

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.1.08

УДК 539.431, 539.434

С.А. Кузнецов, Н.Н. Беклемишев, А.А. ЗагаровскийМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия**ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛОГА ЭКВИВАЛЕНТНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА**

Развитие методов физической мезомеханики позволило предложить метод описания предельного состояния материала через универсальную характеристику – предельную плотность энергии деформации. Этот метод реализуется через введение эквивалентного напряжения, не зависящего от вида внешнего воздействия. Такой подход основан на современном понимании механизмов развития дефектной структуры как совокупности самоорганизованных и самосогласованных процессов, протекающих сразу на нескольких масштабных уровнях. Современные исследования рассматривают возможность непосредственного перехода от напряжений к плотности энергии деформации, при этом напряжение всегда выступает как усредненная по некоторому объему величина. Фактически этот подход расширяет возможности использования классического описания свойств материала. Это становится возможным благодаря физически обоснованному переходу от механики сплошной среды к физике кристаллической структуры.

Рассматривается возможность применения энергетического эквивалента предельного напряжения в нормальных условиях опыта для различных видов внешнего воздействия. В частности, делается оценка размера зоны локальной деформации, наблюдаемой при сверхмногоцикловом нагружении сплава ВТ3-1. Делается вывод об определяющем значении локализации напряжений при этом виде воздействия. Формулируется вид энергетического критерия разрушения, основанного на принципе накопления повреждений, применимого для макро- и мезомасштабного уровней описания.

Выдвигается гипотеза, что плотность энергии, соответствующая предельному напряжению, является предельной характеристикой для материала и в случае воздействия ионизирующего излучения. На основе этого предположения делается оценка радиуса деформированной области вокруг трека иона золота с энергией 1 ГэВ в сплаве ВТ3-1.

Таким образом, устанавливается связь между силовыми и энергетическими характеристиками материала с учетом детального рассмотрения механизмов эволюции дефектной структуры при конкретном внешнем воздействии. Представлено единообразное описание самоорганизованного и самосогласованного развития дефектной структуры на различных масштабных уровнях и показано, что понятие эквивалентного напряжения может быть расширено на случай разрушающего воздействия различной природы, например ионизирующего излучения.

Ключевые слова: физическая мезомеханика, синергетика, разрушающее воздействие, усталость, гигацикловое нагружение, ионизирующее излучение, радиус гало, энергетический критерий, эквивалентное напряжение, критическая энергия, поверхность излома.

S.A. Kuznetsov, N.N. Beklemishev, A.A. Zagarovsky

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

**APPLICATION OF ENERGY EQUIVALENT ANALOG EXPOSURE LIMIT
TO ASSESS THE STATE OF METAL**

The development of methods of physical mesomechanics made it possible to propose a method for describing the limiting state of a material through a universal characteristic, the limiting strain energy density. This approach is realized through the introduction of an equivalent stress that does not depend on the type of external influence. This approach is based on a modern understanding of the mechanisms of development of a defective structure as a set of self-organized and self-consistent processes occurring at once on several scale levels. Modern studies consider the possibility of a direct transition from stresses to the strain energy density, while the voltage always appears as averaged over a certain volume. In fact, this approach expands the possibilities of using the classical description of material properties. This is made possible by a physically justified transition between continuum mechanics and the physics of crystal structure.

In the present paper, the possibility of applying the energy equivalent of the limiting voltage under normal experimental conditions for various types of external action is considered. In particular, an estimate is made of the size of the local deformation zone observed in the super-multicycle loading of the VT3-1 alloy. A conclusion is drawn about the determining value of stress localization under this type of action. The form of the energy criterion of destruction, based on the principle of accumulation of damages, applicable for macro- and mesoscale levels of description is formulated.

A hypothesis is advanced that the energy density corresponding to the limiting voltage is the limiting characteristic for the material and in the case of exposure to ionizing radiation. Based on this assumption, an estimate is made of the radius of the deformed region around the track of a 1-GeV gold ion in the ВТЗ-1 alloy.

Thus, a relationship is established between the strength and energy characteristics of the material, taking into account the detailed consideration of the mechanisms of the evolution of the defect structure under a specific external influence. A uniform description of the self-organized and self-consistent development of a defective structure at various scale levels is presented and it is shown that the concept of equivalent stress can be extended to cases of destructive effects of a different nature, for example, ionizing radiation.

Keywords: physical mesomechanics, synergetics, destructive effect, fatigue, gigacycle loading, ionizing radiation, halo radius, energy criterion, equivalent stress, critical energy, fracture surface.

Введение

Развитие экспериментальных методов в области усталостного разрушения материалов требует глубокого понимания физики разрушения на всех масштабных уровнях. Введение методов физической мезомеханики, основанной на учете микроструктурных свойств материала применительно к самосогласованному развитию дефектной структуры, позволило существенно продвинуться в понимании не только особенностей разрушения, но и подхода к их описанию. В частности, такое описание должно строиться на сбалансированном рассмотрении микроструктурных свойств в контексте их проявлений на масштабе, в котором происходит эволюция дефектной структуры. Это требует понимания физики твердого тела и знания особенностей экспериментальных подходов, поскольку только такое сочетание может дать эффективные методы, объединяющие описание свойств материала на различных масштабных уровнях.

