

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук

### Ю. Г. МАТВИЕНКО

## ТЕНДЕНЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ В ПРОБЛЕМАХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рекомендовано к печати Ученым советом Института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН. Издание осуществлено при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00383).

#### Матвиенко Ю.Г.

Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. — М.-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2015. — 56 с.

ISBN 978-5-4344-0271-2

Изложены основные тенденции механики разрушения на современном этапе развития машиностроения. Приведены методы и результаты физико-математического и имитационного моделирования процессов разрушения на различных масштабно-структурных уровнях и при различных (в т. ч. и экстремальных) условиях нагружения. Обоснована методология исследования и анализа ранних повреждений в критически важных зонах машин и конструкций на основе совместного использования тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии. Обнаружение трещиноподобных дефектов и остаточных напряжений в машинах и конструкциях предложено определять с применением корреляционно-оптических методов. Значительное внимание уделено разработке перспективных моделей, комплексных критериев и экспериментально-расчетным методам двухпараметрической механики разрушения для анализа, нормирования и обоснования прочности, живучести, ресурса и безопасности конструкций и машин. Сформулированы перспективные направления механики разрушения для решения современных проблем машиностроения.

Для широкого круга читателей: студентов и преподавателей, научных работников, инженеров организаций машиностроительного комплекса.

#### ISBN 978-5-4344-0271-2

© Ю.Г.Матвиенко, 2015 © ФГБУН «ИМАШ РАН», 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Об авторе
Предисловие7
1. Физико-математическое и имитационное моделирование
<ol> <li>Мониторинг и диагностика ранних повреждений, разрушений и трещиноподобных дефектов</li></ol>
3. Модели и критерии двухпараметрической механики разрушения 22
<ol> <li>Инженерно-технологические аспекты современной механики разрушения</li></ol>
5. Перспективные научные проблемы 48
6. Заключение
Список литературы

### ОБ АВТОРЕ

МАТВИЕНКО ЮРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, является известным специалистом в области прочности, живучести, ресурса и безопасности машин и конструкций в сильно поврежденных состояниях в условиях экстремальных физико-механических воздействий и коррозионно-активных сред.



Важные фундаментальные и прикладные результаты Матвиенко Ю. Г. достигнуты в нелинейном физико-математическом и имитационном моделировании деформирования, повреждения и разрушения материалов и конструкций на различных масштабно-структурных уровнях, позволившие сформулировать оптимальные требования к характеристикам конструкционных материалов для создания нового поколения машин и конструкций с повышенными характеристиками прочности, живучести и ресурса. На основе подходов нелинейной механики разрушения им разработана иерархическая система комплексных моделей, критериев и экспериментально-расчетных методов анализа, нормирования и обоснования прочности, живучести, ресурса и безопасности высокорисковых машин и конструкций в сильно поврежденных состояниях и в условиях экстремальных физико-механических воздействий и коррозионно-активных сред. С помощью предложенных фундаментальных подходов исследованы прочность, живучесть и ресурс критически важных элементов объектов атомной энергетики, трубопроводного транспорта, авиационной и ракетно-космической техники, поврежденных трещиноподобными дефектами.

В качестве научного эксперта и профессора неоднократно приглашался в университеты и институты Англии, Франции, Японии, Италии, Южной Кореи и Таиланда.

Является заместителем председателя Российского отделения Европейского общества целостности конструкций, научным экспертом от России в Совете Россия–НАТО «Наука ради мира и безопасности», почетным членом итальянского общества «Landau Network-Centro Volta», заместителем главного редактора журнала «Проблемы машиностроения и надежности машин», членом редколлегий журналов «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», «Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures», «Journal of Civil Engineering and Construction Technology».

Имеет более 250 печатных трудов, опубликованных в международных и отечественных изданиях, в т.ч. 12 монографий и 10 авторских свидетельств на изобретения.

### ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время очевидным и неоспоримым является междисциплинарный характер научных исследований. С привлечением подходов механики, физики и химии в Институте машиноведения им. А. А. Благонравова разрабатываются фундаментальные принципы, модели и методы многокритериального связного анализа, обеспечения и повышения прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности машин и конструкций в междисциплинарных проблемах машиностроения.

Одним из ключевых звеньев такого системного анализа является механика разрушения, позволяющая дать ответ на непростой вопрос о безопасности поврежденных трещиноподобными дефектами критически важных элементов машин и конструкций машиностроения [1, 2]. Более того, современная механика разрушения оказывается весьма востребованной в решении технологических проблем машиностроения при «конструировании» материалов с повышенными служебными характеристиками и оптимальным сочетанием прочности, трещиностойкости и живучести, а также при обосновании требований к созданию приборного и аппаратного обеспечения для локации и дефектометрии поврежденных трещинами машин и конструкций.

Результаты фундаментальных и прикладных исследований в рамках современной механики разрушения достигаются посредством привлечения интенсивно развивающихся методов исследования, основанных на физико-математическом и имитационном моделировании; использовании физических методов при мониторинге и диагностике напряженно-деформированного состояния, поврежденности и дефектности высокоградиентных критически важных зон; разработке перспективных моделей и критериев двухпараметрической механики разрушения, учитывающей стеснение деформаций в окрестности вершины трещиноподобного дефекта и степень его опасности.

Приложением таких исследований являются критически важные объекты с повышенными параметрами рабочих процессов, ресурса и техногенной безопасности на стадиях конструирования, изготовления, доводки и эксплуатации в штатных, аварийных и катастрофических ситуациях [3–7].

Результаты научных исследований и разработок последних лет востребованы в различных организациях машиностроения, нефтяных и газовых компаниях, среди которых следует упомянуть следующие: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», ОАО «Компания «Сухой», ОАО «Газпром», ОАО «Российские железные дороги», НИКИЭТ им. Н. А. Доллежаля, ОКБ «Гидропресс», ОАО «ОКБМ Африкантов», «Роснефть», «Транснефть», компания «Sakhalin Energy», Федеральное государственное унитарное предприятие «ВИАМ», Группа компаний «Промышленная безопасность», НТЦ ИРТ, НГБ «Энергодиагностика» и др.

Автор благодарен коллегам ИМАШ РАН за некоторые предоставленные результаты их научных исследований.

