

УДК 621.017.11

Ю.Г. Кабалдин

КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан электронно-дислокационный механизм деформации и трещинообразования твердых тел при усталостном нагружении как результат динамического возбуждения атомов, образование волн смещения, перестройки их электронной структуры в локальных циклически деформируемых объемах кристаллической решетки, а также структурных изменений как в дефектной, так и электронной подсистемах с образованием атомных и дислокационных нанокластеров (квантовых систем) и последующего их согласованного (кооперативного) взаимодействия, вследствие нелокального обмена информацией между ними, с образованием микро-трещин.

Ключевые слова: усталостные испытания, нанокластеры, микротрещины.

В настоящее время существуют различные взгляды [1–7] на механизмы образования микротрещин при усталостном нагружении. В ряде работ [1–4, 6] образование микротрещин рассматривается с позиции теории синергетики [8–11] как неравновесный фазовый переход с образованием диссипативных структур в результате самоорганизации.

Согласно [6], дислокации являются линейными дефектами структуры материалов на наноуровне, определяющими на микроуровне при совместном взаимодействии с вакансиями, устойчивость системы к сдвигу в условиях повышенного в системе уровня запасенной упругой энергии. *При достижении в объеме критического уровня запасенной энергии происходит неравновесный фазовый переход с самоорганизацией в разреженной объемной среде фрактальных поверхностных объектов в виде субграниц.*

Представляет интерес выявление механизма зарождения микротрещин в зонах локализации деформации в результате структурных изменений как в дефектной, так и в электронной подсистеме. *В связи с этим, нами высказано предположение, что носителями деформации в кристаллической решетке при усталостных испытаниях могут являться не только дислокации или дисклинации, но и волны смещения, появляющиеся в ней из-за колебания атомов при растяжении либо сжатии цепочки атомов. В результате при усталостном нагружении в циклически деформируемых объемах, где происходит локализация деформации, протекают сложные структурные переходы, существенно определяющие как зарождение микротрещин, так и их перерастание в макротрещины.*

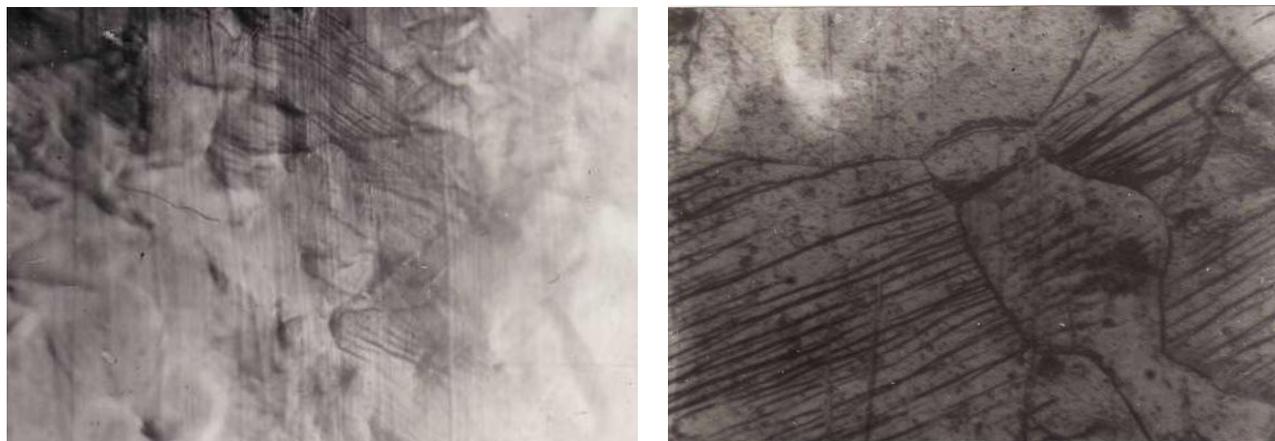
Исследования механизмов структурообразования при усталостном нагружении проводили на установке, описанной в работе [7]. В процессе испытаний проводили регистрацию сигналов акустической эмиссии (АЭ). Далее сигналы АЭ подвергались анализу с определением D_F – фрактальной размерности и H – информационной энтропии Шеннона [8].