Желание максимально единообразно описать процесс разрушения в различных условиях внешнего воздействия вынуждает использовать максимально инвариантные подходы. Понимание общности физических закономерностей, определяющих самоорганизованность процессов развития дефектной структуры, определяет направление поиска этих подходов. К ним можно отнести энергетические критерии разрушения, особенно локальные. Понятия, хорошо известные в теории, зачастую сложно использовать на практике. В частности, давно известно, что локальные критерии разрушения более корректно описывают разрушение, но их использование затруднено именно отсутствием описанных выше подходов.

Такая ситуация не являлась критической до момента, когда масштаб описываемых процессов позволял использовать силовые подходы. Но для описания, например, сверхмногоциклового разрушения они оказываются не вполне пригодными. Отчасти именно эта проблема создала предпосылки и для развития физической мезомеханики, и для возобновления интереса к энергетическим критериям разрушения. В частности, установлена однозначная связь напряжений с плотностью энергии деформации.

При исследовании разрушающего воздействия ионизирующего излучения ученые столкнулись с другой проблемой. Наблюдаемые при облучении дефекты с трудом описываются на микромасштабе, так как в радиационной физике нет соответствующего аппарата и связанной с ним экспериментальной базы. При этом ввиду самосогласованности развития дефектной структуры есть основания искать связь между механическими и радиационными дефектами, что подтверждается исследованиями треков различных частиц.

Целью данной работы является попытка единообразного описания развития дефектной структуры при сверхмногоцикловом нагружении и воздействии ионизирующего излучения на основе энергетического подхода. В качестве предельной плотности энергии использован эквивалент напряжения разрыва в нормальных условиях опыта. На основе анализа экспериментальных данных по сверхмногоцикловому нагружению образцов сплава ВТЗ-1 установлена доля поверхности излома, затронутая локальной пластической деформацией. Показано, что неоднородная локализация энергии на мезоскопическом масштабном уровне может быть причиной специфического механизма разрушения, наблюдаемого в эксперименте, при среднем уровне значений напряжения, соответствующем макроскопически упругому процессу. На основе того же подхода описано накопление дефектов в треках ионов высоких энергий. Предложен способ

оценки радиуса поврежденной области при ионизирующем воздействии на основе максимальной плотности энергии.

Синергетические методы физической мезомеханики и эквивалентное воздействие

Синергетический подход к описанию процессов накопления повреждений в материале при внешнем воздействии выделяет локальные процессы эволюции микроструктуры при зарождении и развитии повреждений как доминирующие [1]. Физическая мезомеханика рассматривает развитие дефектной структуры при внешнем воздействии как каскад самоорганизованных и самосогласованных процессов накопления энергии на разных масштабных уровнях [2–7]. Для единообразного описания процессов, реализуемых одновременно на нескольких масштабных уровнях (мезоскопический масштаб), удобно использовать энергетический формализм, обладающий инвариантностью к этим уровням. Процессы эволюции не возникают в металле в зависимости от способа подвода энергии, а реализуются при любом внешнем воздействии на том или ином масштабном уровне по мере увеличения объема, в котором поглощается подводимая энергия [6]. По мере увеличения масштаба происходит усложнение процесса накопления энергии для сохранения устойчивости (целостности) металла, что связано с увеличением объема ΔV , в пределах которого накапливается энергия ΔW [7].

В условиях циклического нагружения долговечность является характеристикой реакции материала на многопараметрическое воздействие, которая определяет уровень вносимой в каждом цикле нагружения энергии деформации на каждом масштабном уровне. Плотность энергии в цикле нагружения, определяемая по диаграмме растяжения на макромасштабном уровне, не характеризует долговечность металла в области многоциклового усталости [2]. Физическая мезомеханика связывает это с тем, что распределение подводимой энергии внутри деформируемого объема существенно неоднородно, что приводит к локальным микроструктурным изменениям, описание которых невозможно в формализме механики сплошной среды [1]. Таким образом, в выбранном объеме одинаковому макроскопическому напряжению может соответствовать множество различных комбинаций локальных напряжений, определяемых микроструктурой материала.

Предложенное в статье [2] единообразное описание материала на основе значений о плотности энергии деформации [8, 9] и разрушения [10] основано на представлении, что при заданном уровне деформации ε_j в единичном деформированном объеме плотность энергии деформации материала определяется эквивалентным напряжением σ_e :

$$\left(\frac{dW}{dV} \right)_{\varepsilon} = \sigma_e. \quad (1)$$

Само эквивалентное напряжение σ_e определяется следующим образом:

$$\sigma_e = \sigma_1 F[f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_i)],$$

где σ_1 – напряжение одноосного растяжения в стандартных условиях опыта, $F[f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_i)]$ – поправочная функция на влияние параметров нагружения.

