

# **ОТЗЫВ**

Официального оппонента на диссертационную работу

**Оборина Владимира Александровича**

**«Масштабно-инвариантные структурные закономерности развития поврежденности и разрушение при динамическом и усталостном нагружении»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.08 «Механика деформируемого твёрдого тела»

## **Актуальность темы диссертации**

Оценка ресурса прочности машин и механизмов является одной из основных задач на стыке механики деформируемого твердого тела и физики прочности. Расчет металлических конструкции на прочность при статических нагрузках лежит в основе современных методов оценки их ресурса долговечности. С точки зрения физики прочности, необходимым условием длительной эксплуатации металлической конструкции является отсутствие в ее элементах пластической деформации. Однако это не означает, что механические нагрузки ниже определенного уровня (предела текучести) не будут вызывать изменений в структуре металла, а при определенных условиях (циклические нагрузки / усталость) и определять его деформационное поведение. Учет подобных изменений при определении времени жизни конструкции под нагрузкой важен для таких высокотехнологичных отраслей промышленности, как авиакосмическая. Поэтому разработка научных основ прогноза долговечности металлических конструкций, базирующего не на анализе механических (макроскопических) свойств материала, а на особенностях эволюции его дефектной структуры представляется актуальной задачей, как для академической, так и для прикладной науки.

Современная наука о прочности начиналась с попыток предсказать поведение металла на основе информации об эволюции его структуры, а именно, с изучения стадийности пластической деформации. Было установлено, что пластическая деформация металлического монокристалла может быть разделена на три стадии, различающиеся по морфологии рабочей поверхности или распределению следов деформации. Основными способами анализа степени дефектности деформируемого металла являются металлографические методы (световая микроскопия, электронная микроскопия на просвет и отражение) и рентгеноструктурный анализ, доступные широкому кругу исследователей, но которые трудно использовать для экспресс-анализа состояния конструкции в процессе эксплуатации. Критическим на пути решения проблемы является вопрос, какую морфологическую характеристику структуры следует выбрать чтобы, отслеживая ее эволюцию, получать информацию о состоянии металла

или его ресурсе долговечности. Не секрет, что именно эта проблема является «камнем преткновения» при разработке методов прогнозирования ресурса долговечности металлического материала на основе представлений об эволюции его дефектной структуры.

В работе В.А. Оборина предпринята попытка решить и, как нам кажется, попытка успешная, эту «нерешаемую» задачу на стыке механики деформируемого твердого тела и физики прочности. Было принято разумное предположение, что дефектная структура металла на ранней стадии пластической деформации может быть описана на основе изучения морфологии боковой поверхности деформированного монокристалла, а именно ее масштабно-инвариантных свойств. Принимая во внимание, что механические свойства материала являются макроскопическими, деформационное поведение металлического монокристалла должно определяться особенностями его дефектной структуры на микроуровне, то есть развитием полос скольжения на деформированной поверхности. В случае небольших деформаций / удлинений (как это имеет место при усталостном нагружении) эволюция следов скольжения будет ограничена стадией легкого скольжения (I стадия пластической деформации) и, возможно, началом стадии линейного упрочнения (II стадия). Механизм пластичности на этой стадии детально описан, в том числе и в классических моделях теории дислокаций. Значительную роль в изучении этого механизма сыграли исследования микрорельефа деформированной поверхности при помощи оптических интерферометров. Логично предположить, что если качественная картина распределения полос скольжения на I стадии пластической деформации практически не зависит от типа кристаллической решетки и химического состава металла, то также не должно быть принципиальных различий и в количественных характеристиках дефектной структуры на этой стадии. Необходимо найти универсальную количественную характеристику дефектной структуры, которая может быть принята в качестве «маркера» ресурса долговечности металла, и научиться отслеживать ее в деформируемом металле. Лазерная микроинтерферометрия поверхности представляется экспериментальным методом, способным дать количественную информацию о микрорельефе поверхности деформированного металлического монокристалла на стадии легкого скольжения (в работе использовался лазерный интерферометр NewView 5010). Принципиальным моментом в такого рода исследовании будет формулировка физической модели появления деформационного рельефа на поверхности металла на основе определения фрактальной размерности и показателя Хёрста. Ее математическое описание можно будет использовать для создания методики расчета на прочность.