Электронно-микроскопические исследования тонких фольг выполнялись с использование просвечивающего электронного микроскопа JEM-7A. Исследовались образцы из стали 20 после их усталостного нагружения. Исследования повреждаемости поверхностных слоев в виде полос скольжения и микротрещин осуществлялись на растровом электронном микроскопе JSM-3U при различных циклах нагружения.

На рис. 1 представлены микрофотографии структурных изменений стали 20 на макро- и микроуровнях. На рис. 1, а видно, что на начальных стадиях циклического упрочнения материалов образуется специфический рельеф в виде впадин и выпуклостей.

По мере увеличения числа циклов нагружения в благоприятно ориентированных зернах феррита формируются линии скольжения, а затем устойчивые полосы скольжения и микротрещины (рис. 1, б). При электронно-микроскопическом исследовании установлено,

что циклическом нагружении образование дислокаций сосредоточено вблизи границ ферритных зерен. Их формирование происходит уже на стадии микротекучести. По мере возрастания числа циклов нагружения в ферритных зернах на стадии деформационного упрочнения образуется хаотическая, а затем ячеистая дислокационная структуры (рис. 2).



а)

б)

Рис. 1. Микрофотографии, иллюстрирующие процессы деформации при циклическом нагружении образцов из стали 20:

а – преимущественная деформация в приграничных объемах (x450);

б – устойчивые полосы скольжения (x450)

При анализе сигналов АЭ установлено [7], что с ростом числа циклов нагружения увеличивается как информационная энтропия, так и D_F – фрактальная размерность. Значения D_F находились в интервале от $D_F \geq 1$ до $D_F \leq 3$. Рост фрактальной размерности свидетельствует также о том, что в дефектной подсистеме происходит не только периодическая временная, но и периодическая пространственная организация дислокаций из-за роста степеней свободы.

На основе выполненных исследований разработан механизм структурообразования в дефектной подсистеме и возникновение коллективных эффектов. Его суть заключается в следующем. При образовании дислокации создается локальное внутреннее напряжение, и она излучает сигнал (он регистрируется как сигнал АЭ), т.е. передает определенную информацию, которая суммируется при образовании других дислокаций. В итоге формируется внутреннее механическое поле за счет сильного согласованного взаимодействия дислокаций, которое при их плотности $\rho \sim \rho_{\text{крит}}$, т.е. при критических параметрах в подсистеме обеспечивает коллективные эффекты.

В работе [9] указывается, что реакция системы дислокаций на внешнее воздействие определяется не столько индивидуальными свойствами дефекта, сколько солитонными свойствами ансамбля в целом. Иными словами, дислокацию можно представить как солитон, обладающего волновым пакетом с длиной волны λ . Солитонными свойствами, по-видимому, обладает каждая дислокация, однако солитонные свойства дислокации в большей степени проявляются при их кооперативном взаимодействии. Тем самым, волновой пакет является характеристикой как отдельной дислокации, так и их ансамбля. Поэтому энергию поступательного движения дислокации (ансамбля) можно описать солитонным уравнением.

Согласно теории синергетики [8, 10, 11], дефектная подсистема является термодинамически неустойчивой, нелинейной подсистемой, что обуславливает в ней периодическое хаотическое состояние и структурные переходы в более устойчивое состояние с нарушением симметрии и разрушением прежних когерентных структур. Способность дефектной подсистемы осуществлять структурные превращения свидетельствует о том, что она обладает памятью, т.е. вновь образованные структуры помнят о прежнем структурном состоянии.