Таким образом, уровень эквивалентного напряжения при фиксированной деформации представляет собой среднюю плотность энергии в единице объема материала, затраченную на создание соответствующей деформации. Критерием эквивалентности в этом случае является достижение определенного уровня деформации в рассматриваемом объеме материала независимо от того, при каких условиях и сочетании параметров оно было достигнуто [2].

Введенное представление ограничивается случаями, когда эквивалентное напряжение является энергетической, а не силовой характеристикой материала [2]. В частности, эквивалент-

ный подход, описанный выше, может быть распространен на все процессы дефектообразования, для которых применим энергетический подход, т.е. отсутствуют силы, определяющие разрушение на макроскопическом масштабном уровне.

В случае сверхмногоциклового нагружения это условие определено выполняется, так как с силовой точки зрения внешнее воздействие является упругим и с точки зрения макроскопического подхода не должно приводить к разрушению, наблюдаемому экспериментально. Представление о локальности процесса разрушения позволяет объяснить это явление и создает предпосылки для более детального развития именно локальных подходов к описанию разрушения. Сам по себе локальный подход не является новым, энергетические критерии описаны и изучены довольно давно [11], но их практическое применение осложнено отсутствием соответствующих критериев разрушения, требующих исследования микроструктурных особенностей материала в контексте макроскопического опыта. Это во многом связано с тем, что до недавнего времени не было возможности выделить локальные механизмы разрушения среди более грубых механизмов, захватывающих больший объем материала, что наблюдается при высоких уровнях значений макроскопического напряжения. Экспериментальные исследования сверхмногоциклового усталостного разрушения, происходящего при уровне значений напряжения ниже предела текучести, выделяют именно локальные процессы на микро- и мезомасштабном уровнях как ключевые, определяющие разрушение. Таким образом, методология определения критериев разрушения, традиционно применяемая для макроскопических случаев, основанная на исследовании поведения материала при различных сочетаниях макроскопических параметров нагружения, применима к низкоамплитудному нагружению с существенными оговорками. Это приводит к значительному (до трех порядков) разбросу прогнозируемой долговечности при сверхмногоцикловом нагружении.

Тем не менее представление об эквивалентном напряжении, описанное выше, создает предпосылки для использования основных макроскопических характеристик материала, таких как параметры разрушения при однократном растяжении. Использование этих характеристик было бы весьма удобно с учетом их проверенной временем корректности и простоты понимания. При этом основная сложность их использования заключается в корректной адаптации к условиям внешнего воздействия, которая возможна только на основе понимания физических процессов, определяющих разрушение.

Экспериментальное исследование образцов сплава ВТЗ-1 в условиях сверхмногоциклового нагружения

Исследования поведения металлов при сверхмногоцикловом нагружении показали, что, несмотря на то, что с макроскопической точки зрения деформация происходит в пределах упругости, внутри материала происходит накопление дефектов, приводящее к разрушению. Анализ поверхностей излома показал, что разрушение инициируется преимущественно в объеме материала и от единичных концентраторов, которыми служат локальные неоднородности микроструктуры [12]. Это явление согласуется с представлениями физической мезомеханики о неоднородном распределении напряжений в объеме материала и ключевой роли локальности процесса накопления повреждений.

Для оценки критической удельной энергии дефектообразования сплава ВТЗ-1 выбрано экспериментальное исследование при высокочастотном низкоамплитудном воздействии [12]. Частота нагружения, подобранная с учетом резонансных эффектов, составила 20 кГц.

С помощью пакета ANSYS проведен предварительный расчет значений напряжения в корсетной области. На рис. 1 представлена численная модель образца с распределением напряжений, рассчитанным для условий эксперимента. Как видно из рис. 1, максимальное напряжение локализуется в середине корсетной части образца. За счет калибровки устанавливается однозначная связь между величиной напряжения, подаваемого на кристалл пьезоэлектриче-

ского преобразователя, и амплитудой вибраций, определяющих величину смещений. В рамках данной работы распределение макроскопического напряжения в рабочей части образца считалось однородным и для исследуемого титанового сплава ВТ3-1 составило 14,91 МПа, что соответствует смещению в 1 мкм.

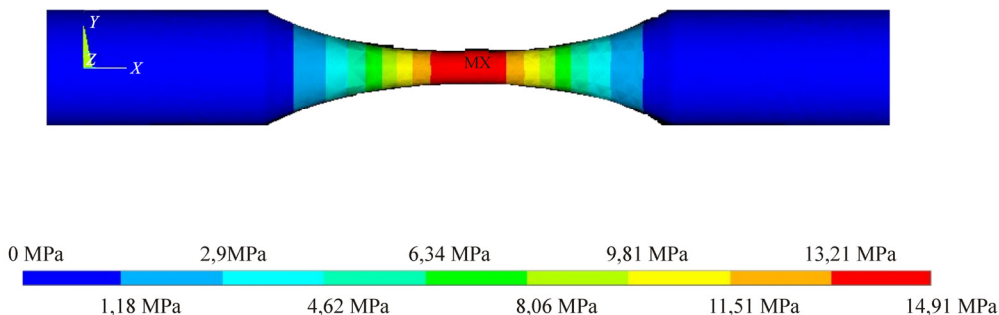


Рис. 1. Результат гармонического анализа образца из титанового сплава ВТ3-1 (амплитуда смещений в корсетной части ~1 мкм)

