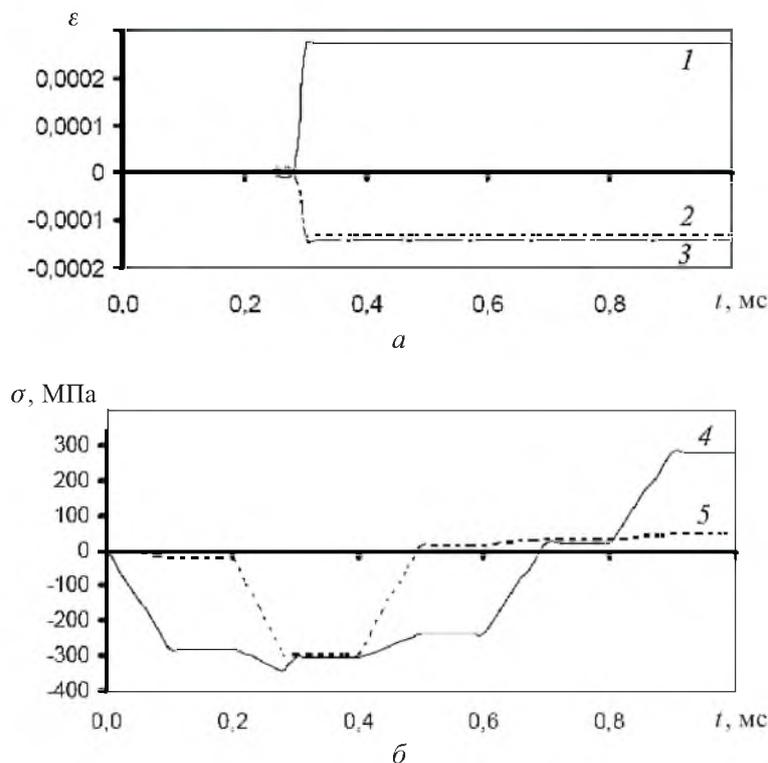


Рис. 4. Изменение во времени пластических деформаций и напряжений в стержне с порой при сжатии: а – деформации ε_r (1), ε_ϕ (2) и ε_x (3); б – напряжения σ_x (4) и σ_ϕ (5).

Для этих целей наиболее широко используются метод Монте-Карло (ММК) и метод молекулярной динамики (ММД). В первом случае структура материала формируется из исходного ансамбля атомов в результате случайных изменений расположения (координат) случайно выбранных частиц, во втором случае равновесная конфигурация системы и расположение частиц, т.е. конечная структура, определяются по результатам интегрирования уравнений движения для каждой частицы. Исходными данными для ММД являются конфигурация и состав частиц в системе, т.е. исходная структура материала, начальные скорости их движения и функции потенциальной энергии, соответствующие рассматриваемому материалу и определяющие взаимодействие между отдельными атомами ансамбля. Эти функции, зависящие от типа связи между этими элементарными частицами, определяют из анализа экспериментальных данных или данных квантово-механических расчетов. Начальные скорости атомов задаются путем установления начальной температуры материала, которая, в свою очередь, является мерой сумм кинетических энергий отдельных частиц. В результате моделирования полу-

чают траектории движения атомов как функции времени, что позволяет рассчитывать макроскопические свойства и структуру материала. Отметим, что ММД в настоящее время широко используется при исследовании строения новых материалов, а также для оценки и предсказания их статических и динамических свойств (см., например, [18, 19]).

На рис. 5 приведены результаты моделирования процесса нагрева элементарного объема железа из 468 атомов при давлении 0,1 МПа с использованием ММД. На рис. 5,а изображены проекции восьми слоев этого объема, изначально состоявшего из двух нанозерен, развернутых под углом кристаллитов, с размещенной на их границе субмикротрещиной (обведена пунктирной линией). На рис. 5,б и в представлено расположение атомов при нагреве расчетного объема до температуры соответственно 400 и 500 К через 10^{-10} с, при этом виден процесс “залечивания” субмикротрещины в результате перестройки структуры материала. Моделирование ММД в данной постановке не учитывает состава и состояния границ зерен, фактически содержащих примеси и легирующие элементы, и является только иллюстрацией процессов, вызванных повышением температуры в локальном объеме металла. Вместе с тем оно раскрывает физическую природу эффектов “залечивания”, в основе которых лежат термоактивируемые движения атомов и дислокаций, и демонстрирует влияние температуры на перестройку кристаллической структуры.