### 1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Различные представления о процессах, протекающих на микро- и макроуровнях, а также различные подходы и методы, используемые для описания этих процессов, обусловливают определенное иерархическое построение трещин, которое конкретизирует и в определенной мере упрощает анализ развития трещин в каждом звене иерархии. В качестве одного из параметров построения иерархии трещин размера l целесообразно принять протяженность трещины по отношению к размерам микроструктурных элементов (например, зерен) c и элементов конструкций и машин W. Различают микроструктурно короткие трещины l/c, физически короткие трещины l/D и макротрещины l/W.

# Нейросетевое моделирование роста коротких усталостных трещин

Распространение коротких усталостных трещин в металлах имеет свои особенности, связанные с преодолением микроструктурных барьеров [1]. Различают микроструктурно и физически короткие усталостные трещины, отличающиеся закономерностями преодоления микроструктурных барьеров в металле. Микроструктурные барьеры, препятствующие развитию трещины в сталях, можно классифицировать по уровню сопротивления как слабые и сильные. Наличие слабых барьеров обусловлено структурой металлов, связанной с кристаллографической ориентацией, размерами и формой ферритных зерен. В качестве сильных микроструктурных барьеров выступают чаще всего границы перлитных зерен или включений размера *D*.

Микроструктурно короткие трещины распространяются скачкообразно, преодолевая слабые микроструктурные барьеры, или останавливаются сильными микроструктурными барьерами при напряжениях (деформациях) ниже предела выносливости металла. Если напряжения (деформации) выше предела выносливости, стадия роста микроструктурно коротких трещин (1-я стадия) переходит в стадию роста физически коротких трещин (2-я стадия).

Для моделирования кинетики микроструктурно и физически коротких усталостных трещин и определения соответствующих параметров уравнений роста трещин предложено использовать метод нейронных сетей, являющийся весьма эффективным в задачах анализа сильно зашумленных экспериментальных данных. Для устранения влияния случайных факторов



Рис. 1. Прогнозирование 1-й и 2-й стадий роста коротких трещин в среднеуглеродистой стали при размахе сдвиговой деформации Δγ = 0.79 % и коэффициенте асимметрии циклического нагружения R = -1

при нейросетевом моделировании использована управляемая регуляризация. Определенные с помощью метода нейронных сетей параметры уточнены с помощью метода наименьших квадратов с минимизацией функции ошибки методом адаптивного случайного поиска.

## Моделирование скалывания кромки образца и индентирования керамик

В качестве экспериментального метода определения сопротивления разрушению конструкционной, функциональной, биомедицинской керамики, стёкол и других хрупких материалов на мезомасштабном размерном уровне привлекает внимание метод скалывания прямоугольной кромки образца с помощью конического индентора со сферическим разрушающим кончиком. Эта методология позволяет оценивать сопротивление разрушению по результатам скалывания кромок малогабаритных образцов и является альтернативой традиционным методам испытаний, предусматривающим использование сравнительно крупногабаритных образцов с надрезом, создание которого является проблематичным для хрупких материалов. Это особенно актуально при поисковых материаловедческих исследованиях, при изучении уникальных дорогостоящих материалов и тогда, когда изделие значительно меньше стандартного образца. Для определения сопротивления разрушению хрупких материалов методом скалывания кромки образца эффективно использование комбинированного подхода, сочетающего экспериментальный метод с методом численного моделирования напряженно-деформированного состояния в зоне контакта индентора с испытываемым образцом [8]. С помощью численного моделирования оптимизирована методология исследования сопротивления разрушению скалыванием кромок образца и разработаны рекомендации по проведению экспресс-испытаний.

На основе расчетного исследования контактного взаимодействия индентора с образцом в зоне краевого эффекта (соответствует эксперименту на скалывание кромки образца) выявлено существование точек бифуркации, обуславливающих переход системы от состояния, соответствующего появлению первичной полукруглой трещины, к состоянию, соответствующему появлению двух поверхностных трещин. Две вторичные поверхностные трещины начинают распространяться от точек бифуркации и идут вдоль траектории локального неравновесного состояния, соответствующего локальному экстремуму (минимуму в области отрицательных значений) компонентов деформаций и напряжений (рис. 2).

# Моделирование микроповреждений поверхностных слоев и бифуркации микротрещины

Значительный интерес представляет исследование закономерностей деформирования, разрушения и изнашивания тел качения. Решение данной задачи актуально при анализе аварийных режимов работы вращающихся деталей механизмов и машин, в том числе валов тяговых электродвигателей, двигателей внутреннего сгорания, опор качения (подшипников), а также при прогнозировании последствий аварийного останова при различных радиальных усилиях и угловых скоростях вращения с учетом имеющихся поверхностных дефектов. Процессы повреждения поверхностных слоев сопровождаются взаимодействием трущихся поверхностей качения с интенсивным их износом, обусловленным в первую очередь значительными контактными усилиями и увеличением сил трения на контакте за счет глубокого зацепления микронеровностей.

МКЭ-моделирование экстремальных условий контактного взаимодействия тел при качении позволяет определить характер влияния внешних условий нагружения на процесс деформирования и заклинивания взаимодействующих тел, а также получить физическую картину процесса повреждения и разрушения поверхностных слоев с учетом динамических эффектов [9]. Характер распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в окрестности вершины трещины на различных этапах взаимодействия контактирующих тел в условиях трения качения позволяет сделать вывод



Рис. 2. Первичная полукруглая трещина и развивающаяся от нее вторичная трещина, образовавшиеся при внедрении индентора в образец из стекла в зоне краевого эффекта (а), растровые изолинии главного напряжения σ<sub>1</sub> (б) с нанесенной траекторией РАТН S, графики изменения главных напряжений σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>, σ<sub>3</sub> на поверхности образца вдоль траектории РАТН S2 (в) при P<sub>f</sub> = 50.21 Н



Рис. 3. Бифуркация микротрещин в условиях трения качения

о возможности бифуркации микротрещин, что подтверждается результатами экспериментов (рис. 3).

#### Имитационное моделирование

Методология имитационного моделирования в механике разрушения позволяет адекватно описывать напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины и соответственно параметры механики разрушения, открывая тем самым возможность экспериментального определения трещиностойкости поврежденного элемента.