Рис. 2. Электронная микрофотография, иллюстрирующая изменение дислокационной структуры в деформированных объемах образцов из стали 20: ячеистая дислокационная структура на стадии деформационного упрочнения (x14000)

Как уже отмечалось, существует ряд механизмов, объясняющих структурные перестройки в дефектной подсистеме [1–3, 5, 12] от хаотического распределения дислокаций к более организованному с образованием ячеек и фрагментов. Наделение ансамбля (группы) дислокаций волновыми свойствами позволяет предложить механизм структурной перестройки как результат самоорганизации в дефектной подсистеме, являющейся открытой нелинейной системой. Наличие волновых свойств обеспечивает как движение ансамбля дислокаций, так и перестройку дислокационных структур при внешнем воздействии. При совпадении частот групп дислокаций резонансы вызывают хаотическое состояние (волновой хаос) в дефектной подсистеме. Иными словами, различные дислокации обладают различными длинами волн и частотами. Поэтому хаотическое состояние в дефектной подсистеме, предшествующее структурной перестройке – самоорганизации, происходит при равенстве частот колебаний ансамблей дислокаций. Вероятность этого события возрастает при $\rho \approx \rho_{кр}$.

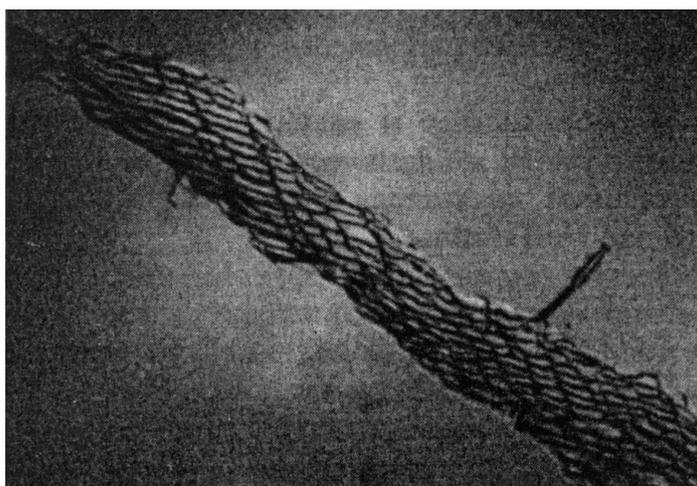


Рис. 3. Вихревая структура субграницы при деформации алюминия

Таким образом, модель поступательного движения ансамбля дислокаций как волнового пакета, обеспечивает в условиях резонансных явлений формирование субграниц и субзерен. Дислокации – это дефекты кристаллического строения, имеющие атомную структуру в их ядрах, поэтому волновой пакет не расплывается, т.е. не испытывает дисперсию.

Следовательно, [5], так и осуществлять перестройку групп дислокаций в организованные (упорядоченные) структуры – субграницы и субзерна – как самоподдерживающийся процесс. На рис. 3 приведена микрофотография структуры субграницы [13] при высокотемпературной деформации чистого алюминия ($T = 632\text{K}$, $\sigma = 2,8 \text{ НМ/м}^2$), где видно, что структура субграницы имеет винтовую упорядоченную укладку в виде отдельных групп дислокаций.

Образование сетки дислокаций при их перестройке может определяться диффузией точечных дефектов (массопереносом) [5, 7], возникающих в большом количестве в результате пересечения дислокаций при их движении. Однако, скорость такой диффузии при комнатной температуре мала. Такого рода диффузия должна быть особенно существенной при высоких плотностях дислокаций (т.е. тем в большей мере, чем большее упрочнение), что может быть причиной «переползания» взаимодействующих дислокаций, ускорения неконсервативного движения порогов, закручивания дислокаций, имеющих винтовую компоненту вектора Бюргерса, в геликоиды и т.д. Учитывая, что размер области, охваченной указанной дислокационной перестройкой, определяется размером субзерен L и, зная коэффициент линейной диффузии D , можно приближённо оценить характерное время их перестройки величиной $\sim L_s^2/D$.

По различным данным [5], для железа порядок $L_s \approx 10^{-5} \dots 10^{-3}$ см, а $D \approx 10^{-9}$ см²/с. Для среднего размера субзерна $L_s \approx 10^{-4}$ см находим, что $L_s^2/D \approx 10$ с. Полученное время t можно применять для ориентировочной оценки. Однако диффузионная модель формирования полигональной сетки [5, 9] не объясняет механизм образования субграниц с винтовой структурой (рис. 3).