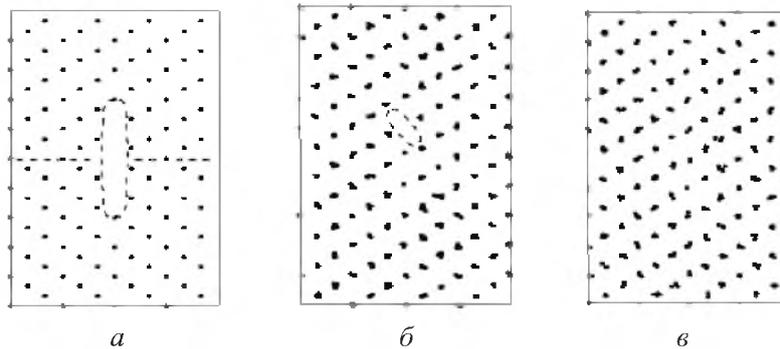


Рис. 5. Результаты моделирования ММД “залечивания” микротрещины, расположенной на границе двух нанозерен железа: а – исходная структура; б – нагрев до 400 К; в – нагрев до 500 К.

Таким образом, результаты численных расчетов показывает, что действие ИЭТ в металле с дефектами вызывает локальный рост температуры и соответствующее снижение предела текучести материала, а также его локальное объемное термическое расширение. Это сопровождается повышением объемного давления сжатия, что приводит к пластическому деформированию материала и формированию в местах нагрева областей с остаточной напряженностью. Анализ результатов также позволяет сделать вывод о том, что эффективность действия ИЭТ на материал с макродефектами может существенно повышаться при наложении растягивающей механической нагрузки вследствие возникновения локальных полей остаточных напряжений сжатия.

Наложение объемного давления сжатия и повышение температуры при действии ИЭТ существенно интенсифицируют процессы перестройки кристаллической структуры и ее стабилизацию, связанную с аннигиляцией микродефектов. Этим может быть объяснен положительный эффект обработки электрическим током деталей с одновременным нагружением сжатием, отмеченный в работе [20].

Заключение. Обработка ИЭТ нагруженной растяжением металлической полосы с острым дефектом или отверстием вызывает локальное неупругое деформирование материала вблизи этих дефектов, в результате чего возникает поле локальных остаточных напряжений сжатия, понижающих уровень максимальных напряжений при последующей растягивающей нагрузке.

Импульс электрического тока одинаковой плотности действует на стержень с малым сферическим дефектом, нагруженный растяжением, в меньшей степени, чем на полосу с отверстием при ПНС и ПДС.

Действие ИЭТ на нагруженный сжатием стержень со сферическим дефектом вызывает повышение уровня максимальных локальных напряжений у дефекта при последующем растяжении. Однако повышение уровня напряжений сжатия при нагреве материала с микродефектами стимулирует перестройку структуры и ее стабилизацию – происходит “залечивание” дефектов, как следует из результатов моделирования методом молекулярной динамики.

Конечный результат действия ИЭТ и нагрузки на материал с дефектами может определяться как полем локальных остаточных напряжений у дефектов, так и перестройкой структуры.

Задачей дальнейших исследований являются оценка и учет непосредственного (нетермического) действия электрического тока на процессы локальной пластической деформации у концентраторов и дефектов.

Исследования выполнены при поддержке European Research Office of the US Army по контракту № N62558-03-M-0809.