Методика проведения описанных экспериментов в условиях СВМУ предполагает проведение замеров деформации с точностью 0,1 мкм на базе 4 мм при диаметре образца в 3 мм. В области максимальных значений напряжения происходит локализация энергии деформации, что обуславливает разрушение образца. Во всех опытах, в которых наблюдалось разрушение, оно происходило именно в этой зоне [12]. Испытания проводились в соответствии со стандартом ASTM, использующим адаптивный подход для оптимизации количества экспериментов. Испытано 18 образцов. Результаты представлены на рис. 2.

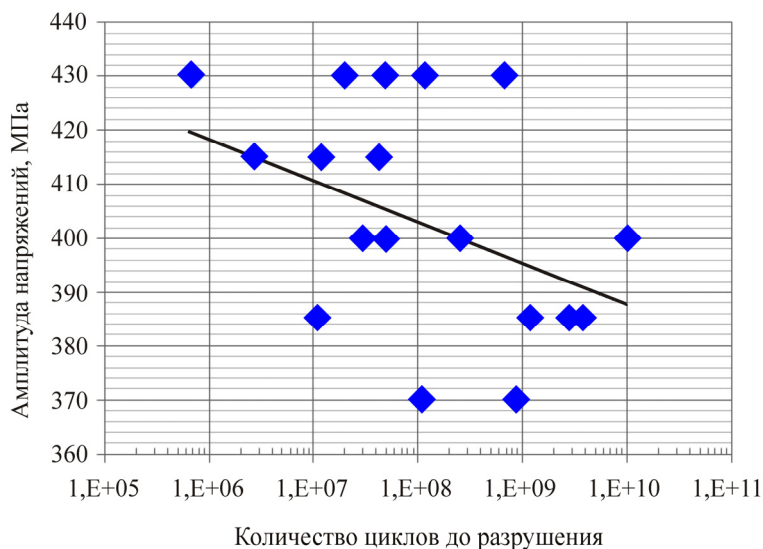


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования долговечности сплава ВТ3-1 при низкоамплитудном нагружении с частотой 20 кГц

На основании соответствия амплитуды эквивалентного напряжения плотности энергии деформации (1) перестроим представленный на рис. 2 график в график зависимости энергии разрушения от количества циклов нагружения (рис. 3). Он построен в предположении равномерного распределения напряжений по объему V_f .

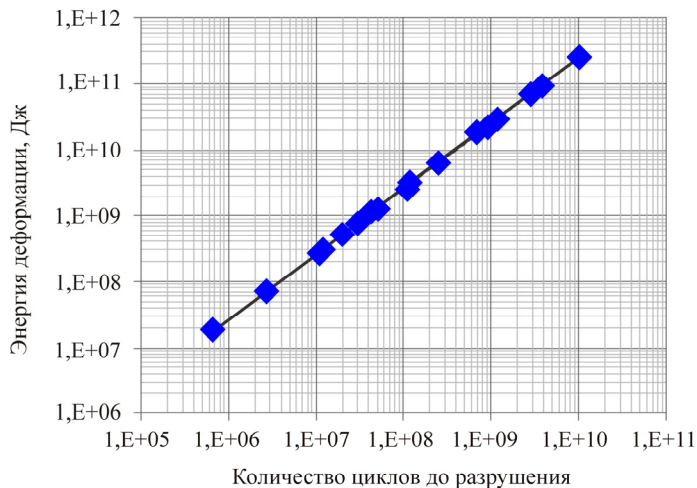


Рис. 3. Значения энергии деформации в объеме V_f для испытанных образцов ВТЗ-1 за цикл и весь период нагружения

Анализ поверхности изломов испытанных образцов показывает, что плоскость разрушения всегда проходит через концентратор, вокруг которого формируется структура, называемая fish-eye [13]. Иными словами, энергия внешнего воздействия локализуется в области концентраторов, что определяет локальную неоднородность ее диссипации, а это, в свою очередь, приводит к развитию дефектов вокруг имеющихся неоднородностей структуры. Самоорганизованность процесса диссипации энергии автоматически выделяет из всех имеющихся неоднородностей наиболее активный концентратор, влияние которого быстро усиливается, а это приводит к еще большему усилению его влияния.

С ростом неоднородности увеличивается объем локальной пластической зоны и скорость захвата нового объема за счет увеличения локальных напряжений, вызванных ростом объема. При достижении локальных напряжений определенного порога происходит смена механизма и выход разрушения на новый масштабный уровень в соответствии с иерархией. Фактически это означает потерю устойчивости и мгновенное (по отношению ко всему времени нагружения) разрушение образца. Весь этот процесс происходит при среднем уровне значений макроскопического напряжения, не превышающих порог текучести.