Методология имитационного моделирования направлена на экспериментальное определение трещиностойкости нестандартного образца, отражающего напряженно-деформированное состояние рассматриваемого элемента конструкции с трещиноподобным дефектом [10, 11]. В этом случае ставится две задачи, а именно обоснование геометрии и схемы нагружения нестандартного образца с трещиной, а также расчетных формул определения параметров механики разрушения этого образца для расчета трещиностойкости по данным эксперимента. Для решения поставленных задач привлекают как численные, так и экспериментальные методы. Численное и экспериментальное моделирование позволяет адекватно описывать напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины и соответственно параметры механики разрушения с учетом особенностей локального стеснения деформаций (трехосности напряжений), открывая тем самым возможность экспериментального определения трещиностойкости поврежденного трещиноподобными дефектами критически важного элемента исследуемой технической системы. С использованием метода конечных элементов и экспериментальных методов проиллюстрировано решение задач имитационного моделирования, связанных с обоснованием геометрии и схемы нагружения нестандартного образца с трещиной, а также с установлением расчетных формул параметров механики разрушения этого образца для определения трещиностойкости критически важного элемента по данным эксперимента (рис. 4) [11]. При этом использован уникальный подход, основанный на методе сепарабельных функций.



Рис. 4. Нестандартный кольцевой образец с симметричными трещинами для исследования трещиностойкости труб малого диаметра

### 2. МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА РАННИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ, РАЗРУШЕНИЙ И ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ

#### Тензочувствительные покрытия и акустическая эмиссия

Комплексное использование тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии (АЭ) при диагностике машин и конструкций повышает информативность исследований, позволяет более точно обнаружить положение дефектов, дает более полное представление о характере и степени деградации конструкционных материалов. На ранних стадиях нагружения, задолго до возникновения необратимых структурных изменений в материале конструкции, хрупкие тензопокрытия позволяют определить наиболее нагруженные зоны, конструктивно-технологические концентраторы напряжений и уровни максимальных напряжений (деформаций) по характеристикам тензочувствительности, выявлять скрытые дефекты, оказывающие заметное влияние на напряженно-деформированное состояние на поверхности изделия. После получения интегрального представления о распределении наибольших напряжений по картине трещин в хрупком покрытии и местах вероятного разрушения конструкции проводится акустико-эмиссионный контроль, в результате которого в процессе дальнейшего нагружения изделия обнаруживаются скрытые дефекты в потенциально опасных наиболее нагруженных зонах конструкции, которые невозможно было выявить при малых уровнях нагрузки с применением тензопокрытий. В ИМАШ РАН применительно к различным условиям испытаний и материалам конструкций разработаны и используют различные типы хрупких тензочувствительных покрытий, в том числе канифольные, оксидные и стеклоэмалевые, позволяющие проводить исследования в широком диапазоне пороговых деформаций и рабочих сред, температурном диапазоне от -250 °C до +400 °C.

С использованием хрупких тензоиндикаторов и акустико-эмиссионного контроля принципиально решена научная проблема мониторинга и ранней диагностики зон повреждения и вероятного разрушения металлических и композицитных материалов и оценки степени их деградации в процессе деформирования путем кластерного анализа и классификации регистрируемых при мониторинге испытываемых образцов массивов данных АЭ в режиме *онлайн* [12]. Используемый структурно-феноменологический подход и применяемая методика классификации регистрируемых при акустико-эмиссионной диагностике массивов данных АЭ позволяют в процессе деформирования материала эффективно отслеживать основные тренды накопления повреждений на всех структурных уровнях. Разработанная методика и программное обеспечение для классификации регистрируемых импульсов по таким критериям, как максимальная амплитуда, длительность, число выбросов, усредненная частота  $(N_u/t_u)$ , скорость затухания импульса  $(u_m/N_u)$ , оказались весьма эффективным инструментом для выделения из общего массива регистрируемых данных кластеров сигналов АЭ, свойственных определенным механизмам разрушения многоуровневых структур современных материалов при мониторинге диагностируемых объектов в процессе их деформирования (рис. 5). Экспериментально-расчетные исследования проводятся с использованием современной испытательной техники и вычислительных комплексов.

Разработанная методика ранней диагностики и программное обеспечение разделения регистрируемых сигналов АЭ могут быть использованы в системах многоуровневой диагностики и раннего предупреждения о возникновении и развитии опасных состояний при мониторинге сложных технических объектов.





Рис. 5. Основные параметры сигналов АЭ в полимерно-композитном образце, регистрируемые при повышении нагрузки до критического уровня

Полученные результаты исследований предполагается использовать при разработке критериев повреждения критически важных элементов конструкций, в т.ч. летательных аппаратов, изготовленных из алюминиевых сплавов, композитных материалов и сэндвич-панелей.

#### Диагностика дефектности

Методы электронно-цифровой спекл-интерферометрии (ЭЦСИ) и корреляции цифровых изображений могут быть использованы для экспериментального анализа полей перемещений в достаточно малых областях на поверхности деформируемых тел, что служит исходной информацией для решения задач о напряженно-деформированном состоянии, параметрах механики разрушения, локации и идентификации трещиноподобных дефектов [13]. Разработка и создание модернизированного спекл-интерферометра для получения информации о неоднородном деформированном состоянии поверхности реальных объектов с повышенной точностью и информативностью является одной из приоритетных задач экспериментальной механики. Исследования напряженно-деформированного состояния высокоградиентных локальных зон на микро- и макромасштабном уровнях критически важных элементов машин и конструкций могут выполняться с использованием мобильных интерферометров, функционирующих в автономном режиме. Один из созданных в ИМАШ РАН вариантов подобного модуля демонстрируется на рисунке 6.



Рис. 6. Вариант реализации компактного измерительного модуля

Одним из востребованных на практике приложений оптико-корреляционных методов является дефектоскопия деталей и элементов конструкций. Регистрация полей перемещений на поверхности объектов, имеющих скрытые дефекты, позволяет не только обнаруживать их местоположение по локальным нерегулярностям деформационного отклика на приложен-