По-видимому, согласованность действий групп дислокаций не может быть реализовано без обмена между ними информацией. Однако появление у дислокаций волнового характера движения указывает, что это свойство заложено самой Природой, квантовым происхождением Вселенной. Поэтому волновое движение дислокаций будет оказывать влияние не только на их стягивающее действие, но и на обмен информацией между ними. Можно полагать, что группы дислокаций, как квантовые системы, будут излучать энергию дискретно, что наблюдается при регистрации сигналов АЭ.

Таким образом, разработанная модель самоорганизации дислокаций в дефектной подсистеме основывается на определяющей роли волнового движения дислокаций в процессе структурообразования субграниц, а следовательно, и субзерен. Поэтому формирование субграниц следует рассматривать как квантовое явление, в котором большую роль играет квантовый (волновой) хаос, обусловленный резонансными явлениями. Следует также отметить, что размер границ (субграниц) ячеек составляет порядка $\sim 20 \dots 30$ нм (рис. 2). В связи с этим, структурные превращения в дефектной подсистеме можно классифицировать как наноструктурирование. Образование наноструктур в виде субграниц объясняет их повышенную сопротивляемость внешним нагрузкам /6/. Критерием их устойчивости может являться фазовое пространство состояний и фрактальная размерность.

Известно, что при усталостном нагружении пластически деформируется прежде всего поверхностный слой [3, 4]. В результате в циклически деформируемых локальных объемах формируются растягивающие и сжимающие напряжения, а также касательные напряжения. При этом формируется холмистый рельеф (рис. 1, а). Подобный рельеф, на наш взгляд, свидетельствует о формировании выпуклостей (холмов) за счет ротации структурных элементов как целого в зонах сдвиговой деформации, вызванный увеличением объема атомов при их возбуждении.

Атомный механизм деформации твердых тел рассмотрен в работе [18]. Согласно [18], изменения степени перекрытия электронных орбиталей (волновых функций электронов) происходит как при растяжении так и при сжатии цепочки атомов. Это означает [17] нарушение симметрии кристаллической решетки и уменьшение прочности межатомного взаимодействия и, как следствие, снижение её сдвиговой устойчивости.

Можно полагать, что атомы, находящиеся в локальных зонах циклического деформирования, где реализуются неравновесные структурно-фазовые переходы, образуют еди-

ную квантовую систему, которую можно рассматривать как нанокластер. Когерентное поведение атомов с образованием нового электронно-энергетического состояния в этой квантовой системе (кластере) следует изучать на основе принципов квантовой механики [19]. В связи с этим, в ней происходят смещение атомов, возрастание их амплитуды колебаний и рост энергии электронов, а следовательно, изменение степени перекрытия электронных орбиталей и изменение (увеличение) атомного объема, рост степеней свободы и образование новой электронной конфигурации атомов.

Известно [14], что атомы и электроны имеют дискретный спектр «возбужденных» состояний. Поэтому деформация кристаллической решетки будет периодической. В результате изменяется как информационное, так и энергетическое состояние этой квантовой системы, которое следует рассматривать как новое разрешенное структурное состояние [15] в кристаллической решетке.

Таким образом, при внешнем механическом нагружении исходный материал в результате структурно-фазовых переходов изменяет и квантовое состояние в зонах локализации деформации. Дислокации вызывают начальное «возбужденное» состояние атомов в кристаллической решетке. В электронной подсистеме возбуждение атомов обуславливают рост амплитуды их колебаний, образование волн смещения [20], усиливаемые электронами, и увеличение объема атомов за счёт их изменения их квантового состояния (ридберговское состояние). Это вызывает периодическую деформацию кристаллической решетки и обеспечивает дислокациям преодоление энергетического барьера Пайерсла-Набарро кооперативным (согласованным) движением. Поэтому при усталостном нагружении структурные переходы в кристалле реализуются как в дефектной подсистеме, так и в электронной.