При этом очевидно, что единицей объема материала посредством механизма пластической деформации, в том числе локальной, может быть поглощено ограниченное количество энергии, конкретное значение которой является характеристикой этого материала и определяется его микроструктурными свойствами. С учетом описанной выше связи напряжения с плотностью энергии это значит, что и локальные напряжения имеют предел, также являющийся характеристикой материала. Логично предположить, что с учетом введенного понятия эквивалентности значение этого напряжения не будет зависеть от масштаба, если будет учтена его локализация, а не среднее значение. Иными словами, диаграмма растяжения, построенная в стандартных условиях опыта, может быть использована в еще более широкой области, чем предложено в работе [2].

Проведем оценку доли сечения, в котором может быть достигнуто предельное напряжение при сохранении среднего значения. В качестве предельного напряжения используем предел прочности, составляющий для рассматриваемого сплава $\sigma_2 \approx 1200$ МПа. Во всем сечении образца S_1 среднее напряжение $\sigma_1 = 1200$ МПа. Энергия, сосредоточенная в объеме локальной деформируемой области V_2 ,

$$E' = \sigma_2 V_2 = \sigma_2 S_2 h,$$

где h – толщина рассматриваемого слоя с дефектом.

Будем рассматривать такую же высоту всего образца, тогда определяющим будет соотношение площадей, наблюдаемое в эксперименте. Средняя плотность энергии в объеме $V_1 = S_1 h$ должна составить σ_1 . Тогда площадь пластической деформации

$$S_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} S_1 \approx \frac{1}{3} S_1.$$

Анализ размера областей, подверженных пластической деформации, по поверхности изломов испытанных образцов показывает корректность приведенной оценки (рис. 4).

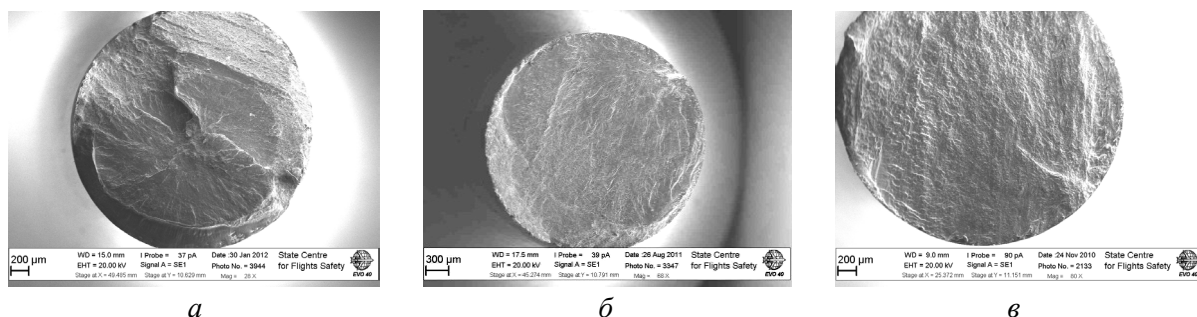


Рис. 4. Пример изломов разрушенного образца сплава ВТЗ-1: *а* – амплитуда нагружения 430 МПа, количество циклов до разрушения $1,183 \times 10^8$; *б* – амплитуда нагружения 400 МПа, количество циклов до разрушения $2,975 \times 10^7$; *в* – амплитуда нагружения 370 МПа, количество циклов до разрушения $8,86 \times 10^8$

На основе представленного подхода может быть построен интегральный критерий разрушения, основанный на принципе накопления повреждений. Общий вид такого критерия следующий:

$$I = \frac{1}{E^*} \int_0^{N^*} E(n) dn \leq 1,$$

где $E(n)$ – энергия, накопленная на n -м цикле нагружения; E^* – критическая энергия, при которой происходит разрушение; N^* – соответствующее количество циклов до разрушения.

Критическая энергия может быть выражена как через локальные напряжения, так и через средние:

$$E^* = \sigma_1 V_f = \sigma_2 V_l,$$

где V_l – объем областей локальной пластической деформации.

Эквивалентное ионизирующее излучение

За последние годы проведено много исследований по выяснению влияния высокой плотности электронных возбуждений на генерацию дефектов структуры в металлах или трансформацию дефектов, созданных за счет упругих столкновений налетающих ионов с атомами мишени. Релаксация сильных электронных возбуждений, вызванных облучением материала ионами высоких энергий – главный фактор, который определяет природу трековой области. В ряде работ установлено, что электронные возбуждения высокой плотности вызывают образование дефектов в некоторых кристаллических металлах [14]. Для металлов, облученных тяжелыми ионами, могут быть характерны значительные различия в дефектообразовании. Так, в работах [15, 16] сообщается о фазовом превращении в облученных титановых мишенях с переходом от гексагональной плотно упакованной (ГПУ) α -фазы Ti к гексагональной α -фазе, которая обычно получается при высоких значениях давления. Плотность выделенной энергии соотно-

сится с максимальным пробегом возбуждаемых δ -электронов. Во всех случаях характерное время остывания электронов возбужденной области металла вследствие электронной теплопроводности оценивается в 10^{-15} с, что на несколько порядков меньше характерного времени образования фононов. Это означает, что с точки зрения материала как целого прохождение ионов происходит мгновенно. Акустические импульсы, возбуждаемые частицами, стимулируют перестройку кристаллической решетки. Они могут уносить из возбужденной области до 30–40 % полной выделенной энергии и проявляться на значительных расстояниях от траектории иона [14].