ное тестирующее воздействие (статическое или вибрационное нагружение, нагрев), но и в результате выполнения расширенной математической обработки получаемых массивов данных выполнять оценку его геометрических параметров. Объектом исследования являлась цилиндрическая труба из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 1.5 мм, с утолщением в основании для механичного закрепления на испытательном стенде. Внутри трубы был создан искусственный дефект в виде несквозного цилиндрического про-пила, выполненного дисковой фрезой диаметром 50 мм и толщиной 2 мм. Глубина пропила составила 1.05 мм. На внешней поверхности трубы этот дефект геометрически не проявлялся. Расчетно-экспериментальная методология численной обработки данных эксперимента для определения геометрических параметров дефектов определяется следующим образом. Анализ геометрии и определение размеров конструктивных аномалий, в частности дефектов типа трещин, исходя из данных эксперимента, регистрируемых в ходе активного диагностирования, представляет собой обратную задачу механики деформируемого твердого тела. Для ее решения одним из наиболее эффективных и перспективных является общий подход, в основе которого лежит комплексное сопоставление экспериментальных данных с результатами численного решения соответствующей прямой модельной задачи, получаемыми при целенаправленной вариации искомых параметров. Все результаты такого численного решения сохраняются в единый массив данных, называемый базой деформационных откликов. База позволяет произвести решение обратной задачи для внесенных в нее параметров. Следующей задачей является сравнение экспериментально полученных данных с содержащимися в базе. Сравнение данных происходит по некоторому выбранному критерию, который является функцией или ал-горитмом, принимающим значения всех точек двух полей и возвращающим количественный параметр, выражающий сходство полей. В качестве таких функций могут выступать различные критерии, но в данной работе использовался критерий кросс-корреляции. В ходе эксперимента использовалась оптико-цифровая система Correlated SolutionsVic-3D, реализующая метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) и состоящая из двух цифровых камер Grasshopper с разрешением 1624×1224 пикселей, двух ламп подсветки и компьютера со специальным программным обеспечением. Нагружение объекта осуществляли изгибающим моментом. Спекл-структура на поверхности объекта была выполнена с помощью распыления аэрозольной краски двух цветов: белой (для образования фона) и чёрной (для создания самих спеклов). Общий вид испытательного стенда приведен на рисунке 7.

Сравниваемые поля перемещений и деформаций были получены из двух источников: МКЭ-моделирования в пакете ANSYS и эксперимента с помо-



Рис. 7. Общий вид испытательного стенда

щью КЦИ системы Vic-3D. Графическое представление корреляционного поиска двух параметров, характеризующих глубину и местоположение дефекта, иллюстрируется на рисунке 8. В результате расчетов были получены искомые параметры дефекта с погрешностью, не превышающей 10%.



Рис. 8. К определению двух параметров трещиноподобного дефекта

#### Косвенная диагностика термонапряженного состояния

Методология и основные принципы построения алгоритмов и систем косвенной диагностики термонапряженного состояния элементов машин и конструкций основываются на использовании сигналов экспериментальной системы тензометрических преобразователей, практически лишенных тепловой инерции и расположенных максимально близко к опасным точкам конструкции, месторасположение которых устанавливается при поверочных расчетах конструкции. Экспериментальная информация о напряженно-деформированном состоянии (НДС), получаемая при тензометрических исследованиях, используется для регуляризации решений, получаемых при использовании вычислительных алгоритмов, связанных в том числе с решением обратных задач теплопроводности. Схема разработанного расчетно-экспериментального алгоритма определения НДС, основанного на предлагаемой методологии, приведена на рисунке 9.



Рис. 9. Алгоритм определения НДС по разработанной расчетно-экспериментальной методологии

Пример реализации разработанного алгоритма для определения НДС патрубка ПАПВ парогенератора ПГВ-1000 при режиме подачи аварийной питательной воды приведен на рисунке 10.



Рис. 10. Изменение напряжений в опасном сечении патрубка ПАПВ, полученное расчетно-экспериментальным методом

### 3. МОДЕЛИ И КРИТЕРИИ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Фундаментальные исследования в науке о прочности, живучести и безопасности машин и конструкций при наличии трещиноподобных дефектов позволили сформировать основные положения, модели и критерии классической механики разрушения, основанной на однопараметрическом описании напряженно-деформированного состояния у вершины трещины, где в качестве единственного параметра выступает сингулярная составляющая поля напряжений, например коэффициент интенсивности напряжений, Ј-интеграл и др. Эти подходы создали базис и нашли отражение в прикладных исследованиях и разработке нормативно-технических документов практически во всех отраслях машиностроения. Тем не менее результаты последнего десятилетия в области экспериментальных исследований статической и циклической трещиностойкости, численного моделирования свидетельствуют о значительном влиянии размеров трещин и разрезов, геометрии образцов, схемы их нагружения и толщин на характеристики трещиностойкости и напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины.

Современные исследования показывают, что для расширения рамок применимости классической механики разрушения в модели и критериев разрушения необходимо введение дополнительных параметров, более полно характеризующих напряженно-деформированное состояние и отражающих локальное стеснение деформаций (или трехосность напряженного состояния) в окрестности вершины трещины. В качестве параметров локального стеснения деформаций в окрестности вершины трещины (надреза) могут быть использованы несингулярные компоненты T-напряжений, параметры Q и  $T_z$ , параметр трехосности h и другие. Заметим, что между некоторыми параметрами трехосности напряженного состояния у вершины трещины существует аналитическая связь.

Вышеотмеченные представления приводят к формированию так называемой двухпараметрической механики разрушения, учитывающей в анализе напряженно-деформированного состояния не только сингулярную компоненту поля напряжений, но и несингулярную компоненту как параметр локального стеснения деформаций у вершины трещины [1, 10]. Таким образом, становится очевидной необходимость уточнения моделей и критериев механики разрушения, базовых уравнений и методов расчета на прочность поврежденных трещинами критически важных элементов машин и конструкций с учетом двухпараметрического представления напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины.

Приведем некоторые результаты по созданию моделей и критериев двухпараметрической механики разрушения, полученные в Институте машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, а также в рамках сотрудничества с ведущими зарубежными и российскими научными центрами.

#### Зона пластической деформации у вершины трещины

Справедливости ради следует заметить, что многопараметрическое представление поля перемещений у вершины трещины в упругом теле в виде сингулярной и несингулярных компонентов в двухмерной постановке было дано Уильямсом еще в середине прошлого века и оставалось невостребованным долгие годы.