С увеличением зоны растягивающих или сжимающих напряжений с ростом числа циклов нагружения будет увеличиваться и число атомов, вовлекаемых в кластер, устойчивость которого будет уменьшаться вследствие снижения прочности межатомного взаимодействия [19]. Согласно [19], прочность межатомного взаимодействия будут характеризовать спиновые квантовые числа, при этом спины электронов будет определять симметрию их волновых функций. При антипараллельных спинах завихренность вследствие суперпозиции спинов (локального вихря) оказывает стягивающее действие на электронные облака, т.е. на прочность межатомного взаимодействия.

Как указывалось ранее, дислокации являются линейными дефектами на наноуровне. Коллективное взаимодействие дислокаций – это результат наноструктурирования, поэтому группу дислокаций можно рассматривать также как нанокластер, т.е. как квантовую систему. В связи с этим, существующий дислокационный механизм деформации материалов [1–4] путем образования субграниц, ячеек (рис. 2) и фрагментов, по-видимому, будет не полным, поскольку в нем не учтён атомный механизм деформации твердых тел, взаимодействие дефектной и электронной подсистем.

Проведенный термодинамический и квантовый анализ структурного состояния деформируемой кристаллической решетки показывает, что при усталостном нагружении материалов происходит наноструктурирование основных носителей деформации. В связи с этим, нами разработан электронно-дислокационный (нанокластерный) механизм деформации твердых тел как результат динамического смещения атомов, образование волн смещения, перестройки их электронной структуры в локальных циклически деформируемых объемах кристаллической решетки, а также структурных изменений в дефектной подсистеме с образованием атомных и дислокационных нанокластеров (квантовых систем) и последующего их согласованного (кооперативного) взаимодействия при внешнем нагружении, вследствие обмена информацией между ними.

Таким образом, для реализации структурно-фазовых переходов в кристаллической решетке необходимы согласованные действия электронной и дефектной подсистем. Согласованность, в свою очередь, возможна только в результате обмена информацией между ними. Ранее указывалось [17], что электроны хранят информацию (память) об эволюции атома.

Высказано предположение, что информационный потенциал электрона хранится и передается при межатомном взаимодействии в виде волн де Бройля. Кроме того, наличие спина, т.е. собственного момента импульса электрона, обеспечивает ему свойство нелокальности, т.е. дальнедействующую связь с другими электронами во времени и в пространстве. Поэтому характер ориентации спинов будет сказываться на возможности электрона передавать информацию с высокой скоростью (мгновенно). Это волновое свойство электрона положено в основу квантовой телепортации [22]. Роль спиновых квантовых чисел, как указывалось ранее, является также определяющей при межатомном взаимодействии [19].

Следует отметить, что в условиях растягивающих или сжимающих напряжений, движение дислокаций, обладающих определенным зарядом, будет происходить по ослабленным межатомным связям в электрическом поле, создаваемом ядрами и внутренними электронами атомов, входящими в нанокластер (квантовую систему). Поэтому роль параметра порядка и информатора будет выполнять электрическое поле, вызывая образование ротационных структур в электронной и дефектной подсистеме, т.е. формирование электронных флуктуационных состояний в атомном кластере, и вихревых структур в виде субграниц (рис. 3).

Как электронные ансамбли, так и солитоны, как указывалось ранее, обладают информацией, т.е. памятью. Поэтому атомные и дислокационные наноструктуры могут обмениваться информацией, а следовательно действовать согласованно. Взаимосвязь электронной и дефектной подсистем подтверждается также линейной зависимостью плотности электронных состояний на уровне Ферми и энергии дефекта упаковки (э.д.у.) [5].

Следовательно, можно полагать, что новые электронные состояния, образующиеся при формировании атомного кластера, посредством обмена информацией, будет влиять на подвижность и пространственную организацию дислокаций в кристаллической решетке.