Несмотря на то, что создание дефектов за счет электронных возбуждений в массивных металлических образцах до недавнего времени считалось нереалистичным [14], методы численного моделирования прохождения заряженных частиц через вещество хорошо развиты и учитывают это явление в неявном виде. Благодаря этому предполагается возможным оценить плотность энергии образования микроструктурных дефектов при воздействии ионов высоких энергий. С учетом того, что с точки зрения синергетики и физической мезомеханики эволюция дефектной структуры есть самоорганизованный и самосогласованный процесс усвоения материалом подводимой энергии с помощью присущих ему механизмов, предельная плотность энергии, накопленной единицей объема материала, является его характеристикой на выделенном масштабном уровне. Исходя из этого рассчитанная плотность энергии может быть соотнесена с плотностью энергии при механическом воздействии.

Титан и сплавы на его основе обладают высокой эффективностью дефектообразования, связанного с релаксацией электронных возбуждений, при облучении ионами высоких энергий [14]. Это позволяет предполагать корректность подхода для сплава ВТ3-1.

В области диссипации энергии электронных возбуждений, инициированных прохождением иона, происходят процессы перестройки кристаллической структуры материала. Эти процессы носят диссипативный характер, так как являются процессом релаксации электронной подсистемы, в которую передается большая часть энергии тормозящегося иона. Модельно процесс релаксации, как правило, описывается в приближении двух температур – электронной и ионной подсистем. Для оценки процессов передачи энергии от электронов к решетке и диссипации локальной запасенной решеточной энергии обычно используют подход, учитывающий электрон-электронные и электрон-фононные взаимодействия [17].

Отметим, что и в этом случае диссипация энергии является самосогласованным и самоорганизованным процессом, поэтому ее усвоение будет происходить посредством механизмов, характерных для данного материала. Выделяя процессы, связанные с реструктуризацией кристаллической решетки материала, можно оценить соответствующую удельную энергию этих процессов для микро- и мезоскопических масштабов. Детальное представление о морфологии облученной области может позволить оценивать энергию образования и развития отдельных видов дефектов.

Плотность энергии, выделяемая в трековую область при прохождении иона, зависит от свойств материала, вида и энергии иона. Для тяжелых ионов высокой энергии более 98 % энергии поглощается электронной подсистемой с последующей релаксацией. Особенности этого процесса определяются свойствами материала. Одной из наиболее распространенных моделей является модель термической вспышки. Создаваемые при этом дефекты на практике обнаруживаются травлением. Их радиус составляет десятки нанометров. Таким способом выделяется лишь область аморфизации, причем, как правило, в поверхностном слое.

При исследовании радиуса трека в глубине материала возникают сложности, так как это требует снятия поверхностных слоев, которое приводит к нарушению структуры материала. Тем не менее установлено [14], что дефекты мезоскопического масштаба обнаруживаются в значительном удалении от трека. Одним из механизмов вывода энергии из области облучения считается акустическая эмиссия. С учетом того, что плотность энергии таких дефектов ограничена, как показано выше, можно оценить минимальный радиус гало в предположении, что вся

энергия иона идет на образование только мезоскопических дефектов структуры, аналогичных локальной пластической деформации.

Приведем оценку радиуса трека иона золота с энергией 1 ГэВ в сплаве ВТЗ-1, основанную на предположении, что энергия в трековой области распределена равномерно и имеет предел, характеризующийся плотностью энергии, которая соответствует пределу кратковременной прочности при механическом воздействии (в нормальных условиях опыта):

$$\sigma_2 = J_{\text{ion}} = \frac{E_{\text{ion}}}{V_{\text{tr}}},$$

где J_{ion} – плотность энергии в треке; E_{ion} – энергия иона; V_{tr} – объем трековой области.

$$V_{\text{tr}} = \pi R^2 L,$$

где R – радиус гало трека; L – длина пробега иона.

Тогда для радиуса гало трека получим выражение

$$R = \sqrt{E_{\text{ion}} / \pi L \sigma_2}.$$

Длина пробега иона определяется с помощью численного моделирования в пакете TRIM (<http://www.srim.org/>). Для указанных параметров иона она составляет в среднем 36 мкм. Тогда радиус трека иона золота с энергией 1 ГэВ в сплаве ВТЗ-1 составит 350 нм.