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}(1+\nu)}{E} A_n \left\{ \left[ k + \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \cos \frac{n\theta}{2} - \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta}{2} \right\},$$

$$v = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}(1+\nu)}{E} A_n \left\{ \left[ k - \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin \frac{n\theta}{2} + \frac{n}{2} \sin \frac{(n-4)\theta}{2} \right\},$$
(1)

где E — модуль упругости; v — коэффициент Пуассона; k = (3 - v)/(1 + v)и k = (3 - 4v) для плоского напряженного состояния и плоской деформации соответственно;  $A_n$  — постоянные коэффициенты; r и  $\theta$  — радиальная и угловая координаты точки в полярной системе координат с началом в вершине трещины. Асимптотическому разложению (1) соответствует следующий вид упругого поля напряжений у вершины трещины нормального отрыва:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T_{xx} \delta_{xi} \delta_{xj} + A_3 \sqrt{2\pi r} + O(r), \qquad (2)$$

где  $K_I$  — коэффициент интенсивности напряжений нормального отрыва;  $f_{ij}(\theta)$  — угловая функция, которая определяется разложением (1);  $\delta_{ij}$  — символ определителя Кронекера. Несингулярная составляющая  $T_{xx}$  разложения (2) представляет собой постоянное напряжение, которое действует в плоскости трещины в направлении ее распространения. Коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  и  $T_{xx}$ -напряжения для трещины нормального отрыва определяются из разложения (1) следующим образом:

$$K_I = A_1 \sqrt{2\pi},\tag{3}$$

$$T = 4A_2. \tag{4}$$

Третье слагаемое, которое пропорционально величине коэффициента *A*<sub>3</sub>, в ряде случаев также может вносить заметный вклад в результирующее поле напряжений (2).

В общем случае поле упругих напряжений в окрестности трехмерного фронта трещины смешанного типа (I + II) с учетом первых компонентов несингулярных членов разложения ( $T_{xx}$ - и  $T_{zz}$ -напряжений) может быть представлено в следующем виде:

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ K_{I} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right] + T_{xx},$$

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ K_{I} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right],$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ K_{I} \sin \frac{\theta}{2} \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + K_{II} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right],$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2v}{\sqrt{2\pi r}} \left[ K_{I} \cos \frac{\theta}{2} - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right] + T_{zz},$$

$$T_{zz} = E\varepsilon_{zz} + \upsilon T_{xx}.$$
(5)

Здесь x, y, z — оси локальных декартовых, связанных с вершиной трещины (рис. 11);  $K_I$  и  $K_{II}$  — коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) нормального отрыва и поперечного сдвига, соответственно;  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений (*i*, *j* = x, y, z);  $\varepsilon_{zz}$  — деформация в направлении оси z (толщины тела). Напряжения  $T_{xx}$  отражают степень стеснения деформаций перед фронтом трещины, действуют в плоскости трещины в направлении ее возможного распространения и могут быть как растягивающими, так и сжимающими.



Рис. 11. Напряженное состояние у фронта трехмерной трещины

Теоретический анализ совместного влияния несингулярных компонентов T-напряжений на размеры  $r_p$  зоны пластической деформации у вершины трещины нормального отрыва, выполненный с привлечением асимптотических формул (5), учитывающих объемность напряженного состояния у вершины трещины нормального отрыва, и критерия текучести Мизеса, приводит к следующим общим оценкам размеров зоны [14]:

$$r_{p}(\theta) = \frac{K_{I}^{2}}{\pi \sigma_{T}^{2}} f(\sigma_{T}, T_{xx}, T_{zz}, \nu, \theta), \qquad (6)$$

где  $f(\sigma_T, T_{xx}, T_{zz}, v, \theta)$  — поправочная функция на стеснение деформаций в окрестности вершины трещины. Нетрудно показать, что из полученного общего решения (6) следует частное решение для случая плоской деформации.

Приведем результаты расчета углового распределения размеров зоны пластической деформации у вершины трещины в компактном образце при варьировании отношения толщины *B* к ширине образца *W*. Коэффициент интенсивности напряжений для исследованных образцов составлял 66 МПа·м<sup>1/2</sup>, соответствующие значения компонентов *T*-напряжений приведены в таблице 1.

	B/W = 0.25	B/W = 0.40	B/W = 0.50
<i>T<sub>xx</sub></i> , МПа	186.59	182.36	176.28
<i>T<sub>zz</sub></i> , МПа	-159.47	-106.81	-84.97

Таблица 1. Компоненты Т-напряжений для исследованного компактного образца

Размеры зоны пластической деформации у вершины трещины с учетом объемного напряженного состояния (ОНС) ограничены размерами зон, соответствующих двум предельным состояниям, а именно плоскому напряженному состоянию (ПНС) и плоской деформации (ПДС) (рис. 12). Причем при увеличении толщины образца форма и размеры зон пластической деформации стремятся к зонам, характерным для условий плоской деформации. Таким образом, из результатов расчетов по формулам (15)–(24) следует необходимость учета объемности напряженного состояния у вершины трещины посредством как несингулярных напряжений  $T_{xx}$ , так и  $T_{zz}$ .

Для проверки полученных теоретических оценок размеров зоны пластической деформации проведена серия численных экспериментов с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Теоретические оценки размеров зоны пластической деформации с учетом компонентов *T*-напряжений в целом показывают удовлетворительные результаты, в особенности на линии продолжения трещины, что особенно важно при определении достоверных значений вязкости разрушения (рис. 13).



Рис. 12. Аналитический расчет углового распределения размеров зоны пластических деформаций для срединной поверхности компактного образца



Рис. 13. Сравнение результатов численного эксперимента и аналитического расчета (объемное напряженное состояние) размеров зоны пластических деформаций

#### Экспериментальное определение Т<sub>хх</sub>-напряжений

Для определения компонентов *T*-напряжений можно использовать экспериментальные методы и численное моделирование в трехмерной постановке. Следует обратить внимание, что в последнее время особенное значение приобретают комбинированные экспериментально-расчетные методы, позволяющие более корректно оценивать значения компонентов *T*-напряжений в реальных критически важных элементах машин и конструкций.

Экспериментальные методы определения как сингулярных, так и несингулярных компонентов поля напряжений главным образом основаны на представлении о поле перемещений на поверхности тела в окрестности вершины трещины (формулы (1)–(4)). В настоящее время интенсивно развиваются экспериментальные методы определения  $T_{xx}$ -напряжений, основанные на использовании тензодатчиков, фотоупругости, корреляции цифровых изображений, электронной (цифровой) спекл-интерферометрии и др. При этом в качестве исходной информации используют поле перемещений, деформаций или напряжений в окрестности вершины трещины.

Приведем некоторые результаты экспериментального определения  $T_{xx}$ -напряжений методом последовательного наращивания длины трещины [13, 15]. Исходной экспериментальной информацией служат поля приращений тангенциальных компонентов перемещений, которые регистрируются методом электронной спекл-интерферометрии (рис. 14).