Как уже указывалось, в работе В.Е. Панина [15] высказано предположение, что в электронно-энергетическом спектре кристалла уже заложен генетический код, определяющий появление в нем новых разрешенных структурных состояний. По-видимому, генетический код служит тем алгоритмом, который задает последовательность расположения атомов в кристаллической решетке. Можно полагать, что электронно-энергетическое состояние атомного кластера будет определять плоскость низкоэнергетического скольжения, подвижность дислокационного кластера и механизм его структурной перестройки в дефектной подсистеме.

Центральным моментом при построении волнового механизма движения дислокаций является идея о механизме подкачки её энергией. В термодинамических неравновесных атомных системах, это связано с изменением (генерацией) волн, излучаемых атомами при возбуждении электронов прежде всего в электронной подсистеме ядер дислокаций, имеющей атомную структуру. Исходя из квантовых представлений, определена ν_δ - частота колебаний дислокаций: $E_\delta = h \nu_\delta$, или $\nu_\delta = \frac{E_\delta}{h}$, где E_δ – энергия дислокации, h – постоянная Планка.

Расчет ν_δ при $E_\delta = 5$ электронвольт, частота $\nu_\delta \sim 10^{13}$ с, т.е. находится в диапазоне гиперзвуковых волн, совпадающих с частотой волн смещения [20], излучаемых атомами. Иными словами, подкачка энергии движущейся дислокации определяется резонансными явлениями в квантовой системе. Такой подход объясняет наличие порогового значения плотности дислокаций при формировании субграниц.

Поэтому согласно нашей модели, решающим фактором в перестройке (самоорганизации) дислокаций является волновой (дискретный) характер движения дислокаций. Причем движущейся силой самоорганизации дислокаций в упорядоченные субструктуры, как указывали ранее, являются резонансы. В связи с этим, можно полагать, что вихревая упаковка структуры субграниц (рис. 3) обусловлена взаимодействием и наложением друг на друга групп дислокаций в ансамбле, имеющих различные частоты.

Ротационная укладка группы дислокаций в субграницах (рис. 3), на наш взгляд, обеспечивает рост и информационного содержания, поскольку субзёрна – это более организованные структуры. Поэтому согласованное движение групп дислокаций и структурные измене-

ния не могут быть реализованы без обмена между ними и другими дефектами информацией. Известно, что электроны обладают спином. Спин - проявление квантового характера развития микромира. Поэтому направление спинов в ядрах дислокаций будет оказывать не только стягивающее действие с закручиванием при коллективном взаимодействии дислокаций, но и влиять на обмен информацией между ними, т.е. между ядрами дислокаций по механизму квантовой телепортации (нелокальной далекодействующей связью).

Проведенный термодинамический и квантовый анализ позволил предложить обобщенную модель механизма зарождения микротрещин и их дискретного роста, при усталостном нагружении как результат последовательных, согласованных переходов на различных структурных уровнях. На микроуровне размножение дислокаций приводит к росту искажения кристаллической решетки и снижению ее сдвиговой устойчивости с образованием разорванных межатомных связей и полос локализации деформации. Переход хаотической дислокационной структуры в кристаллической решетке по мере роста плотности дислокации в ячеистую и полосовую как результат самоорганизации контролируется внутренним механическим полем, являющимся параметром порядка и информатором. Формирование наноструктур в виде субграниц и рост степени перекрытия электронных орбиталей повышают сдвиговую устойчивость кристаллической решетки движению вновь генерируемым дислокациям при дальнейшем росте деформации.

Однако образование устойчивых полос скольжения в зонах локализации деформации, по мере роста числа циклов усталостного нагружения, накопление здесь энтропии, разрушение (рассыпание) винтовых субграниц (рис. 3) под действием вновь образованных высокоэнергетических ансамблей дислокаций внутри субзерен и снижение устойчивости атомных кластеров, вследствие роста амплитуды колебаний атомов, возникают условия для перехода деформации на более высокий структурный (мезо-) уровень. Иными словами, накопленная деформация передается в смежные зерна либо в приграничную зону деформации, вызывая прорастание микротрещин в смежные зерна, либо они расслаиваются на межзеренных границах.