## **Структура и основные результаты диссертационной работы**

Во **Введении** к диссертации формулируется постановка задачи, описываются цели работы и приводятся положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен краткий обзор работ ведущих российских специалистов по изучению эволюции дефектов структуры металлов в процессе пластической деформации (преимущественно в 70-е – 90-е годы). Приводятся основные результаты анализа статистической автомодельности пространственных распределений деформационных дефектов в металлах на различных масштабных уровнях. Показано, что функция распределения деформационных дефектов в металле под нагрузкой имеет универсальный вид, независимо от схемы приложения нагрузки, структуры и химического состава материала. Масштабная инвариантность дефектной структуры в деформированных металлах проявляется при формировании деформационного рельефа на боковой поверхности, также ее можно обнаружить при анализе развития трещин и морфологии поверхности изломов при усталостном нагружении. Таким образом, в научной литературе обозначены предпосылки для успешного решения поставленной в работе задачи. Оппонент хотел бы особо подчеркнуть значительный вклад в создание задела для успешного решения проблемы научного руководителя диссертанта профессора О.Б. Наймарка.

Во **второй главе** работы проведено экспериментальное исследование морфологии рабочей поверхности или формирование микрорельефа на монокристаллических образцах алюминия, растягиваемых вдоль жесткого направления  $\langle 100 \rangle$ , когда на стадии легкого скольжения работает только одна плоскость в октаэдрической системе (а значит не должен формироваться грубый деформационный рельеф и происходить локализованное накопление пластической деформации, по крайней мере, на макроскопическом масштабе). В этой главе решена основная материаловедческая задача работы – найдена количественная характеристика дефектной структуры или деформационного микрорельефа в деформированном металле на стадии легкого скольжения. Анализ морфологии деформационного рельефа боковой поверхности монокристалла алюминия показал, что в диапазоне масштабов от 5 мкм до 1 мм следам октаэдрического скольжения на стадии легкого скольжения соответствует показатель Хёрста  $H \sim 0,7$ . На основании полученных экспериментальных данных верифицируется физическая модель, в основе которой лежит определение фрактальной размерности и показателя Хёрста, используемая для анализа масштабно-инвариантных закономерностей эволюции рельефа поверхностей изломов промышленных сплавов алюминия.

**Третья глава** посвящена изучению масштабно-инвариантных закономерностей образцов из алюминиевых сплавов системы Al-Mg и Al-Cu и при усталостном нагружении. Предварительное нагружение образцов проводили либо при квазистатическом растяжении,

либо динамическом. Испытания на многоцикловую усталость  $2 \times 10^5$  циклов проводили при комнатной температуре. Морфологию изломов образцов изучали при помощи SEM и профилометра-интерферометра. Определялись количественные значения масштабных инвариантов рельефа поверхности разрушения на разных этапах испытания. Обнаружена чувствительность сплава системы Al-Cu к предварительному нагружению, что проявляется в увеличении верхних границ пространственных масштабов до  $\sim 56$  мкм, на которых показатель Херста остаётся постоянным по сравнению со сплавом системы Al-Mg  $\sim 28$  мкм. Что и следовало ожидать для случая алюминиевой матрицы, упрочненной частицами второй фазы.

**Четвертая глава** посвящена исследованию кинетики роста усталостных трещин в алюминиевых сплавах системы Al-Mg и Al-Cu при гигацикловой усталости. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях. Проблема оценки ресурса конструкций в авиакосмической технике авиационного моторостроения поставили задачу оценки ресурса прочности при  $10^8 - 10^{10}$  циклах или гигацикловой усталости. Актуальность данного исследования вызвано обстоятельством, что механическое поведение металлов в «гигацикловой» области существенно отличается от поведения при многоцикловой усталости. В качестве схемы преднагружения использовали динамическое растяжение на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского (скорость деформации  $\sim 10^3 \text{ c}^{-1}$ , испытания выполняли на ультразвуковой испытательной машине Shimadzu USF-2000, количественный анализ морфологии поверхности изломов образцов проводили при помощи SEM и профилометра-интерферометра. Обнаружено, что при гигацикловой усталости опасная трещина в сплаве Al-Mg возникает в объеме, а не на поверхности образца, в результате чего морфология излома напоминает «рыбий глаз» и происходит уменьшение «верхней границы пространственных масштабов», где показатель Хёрста не меняется.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