Поле перемещений и



Поле перемещений v

Рис. 14. Картины интерференционных полос полей тангенциальных перемещений при наращивании длины надреза в ДКБ-образце алюминиевого сплава 2024: исходная длина надреза 18.3 мм, приращение надреза 2 мм

Эти данные интерпретируются в терминах коэффициентов асимптотических разложений (1) Уильямса с ограничением до четвертого члена в рядах, что обеспечивает определение величин коэффициентов интенсивности напряжений и Т<sub>хх</sub>-напряжений. Первой особенностью разработанного метода является отсутствие необходимости использования численных моделей, связанных с геометрическими параметрами исследуемого объекта и способом его нагружения, при интерпретации исходных экспериментальных данных. Во-вторых, наличие картин интерференционных полос, зарегистрированных непосредственно в окрестности вершины трещины, служит надежным индикатором типа напряженного состояния. Таким образом, формулы для перехода от измеряемых величин к требуемым параметрам механики разрушения принимают достаточно простой и наглядный вид. Пример зависимости коэффициента интенсивности напряжений и Т-напряжений от длины последовательно наращиваемого (посредством пропиливания) U-образного надреза различного радиуса скругления его вершины ρ в ДКБ-образце алюминиевого сплава 2024 представлен на рисунке 15.



Рис. 15. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений (а) и *T*-напряжений (б) при увеличении длины U-образного надреза в нестандартном ДКБ-образце алюминиевого сплава 2024: *1* — *ρ* = 0.15 мм; *2* — *ρ* = 0.5 мм

Особый интерес представляет использование разработанного подхода для анализа напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в поле остаточных напряжений.

#### Численное определение компонентов Т-напряжений

Численный конечно-элементный анализ трехмерного напряженно-деформированного состояния в окрестности фронта трещины позволяет установить компоненты напряжений (или перемещений), исходя из которых представляется возможным определить коэффициенты интенсивности напряжений трещины смешанного типа:

$$K_{I} = \sqrt{\frac{\pi r}{2}} \left( 2\sigma_{xx} \mid_{\theta=0} -\sigma_{xx} \mid_{\theta=-\pi} -\sigma_{xx} \mid_{\theta=+\pi} \right), \tag{7}$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{\pi r}{8}} \left( \sigma_{xx} \mid_{\theta = -\pi} - \sigma_{xx} \mid_{\theta = +\pi} \right).$$
(8)

При этом расчет *T*<sub>xx</sub>-напряжений может осуществляться по напряжениям на берегах трещины по формуле

$$T_{xx} = \frac{1}{2} \Big[ \sigma_{xx} \Big|_{\theta = -\pi} + \sigma_{xx} \Big|_{\theta = +\pi} \Big], \tag{9}$$

полученной из соотношений (5), или по перемещениям точек берегов трещины:

$$T_{xx} = \frac{E}{2r(1-v^2)} \Big[ u(r,-\pi) + u(r,\pi) \Big].$$
(10)

Аналогичным образом по соответствующим напряжениям могут быть определены *T*<sub>zz</sub>-напряжения:

$$T_{zz} = \frac{1}{2} \Big[ \sigma_{zz} \Big|_{\theta = -\pi} + \sigma_{zz} \Big|_{\theta = +\pi} \Big]$$
(11)

или по  $T_{xx}$ -напряжениям и деформациям  $\varepsilon_{zz}$  (формула (5)).

Как при определении КИН, так и при расчетах несингулярных напряжений  $T_{xx}$  и  $T_{zz}$  определяют распределение искомых величин для ряда точек (узлов), расположенных в плоскости, ортогональной к фронту трещины ( $T_{ij}(r)$ ), которое затем экстраполируется в вершину трещины (точку r = 0).

Приведем результаты [16] использования вышеприведенной процедуры трехмерного конечно-элементного моделирования при определении компонентов *T*-напряжений вдоль фронта поверхностной полуэллиптической трещины в упругом полупростанстве в условиях действия двухосного растяжения напряжениями  $\sigma_x = 100$  MPa и  $\sigma_y = 200$  MPa (рис. 16). Плоскость поверхностной трещины длиной 2a = 20 мм и глубиной b = (2/3)a = 6.67 мм ориентирована перпендикулярно действию напряжений  $\sigma_y$ . Несингулярные компоненты *T*-напряжений претерпевают значительные изменения вдоль фронта трещины (рис. 17). При этом компонента несингулярных напряже-



Рис. 16. Поверхностная полуэллиптическая трещина в упругом полупространстве: (а) схема нагружения; (б) локальная система координат; (в) МКЭ-модель

ний  $T_{zz}$  в отличие от  $T_{xx}$ -напряжений, достигает максимума в центре фронта полуэллиптической трещины (локальная координата s = 0), уменьшаясь при приближении к поверхности тела.

# Критерий разрушения двухпараметрической механики разрушения

Использование критерия осреднения нормальных напряжений в зоне предразрушения перед вершиной U-образного выреза в современной трактовке позволило сформулировать критерий разрушения и предложить критериальное уравнение обобщенной диаграммы трещиностойкости (failure assessment diagram — FAD) в следующем виде [1, 10]:

$$K_{notch} = K_{Nmat} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{C}}{\sigma_{0}}\right)^{2}}.$$
 (12)



Рис. 17. Распределение коэффициента интенсивности напряжений (а) и компонентов *Т*-напряжений (б) вдоль фронта поверхностной полуэллиптической трещины: 1 — *T<sub>xx</sub>* 2 — *T<sub>zz</sub>* 

Здесь  $K_{notch}$  — коэффициент интенсивности напряжений в вершине U-образного выреза в условиях нормального отрыва,  $\sigma_0$  — локальная прочность материала, названная в более ранних работах автора когезионной прочностью,  $\sigma_c$  — приложенные разрушающие напряжения.

Вязкость разрушения при наличии выреза *К*<sub>Nmat</sub> определяется по формуле

$$K_{Nmat} = K_{mat} \left[ 1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_c}\right)^2 \frac{1}{K_t^2} \right]^{-1/2}, \qquad (13)$$

31

где  $K_{mat}$  — вязкость разрушения в условиях максимального стеснения деформаций в вершине трещины.