Таким образом, квантовый подход позволил также предложить механизм согласованного взаимодействия деформационных дефектов, образованных на микроуровне, с мезоуровнем, рассматривая их как единую квантовую систему со смешанным состоянием, впервые представленной Э. Шрёдингером [19]. Поэтому взаимодействие деформационных дефектов в этой смешанной квантовой системе при их переходе из зерна в зерно возможен, если потенциальная энергия нанокластера достаточна для преодоления границ зерен. Предложенный механизм подтверждается экспериментальными исследованиями. Современное состояние квантовой механики позволяет описать смешанное квантовое состояние системы математически.

Необходимо отметить, что ротационный характер движения структурных элементов в условиях сдвиговой деформации на мезоуровне самоподобно реализуется и на наноуровне (рис. 3) в виде ротационного характера образования субграниц из групп дислокаций, на наш взгляд, устойчивость структурных элементов при таком характере их формирования будет определяться, по-видимому, критическим углом их скручивания.

Следовательно, при циклическом нагружении металлов реализуется самоподобный согласованный вихревой механизм пластической деформации на различных структурных уровнях. Свойство самоподобного образования вихревых структур на различных масштабных уровнях (масштабная инвариантность) заложено самой Природой, квантовым характером образования Вселенной [14]. Это подтверждается тем, что вихревые структуры как инварианты мы наблюдаем как на мезоуровне (поворот зерен как целого), так и на наноуровне – путём вихревого характера образования субграниц.

Можно полагать, что наноуровень «программирует» характер движения структурных элементов при циклическом нагружении на различных структурных уровнях, что и обуславливает согласованное, самоподобное развитие вихревых мод деформации в условиях усталостного нагружения. Масштабная инвариантность, как и другие характеристики, по-

видимому, формируется в металлах уже на стадии кристаллизации. В ряде работ указывается, что атомы химических элементов в первичной коре Земли порождались вращающимися как целое. В связи с этим, физика планковских масштабов определяет плотность материала, темп его растяжения или сжатия при циклическом нагружении.

Таким образом, информационная модель самоподобного образования и движения структурных элементов на различных масштабных уровнях при циклическом нагружении позволяет объяснить механизмы согласованной передачи пластических сдвигов через границы зерен в деформируемом поликристалле (рис. 1, б) за счет обмена информацией. Для этого необходимо также формирование на границах зерен группы дислокаций, т.е. нанокластера. Иными словами, локальные структурные превращения распространяются в смежные зерна на наноуровне в виде деформационных дефектов – нанокластеров. При различии в квантовом состоянии структурных элементов и на поверхностях разделов часть информации теряется. В результате в зернах и на границах зерен будут образовываться микротрещины (рис. 1, б), и система переходит в новое более устойчивое состояние с образованием диссипативных структур – нано- и микротрещин. Этот период определяется степенью деформационного упрочнения и остаточного ресурса пластичности материала. Таков, на наш взгляд, масштабный переход от нано- к мезоуровню пластической деформации и далее к макроразрушению, согласно электронно-дислокационному (нанокластерному) подходу.

Важным направлением в материаловедении является упрочнение материалов (деталей) с целью уменьшения локализации деформации при циклическом нагружении, вызывающих образование микротрещин. В связи с этим, становятся понятными целенаправленные пути повышения сопротивляемости материалов разрушению при пластическом деформировании (экструзии, прокатке, ковке, воздействием ультразвуком и т.д.). В частности, за счет сообщения структуре материалов при упрочнении определенной информации, воздействуя на энергетическое состояние дефектной подсистемы, для перехода ее в более устойчивое состояние с образованием более прочных структурных элементов в виде наноразмерных субграниц.

Разработанная методика регистрации акустических сигналов при испытаниях с последующей оценкой его фрактальной размерности позволяет прогнозировать сопротивляемость усталостному зарождению трещин на ранней стадии. Фрактальная размерность характеризует информационное содержание структур, их организованность.