#### **Достоверность результаты и обоснованность выводов**

Достоверность результатов подтверждается использованием в работе современной исследовательской техники, выбором модельных материалов (монокристалл алюминия, твердый раствор магния в алюминиевой матрице «Al-Mg» и алюминиевая матрица, упрочненная частицами второй фазы “Al-Cu”), подбором схем нагружения (одноосное растяжение, усталостное нагружение (много- и гигацикловое), комбинация ударного и усталостного нагружения), применением апробированных методов вычисления

пространственных инвариантов. Обоснованность выводов доказывается сравнением с литературными данными и экспериментальными результатами самого автора.

### **Новизна и значимость результатов работы**

Впервые показано, что деформационное поведение монокристалла ГЦК-металла (алюминия) на стадии легкого скольжения (формирование микрорельефа за счет появления на боковой поверхности системы полос скольжения по одной плоскости октаэдра) можно охарактеризовать путем определения ее фрактальной размерности и показателя Хёрста. Подобным образом оказалось возможным описать состояние ансамбля деформационных дефектов на поверхности изломов алюминиевых образцов в случае усталостного нагружения. Показана принципиальная возможность оценить ресурс усталостной прочности металла на основании данных об эволюции ансамбля дефектов микроскопического масштаба, а не на информации о механических (макроскопических) свойствах.

### **Замечания и комментарии оппонента**

Замечания касаются преимущественно стиля написания диссертации и междисциплинарного характера работы и не сказались на общей положительной оценке работы.

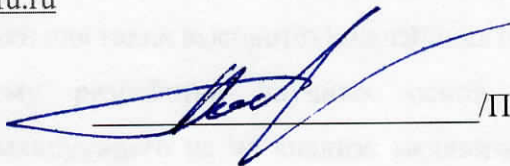
Первое. Несмотря на то, что в основной для работы второй главе, проводится детальное изучение развития полос октаэдрического скольжения в монокристалле ГЦК-металла алюминия, автор не раз не упомянул, что основным механизмом пластической деформации в нем, как и в любом другом ГЦК-металле, является октаэдрическое скольжение.

Второе. На странице 106 написано «химический состав сплава АМг6 определялся... с помощью... (рисунок 4.17)». Хотя единственная информация о содержании химических элементов в изучаемом сплаве алюминия приводится на рис. 4.18. Однако, как ясно из содержания Главы 4, определялся там не химический состав сплава, а содержание Mg на изломе, которое действительно может «гулять» по поверхности излома. Но причиной этого скорее всего является не реальная разность в содержании магния, а неровность / шероховатость поверхности усталостного излома на рис. 4.18. Представляется, что наблюдение «плавающей» концентрации магния на изломе твердого раствора магния в алюминии никак не связано с основной задачей диссертации и его не следовало включать в работу.

### **Заключение оппонента о диссертационной работе**

Диссертация В.А. Оборина представляет собой законченную научную работу, посвященную значимой теме на стыке механики деформируемого твердого тела и физики прочности – количественному описанию состояния ансамбля деформационных дефектов микроскопического масштаба в металле при небольших удлинениях, когда в нем уже сформировался деформационный рельеф, но макроскопической локализации пластической деформации (образования шейки) еще не происходит. Основные результаты и выводы, представленные в диссертационной работе, опубликованы в ведущих отечественных журналах по механике твердого тела и физике прочности и подробно обсуждались на представительных конференциях. Автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание. Диссертация В.А. Оборина удовлетворяет Положению ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.08 «Механика деформируемого твердого тела».

Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, профессор  
кафедры физики конденсированного состояния  
и наноразмерных систем Института естественных наук  
и математики Уральского федерального университета  
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51,  
Тел.: +7(912) 260-9967;  
Email: [peter.panfilov@urfu.ru](mailto:peter.panfilov@urfu.ru)



/Панфилов Петр Евгеньевич/

«20» сентября 2021г.

Подпись Панфилова П.Е. заверяю  
Секретарь Ученого совета УрФУ

*Ученый*



/Морозова В.А./