Такой подход может быть использован для материалов, склонных к образованию рассматриваемого типа дефектов. Для более точной оценки радиуса деформированной области вокруг трека необходимо учитывать долю энергии иона, за счет которой она образуется.

Описанный выше подход может быть использован и в другом направлении. Оценка предельной плотности энергии в треке может быть интерпретирована как эквивалентное напряжение (1), что позволит оценивать макроскопические свойства материала на основе моделирования микроскопических процессов. Это требует развития экспериментальных и численных методов исследования дефектообразования при воздействии ионизирующего излучения.

Заключение

В работе представлено единообразное описание самоорганизованного и самосогласованного развития дефектной структуры на различных масштабных уровнях и показано, что понятие эквивалентного напряжения (1) может быть расширено на случай разрушающего воздействия различной природы, например ионизирующего излучения. Этот подход основан на понимании напряжения как плотности энергии деформации, что позволяет преодолеть ограничения масштабных уровней. При этом требуется глубокое понимание физики конкретного процесса, так как усреднение напряжения по физически неоднородным объемам может приводить к принципиальным ошибкам в описании и оценках.

Плотность энергии деформации имеет естественный предел, являющийся характеристикой материала. Напряжение же такого предела не имеет. Тем не менее проведение опытов на разрыв в нормальных условиях выявляет для каждого материала свое предельное значение напряжения, после которого происходит разрушение. Именно этому напряжению должно соответствовать значение предельной плотности энергии разрушения, так как в нормальных условиях опыта достигается максимально равномерное распределение напряжения (а значит, и плотности энергии) по сечению образца.

На основе предложенного подхода в работе оценен размер области локализации дефектной структуры в образце сплава ВТЗ-1 при сверхмногоцикловом нагружении. Получено, что при локализации критического напряжения, соответствующего максимальной плотности энергии деформации, в области, примерно втрое меньшей сечения образца, среднее значение на-

пряжения (средней энергии деформации) будет совпадать со средним значением, реализуемым в эксперименте. Анализ поверхности изломов испытанных образцов подтверждает такую оценку. Представлен вид критерия разрушения, применимого для макро- и мезомасштабного уровней описания.

С помощью представления предельной плотности энергии деформации как характеристики материала оценен радиус гало трека иона золота в сплаве ВТЗ-1. Предполагалось, что вся энергия иона самоорганизованно усваивается в некоторой области вокруг трека. Считалось, что плотность энергии, сконцентрированной в гало, ограничена тем же пределом, что при механическом воздействии. Полученная оценка согласуется с модельными представлениями и экспериментальными наблюдениями. Представленная методика является перспективным способом оценки размера области разрушения и расчета характеристики материала – предельной плотности энергии локальной деформации, которой соответствует эквивалентное напряжение.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10376).

Список литературы

1. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3, № 6. – С. 5–36.
2. Шанявский А.А. Эквивалентное напряжение одноосного циклического растяжения как энергетическая характеристика усталости металла в условиях многопараметрического нагружения // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 33–42.
3. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1990. – 229 с.
4. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 289 с.
5. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. – Уфа: Монография, 2007. – 495 с.
6. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Эффект каналирования пластических сдвигов и нелинейные волны локализованной пластической деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 7–26.
7. Пластическая дисторсия – фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин, А.Г. Чернявский // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 31–46.
8. Sih G.C., Tang X.S. Scaling of volume energy density function reflecting damage by singularities at macro-, meso- and microscopic level // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2005. – P. 211–231.
9. Some advantages derived from the use of the strain energy density over a control volume in fatigue strength assessments of welded joints / P. Lazzarin, F. Berto, F.J. Gomez, M. Zappalorto // International Journal of Fatigue. – 2008. – P. 1345–1357.
10. Shanyavskiy A.A. Synergetical models of fatigue-surface appearance in metals: The scale levels of self-organization, the rotation effects, and density of fracture energy // PROBAMAT-21st Century: Probabilities and Materials / ed. by K. Franzisconys. – Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1998. – P. 11–44.
11. Плювинаж Г. Механика упругопластического разрушения. – М.: Мир, 1993. – 450 с.
12. Nikitin A.D., Palin-Luc. T., Shanyavskiy A.A. Crack initiation in VHCF regime on forged titanium alloy under tensile and torsion loading modes // International Journal of Fatigue. – 2016. – P. 318–325.
13. Sakai T., Sato Y., Oguma N. Characteristic SS–NN properties of high-carbon-chromium-bearing steel under axial loading in long-life fatigue // Fatigue and Fracture of Engineering Materials Structures. – 2002. – P. 765–773.
14. Комаров Ф.Ф. Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при облучении ионами сверхвысоких энергий. – М., 2003. – Т. 173. – С. 1287–1318.
15. Dammak H., Dunlop A., Lesueur D. Nucl. Instrum. Meth. B107. – 1996. – 204 p.
16. Dunlop A., Lesueur D. Radiat. Eff Defects Solids. – 1993. – 123 p.
17. Лифшиц И.М., Каганов М.И., Танатаров Л.В. Атомная энергия. – 1959. – Т. 6. – 391 с.