Библиографический список

1. **Конева, Н.А.** Накопление дефектов, запасенная упругая энергия и самоорганизация субструктуры. Н.А. Конева [и др.] // Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов: сб. Ленинград, 1987. С. 20-35.
2. **Конева, Н.А.** Дислокационные субструктуры и их трансформация при усталостном нагружении (обзор) / Н.А. Конева [и др.] // Известия вузов. Физика. 2002. № 3. С. 87-98.
3. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев. – М.: Интермед Инжиниринг, 2002. – 288 с.
4. **Терентьев, В.Ф.** Эволюция структуры при усталости металлов как результат самоорганизации диссипативных структур. Синергетика и усталостное разрушение металлов / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 1989.
5. **Трефилов, В.И.** Физические основы прочности тугоплавких металлов / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирсов. – Киев: Наук, думка, 1975. – 315 с.
6. **Иванова, В.С.** Введение в междисциплинарное материаловедение / В.С. Иванова. – М.: УРСС.2005. – 252 с.
7. **Кабалдин, Ю.Г.** Наноструктурирование металлических материалов при усталостном нагружении / Ю.Г. Кабалдин, С.Н. Муравьев, А.А. Бурков // Структурообразование и интеллектуальные технологии синтеза наноматериалов: сб. научных трудов. – Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ. 2007. Вып.8. С. 36-48.

8. **Хакен, Г.** Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам: [пер. с англ.] / Г. Хакен. – 2-е изд., доп. – М.: КомКнига. – 248 с.
9. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / В.А. Лихачев [и др.]. – Киев: Наукова думка. 1989. – 320 с.
10. **Николис, Г.** Структурообразование в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
11. **Хакен, Г.** Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М.: Мир, 1985. – 411 с.
12. **Смирнов, Б.И.** Дислокационная структура и упрочнение кристаллов / Б.И. Смирнов. – Л.: Наука, 1981. – 236 с.
13. **Судзуки, Т.** Динамика дислокаций и пластичность: [пер. с япон.] / Т. Судзуки, Х. Ёсиага, С. Такеути. – М.: Мир, 1969. – 296 с.
14. **Окунь, П.Б.** Элементарное введение в физику элементарных частиц / П.Б. Окунь. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 136 с.
15. **Панин, В.Е.** Атомвакансное состояние в кристаллах / В.В. Панин [и др.] // Известия вузов. Физика. 1987. №1. С. 5-16.
16. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.В. Панин [и др.]. – Новосибирск: Наука. 1995. Т. 1. – 297 с.
17. **Кабалдин, Ю.Г.** Синергетика. Информационные модели самосборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии / Ю.Г. Кабалдин. – Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2007. – 186 с.
18. **Григорович, В.К.** Металлическая связь и структура металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1988. – 296 с.
19. **Степанов, Н.Ф.** Квантовая механика и квантовая химия / Н.Ф. Степанов. – М.: Мир. 2001. – 519 с.
20. **Кашенко, М.П.** Волновая модель роста мартенсита при γ - α превращении в сплавах на основе железа / М.П. Кашенко. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. – 224 с.
21. **Слядников, Е.Е.** Квантовая система псевдоспинов и структурный переход в деформируемом кристалле // Известия высших учебных заведений. Физика. 2003. №2. С. 3-12.
22. **Бауместер, Д.** Физика квантовой информации / Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цеймингер. – М.: Постмаркет. 2002. – 376 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

J.G. Kabaldin

QUANTUM MODEL OF CRACKING IN METAL MATERIALS WHEN FATIGUE LOADING

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alexeev

Objective: To develop a quantum model of cracking during fatigue testing.

Methodology: electron microscopic studies and quantum-mechanical calculations.

The results of research: is to develop quantum mechanism of nucleation of microcracks in solids, considering the local deformation in the area of the defect and electron subsystems as nanoclusters.

Conclusion: The developed model allows you to control the quantum processes that use material fracture during fatigue testing.

Key words: fatigue tests, nanoclusters, microcracks.