В качестве локальной прочности  $\sigma_0$  материала у вершины трещины (разреза) приняты главные напряжения  $\sigma_1$ , которые могут быть представлены из критерия Мизеса в виде

$$\sigma_{0} = -\frac{T}{2} + \sigma_{T} \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{T}{\sigma_{T}}\right)^{2} - \frac{(1 + \nu^{2} - \nu)(T / \sigma_{T})^{2} - 1}{(1 - 2\nu)^{2}}}$$
(14)

для плоской деформации и

$$\sigma_0 = -\frac{T}{2} + \sigma_T \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{T}{\sigma_T}\right)^2}$$
(15)

для плоского напряженного состояния, где  $\sigma_T$  — предел текучести. Здесь и далее, упрощая процедуру записи, под *T*-напряжениями будем понимать  $T_{xx}$ -напряжения. Безусловно, в этих формулах под *T*-напряжениями следует понимать их критические значения, соответствующие состоянию разрушения тела с трещиной. В случае тел конечных размеров и различных схем нагружения для оценки *T*-напряжений вводится безразмерный параметр двухосности  $\beta$ . Параметр  $\beta$  может рассматриваться как мера стеснения деформаций в зоне предразрушения у вершины трещины. Параметр двухосности  $\beta$  табулирован [1], а также представлен в виде графиков для тел разной геометрии и схемы нагружения.

В критериальном уравнении (12) обобщенной диаграммы трещиностойкости степень стеснения деформаций представлена параметром локальной двухосности  $\beta(l/B)=T/\sigma_{C}$ , основанным на учете несингулярной составляющей (Т-напряжения) в распределении напряжений у вершины трещины, введенной в формулу для локальной прочности, и теоретическом коэффициенте концентрации напряжений *K*<sub>t</sub> в вершине выреза согласно формуле (13). При этом полагаем, что изменение степени стеснения деформаций в зоне предразрушения у вершины выреза обусловлено двумя независимыми факторами: конечностью радиуса скругления вершины выреза и несингулярной составляющей напряжений. Рассматривая трещину как специальный случай выреза ( $K_t \rightarrow \infty$ ), приходим к выводу, что вязкость разрушения *K*<sub>Nmat</sub> переходит в вязкость разрушения при наличии трещины *K*<sub>*mat*</sub> и *K*<sub>*notch*</sub> переходит в КИН тела с трещиной. Становится справедливым критериальное уравнение для тела с трещиной. Различие этих двух случаев (вырез или трещина) обусловлено лишь различием в вычислении вязкости разрушения и положением соответствующей отображающей точки на обобщенной диаграмме трещиностойкости.

Достоверность критериального уравнения (12) диаграммы трещиностойкости обсуждена на примере анализа результатов испытаний одноосно нагруженных тонких пластин с центральными сквозными трещинами. Анализ экспериментальной зависимости  $\sigma_c - a$  и экспериментальных значений критических коэффициентов  $K_I$  для тонких пластин алюминиевых сплавов Д16Т-1, В-95 и АКЧ-1 с центральными сквозными трещинами в условиях одноосного растяжения позволил сделать вывод о незначительном различии расчетных значений вязкости разрушения  $K_{mat}$  по предлагаемой методике и методике SINTAP. Поэтому в целях сопоставления результатов расчетов по этим методикам с экспериментальными данными приведем диаграмму трещиностойкости и скорректированную вязкость разрушения  $K_{mat}^c$  в относительных координатах, используя значения  $K_{mat}$ , полученные на основе уравнения (12) (рис. 18).



Рис. 18. Диаграмма обобщенной трещиностойкости и скорректированная вязкость разрушения тонких пластин с центральными сквозными трещинами в условиях одноосного растяжения при температуре 293 К

Приведенные данные подтверждают достоверность предложенного критериального уравнения диаграммы трещиностойкости и скорректированной вязкости разрушения, по крайней мере в случае одноосного растяжения.

Альтернативный подход к учету несингулярных *T*-напряжений в механике разрушения тел с вырезами может быть основан на установлении зависимости вязкости разрушения от эффективных *T*-напряжений [17]. Конечно-элементный анализ показывает, что *T*-напряжения перед вершиной выреза не являются постоянными (рис. 19). Вводится понятие эффективных *T*-напряжений,  $T_{eff} = \frac{1}{X_{eff}} \int_{0}^{x_{eff}} T_{xx}(r) \Phi(r) dr$ , определяемых посредством



Рис. 19. Распределение *Т*-напряжений перед вершиной надреза на линии его продолжения (трубной стали API X52)

осреднения *T*-напряжений перед вершиной выреза в зоне предразрушения, характеризуемой эффективным размером *X*<sub>eff</sub>.

Эффективное расстояние  $X_{eff}$  соответствует минимуму градиента растягивающих напряжений перед вершиной выреза и определяется методом конечных элементов. Критический коэффициент интенсивности напряжений в вершине выреза представляют в виде

$$K_{Nmat} = \sigma_{eff} \sqrt{2\pi X_{eff}}, \qquad (16)$$

где  $\sigma_{eff}$  — эффективные напряжения перед вершиной выреза на линии его продолжения, рассчитываемые аналогично  $T_{eff}$ .

Корректность расчетной модели определения эффективных *T*-напряжений и вязкости разрушения  $K_{Nmat}$  подтверждена результатами экспериментов с использованием тензометрического метода.

Исследования влияния критических эффективных *T*-напряжений на вязкость разрушения  $K_{Nmat}$  для трубной стали выполнены по экспериментально установленным разрушающим нагрузкам для следующих типов образцов с надрезами различной относительной длины (a/W) и радиусом вершины 0.25 мм: компактного образца, образца с краевым надрезом в условиях растяжения, ДКБ-образца и нестандартного арочного образца в условиях изгиба. Распределение *T*-напряжений перед вершиной выреза на линии его продолжения определяли как  $T = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})_{\theta=0}$ . Рассчитанные эффективные *T*-напряжения изменялись в диапазоне  $-0.8\sigma_T \leq T_{eff} \leq +0.2\sigma_T$ .