References

1. Panin V.E. Sinergeticheskie printsipy fizicheskoi mezomekhaniki [Synergetic principles of physical mesomechanics]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2000, vol. 3, no. 6, pp. 5–36.
2. Shaniavskii A.A. Ekvivalentnoe napriazhenie odnoosnogo tsiklicheskogo rastiazheniia kak energeticheskaya kharakteristika ustalosti metalla v usloviakh mnogoparametricheskogo nagruzheniia [The equivalent tension of monoaxial cyclic stretching as the power characteristic of fatigue of metal in the conditions of multiple parameter loading]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 33–42.
3. Panin B.E., Likhachev B.A., Griniaev Iu.V. Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel [Structural levels of deformation of solid bodies]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 229 p.
4. Ivanova B.C. Sinergetika. Prochnost' i razrushenie metallicheskikh materialov [Strength and fracture of metallic materials]. Moscow: Nauka, 1992, 289 p.
5. Shaniavskii A.A. Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov. Sinergetika v aviatsii [Modeling of fatigue fractures of metals. Synergetics in Aviation]. Ufa: Monografiia, 2007, 495 p.
6. Panin B.E., Egorushkin B.E., Panin A.B. Effekt kanalirovaniia plasticheskikh sdvigo v i ne-lineinye volny lokalizovannoi plasticheskoi deformatsii i razrusheniia [Effect of channeling of plastic shifts and nonlinear waves of the localized plastic deformation and destruction]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2010, vol. 13, no. 5, pp. 7–26.
7. Panin B.E., Egorushkin B.E., Panin A.B., Cherniavskii A.G. Plasticheskaya distorsiiia – fundamentalnyi mekhanizm v nelineinoy mezomekhanike plasticheskoi deformatsii i razrusheniia tverdykh tel [Plastic distortion is a fundamental mechanism in the nonlinear mesomechanics of plastic deformation and destruction of solids]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 31–46.
8. Sih G.C., Tang X.S. Scaling of volume energy density function reflecting damage by singularities at macro-, meso- and microscopic level. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005, pp. 211–231.
9. Lazzarin P., Berto F., Gomez F.J., Zappalorto M. Some advantages derived from the use of the strain energy density over a control volume in fatigue strength assessments of welded joints. *International Journal of Fatigue*, 2008, pp. 1345–1357.
10. Shanyavskiy A.A. Synergetical models of fatigue-surface appearance in metals: The scale levels of self-organization, the rotation effects, and density of fracture energy. *PROBAMAT-21st Century: Probabilities and Materials*. Ed. K. Franzisconys. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1998, pp. 11–44.
11. Pliuvinazh G. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniia [Mechanics of elasto-plastic destruction]. Moscow: Mir, 1993, 450 p.
12. Nikitin A.D., Palin-Luc. T., Shanyavskiy A.A. Crack initiation in VHCF regime on forged titanium alloy under tensile and torsion loading modes. *International Journal of Fatigue*, 2016, pp. 318–325.
13. Sakai T., Sato Y., Oguma N. Characteristic SS–NN properties of high-carbon-chromium-bearing steel under axial loading in long-life fatigue. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials Structures*, 2002, pp. 765–773.
14. Komarov F.F. Defektoobrazovanie i trekoobrazovanie v tverdykh telakh pri obluchenii ionami sverkhvysokikh energii [Defect formation and trekoobrazovaniye in solid bodies at radiation by ions of ultrahigh energy]. Moscow, 2003, vol. 173, pp. 1287–1318.
15. Dammak H., Dunlop A., Lesueur D. Nucl. Instrum. Meth. B107, 1996, 204 p.
16. Dunlop A., Lesueur D. Radiat. Eff Defects Solids, 1993, 123 p.
17. Lifshits I.M., Kaganov M.I., Tanatarov L.B. Atomnaya energiya [Atomic energy], 1959, vol. 6, 391 p.

Получено 20.02.2018

Об авторах

Кузнецов Сергей Алексеевич (Москва, Россия) – инженер кафедры физики конструкционных материалов Московского авиационного института (национального исследовательского университета); e-mail: kuznetsov_s_a@mail.ru.

Беклемишев Нил Нилович (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики конструкционных материалов Московского авиационного института (национального исследовательского университета); e-mail: nnbeklem@mat.i.ru.

Загаровский Андрей Александрович (Москва, Россия) – аспирант кафедры физики конструкционных материалов Московского авиационного института (национального исследовательского университета); e-mail: zagarovskiy93@mail.ru.

About the authors

Sergey A. Kuznetsov (Moscow, Russian Federation) – Engineer of Laboratory, Department of Physics of Structural Material, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: kuznetsov_s_a@mail.ru.

Nil N. Beklemishev (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department of Physics of Structural Material, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: nmbeklem@mat.i.ru.

Andrey A. Zagarovskiy (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Physics of Structural Material, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: zagarovskiy93@mail.ru.