Резюме

Наведено результати числового моделювання напружено-деформованого стану металового тіла з дефектами типу макротріщин і пор при пропусканні імпульсного електричного струму високої густини. З використанням методу скінченних елементів досліджено кінетику локального нестационарного напружено-деформованого стану металу поблизу дефектів при дії імпульсів електричного струму і механічного навантаження. Показано, що в результаті вказаного термомеханічного впливу в околі дефектів формуються локальні області залишкової напруженості, яка має вплив на рівень максимальних напружень при наступному механічному навантаженні. Ефект можливого “заліковування” мікродефектів кристалічної решітки при локальному термомеханічному впливі проілюстровано на результатах моделювання з використанням методу молекулярної динаміки.

1. *Спицин В. Н., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – М.: Машиностроение, 1985. – 250 с.

2. Беклемишев Н. Н., Корягин Н. И., Шапиро Г. С. Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1981. – № 4. – С. 184 – 187.
3. Климов К. М., Новиков И. И. Пластическая деформация металлов в электромагнитном поле: Тез. докл. V Всесоюз. съезда по теор. и прикл. механике. – Алма-Ата: Наука, 1981. – С. 190 – 194.
4. Троицкий О. А. Технологическое применение электропластического эффекта: Тез. докл. междунар. конф. “Действие электромагнитных полей и тока на материалы” (21–24 окт. 2003). – М., 2003. – С. 3 – 6.
5. Климов К. М., Шнырев Г. Д., Новиков И. И., Исаев А. В. Электропластическая прокатка проволок в ленту микронных сечений из вольфрама и его сплавов с рением // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1975. – № 4. – С. 143 – 145.
6. Попов О. В., Власенков С. В., Соловов Е. В., Бодягин А. М. Повышение стойкости режущего инструмента обработкой мощными импульсами тока // Вестн. машиностроения. – 1998. – № 3. – С. 25 – 27.
7. Соснин О. В., Громов В. Е., Козлов Э. В. и др. Электростимулированная малоцикловая усталость. – М.: Недра коммюникейшинс ЛТД, 2000. – 207 с.
8. Stepanov G., Babutsky A., and Krushka L. Metals behavior under passage of impulse electric current // J. Phys. IV France. – 2003. – **110**. – P. 577 – 582.
9. Головин Ю. И., Киперман В. А. Концентрация электрического и теплового полей в вершине острых дефектов в металле // Физика и химия обраб. материалов. – 1980. – № 4. – С. 26 – 31.
10. Барышев Г. А., Головин Ю. И., Киперман В. А. и др. Структурные изменения в металле вблизи отверстий и включений под влиянием импульса тока // Там же. – С. 12 – 15.
11. Головин Ю. И., Финкель В. М., Слетков А. А. Образование кратера в вершине трещины под действием мощного локального электромагнитного поля // Там же. – 1977. – № 3. – С. 18 – 23.
12. Material Property Database (MPDB), MPDB v5.15 – Demo Version, JANM Software, Inc.
13. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Воздействие электрического тока на релаксацию напряжений в металле // Пробл. прочности. – 1996. – № 2. – С. 68 – 72.
14. Ларионов Л. Н. Механизм и кинетика залечивания макро- и микродефектов в металлах (обзор) // Металлофизика. – 1975. – Вып. 61. – С. 3 – 16.
15. Корнюшин Ю. В. Теория тепловых и объемных эффектов при залечивании макро- и микродефектов в металлах (обзор) // Там же. – С. 17 – 24.
16. Clark T. A. Handbook of Computational Chemistry. – New York: John Wiley & Sons, 1985. – 344 p.

17. *Leach A. R.* Molecular Modelling: Principle and Applications. – New York: Longman, 2001. – 744 p.
18. *Yamakov V., Phillpot S. R., Wolf D., and Gleiter H.* Molecular Dynamics Simulation of Nanocrystalline Pd under Stress // Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics. – Heidelberg; Berlin: Springer Verlag, 2000. – **86**. – 195 p.
19. *Hauch J. A., Holland D., Marder M. P., and Swinney H. L.* Dynamic fracture in single crystal silicon // Phys. Rev. Lett. – 1999. – **82**, No. 19. – P. 3823 – 3826.
20. *Богуслаев В. А., Долматов А. И., Жеманюк П. Д. и др.* Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов. – Запорожье, 2000. – 110 с.

Поступила 26. 04. 2004