Базовая зависимость (мастер-кривая)  $K_{Nmat} = f(T_{eff})$  для данной геометрии надреза и материала приведена на рисунке 20. В отличие от уравнения (13) вязкости разрушения при наличии выреза, функционально объединяющем



Рис. 20. Экспериментальные значения вязкости разрушения  $K_{Nmat}$  и мастер-кривая  $K_{Nmat} = f(T_{eff,c})$  трубной стали API X52: 1 — компактный образец (a/W = 0.3, 0.5), 2 — образец с краевым надрезом в условиях растяжения (a/W = 0.5); 3 — нестандартный арочный образец в условиях изгиба (a/W = 0.4, 0.5, 0.6); 4 — ДКБ-образец (a/W = 0.5)

эффекты концентрации напряжений и несингулярных *Т*-напряжений, мастер-кривая предполагает раздельный анализ этих эффектов.

#### Прогнозирование траектории трещины

В настоящее время для описания хрупкого разрушения и траектории трещины в хрупких материалах привлекают различные критерии механики хрупкого разрушения. Например, критерии максимальных тангенциальных напряжений и минимальной плотности энергии деформации обычно используют для анализа роста трещины в контактной области. Следует отметить, что отмеченные критериальные подходы учитывают влияние только коэффициентов интенсивности напряжений трещины нормального отрыва  $K_I$  и поперечного сдвига  $K_{II}$ . В рамках двухпараметрической механики разрушения предложен модифицированный критерий максимальных тангенциальных напряжений [10, 18], учитывающий влияние несингулярных компонентов напряжения (*T*-напряжений) у вершины трещины.

Рассмотрим возможность применения критерия максимальных осредненных тангенциальных напряжений в окрестности вершины трещины для поиска траектории поверхностной трещины смешанного типа при действии контактных нагрузок в условиях трения скольжения и наличия смазочного материала. Постулируется, что рост трещины начинается вдоль радиуса ее скругленной вершины, перпендикулярно действию максимальных тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta\theta}$ . Учитывая уравнение для тангенциальных уравнений в окрестности вершины трещины смешанного типа (I и II) и усредняя их по зоне процесса разрушения, получаем критерий максимальных осредненных тангенциальных напряжений для определения направления роста наклонной трещины в условиях контактных нагрузок и давления смазочного материала на поверхности трещины в виде

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = K_I \sin \theta + K_{II} (3\cos \theta_0 - 1) + \frac{4}{3} \sqrt{2\pi d} \sigma_{xy}^c \frac{\cos 2\theta_0}{\cos \frac{\theta_0}{2}} - \frac{8}{3} (T - \sigma_{yy}^c) \sqrt{2\pi d} \cos \theta_0 \sin \frac{\theta_0}{2} = 0,$$
(17)

где  $\theta_0$  — угол, характеризующий направление роста трещины относительно исходной ее ориентации;  $\sigma_{xy}^c$  и  $\sigma_{yy}^c$  — касательные и нормальные напряжения в окрестности трещины, вызванные контактным давлением на поверхность трещины, в частности давлением смазывающего материала; d — размер зоны процесса разрушения в окрестности вершины трещины, который для каждого прироста трещины рассчитывается из условия  $\overline{\sigma}_{\theta\theta} = \sigma_0$  и  $\theta = 0^\circ$ , т. е.

$$T \cdot \sin^{2}(\theta_{0}) - \sigma_{xy}^{c} \cdot \sin(2 \cdot \theta_{0}) + \sigma_{yy}^{c} \cdot \cos^{2}(\theta_{0}) + \cos\left(\frac{\theta_{0}}{2}\right) \cdot \left[K_{I} \cdot \cos^{2}\left(\frac{\theta_{0}}{2}\right) - \frac{3}{2} \cdot K_{II} \cdot \sin(\theta_{0})\right] \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi d}} = \sigma_{0}.$$
(18)

Здесь  $\sigma_0$  — предельные локальные напряжения, действующие в зоне процесса разрушения.

Рассмотрим модель распространения наклонной поверхностной трещины в условиях воздействия контактных нагрузок на примере шестеренки [19]. Реальная геометрия зубцов шестеренок (рис. 21, a) может быть представлена в виде модели, состоящей из пары подобных контактирующих цилиндров (рис. 21, b) с радиусами, соответствующими радиусам искривления исследуемых элементов. В дальнейшем эти цилиндры заменяют подобными цилиндрами (рис. 21, b), для которых нормальное распределение контактного давления p(x) выражается с помощью известных аналитических уравнений.



Рис. 21. Представление геометрии шестеренок в виде эквивалентной модели

Для изучения влияния контактной нагрузки на направление роста поверхностной трещины рассматривается пять возможных вариантов положения зоны контакта, создающих различное напряженное состояние в окрестности вершины трещины (рис. 22). Во всех вариантах распределения нормальных p(x) и тангенциальных q(x) контактных нагрузок одинаковы для различных положений зоны контакта по отношению к краям трещины.

Использованы следующие данные для расчета направления роста наклонной трещины начальной длины 20 мкм, с углом наклона  $\beta = 20^{\circ}$ : максимальная величина давления, размер пятна контакта, предел текучести, коэффициенты интенсивности напряжения нормального отрыва и поперечного сдвига и *T*-напряжения.

Увеличение трения приводит к некоторому росту угла распространения трещины лишь при положении зоны контакта  $x_0/b = 0.93$ . Значительное влияние на направление распространения трещины оказывает положение зоны контакта относительно трещины (рис. 23). Максимальный угол наблюдается при достижении зоной контакта устья трещины. Дальнейшее



Рис. 22. Моделирование движущейся зоны контакта в окрестности наклонной трещины



Рис. 23. Зависимость угла распространения трещины  $\theta_0$  от положения пятна контакта  $x_0/b$  для различных значений коэффициента трения  $\mu$ 

перекрытие зоной контакта устья трещины приводит к уменьшению угла распространения трещины относительно исходной ориентации трещины. Такая тенденция угла распространения трещины связана прежде всего со значительным уменьшением несингулярных *Т*-напряжений и коэффициента интенсивности напряжений поперечного сдвига *К*<sub>II</sub> при незначительном изменении коэффициента интенсивности напряжений нормального отрыва *К*<sub>I</sub>.

### 4. ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Современная механика разрушения является важной составляющей в решении инженерных и технологических проблем машиностроения при создании материалов с повышенными служебными характеристиками и оптимальным сочетанием прочности, трещиностойкости и живучести, а также при обосновании требований к созданию приборного и аппартного обеспечения для локации и дефектометрии поврежденных трещинами машин и конструкций при условии безопасности критически важных элементов машин и конструкций при наличии допускаемых (безопасных) трещиноподобных дефектов.

#### Безопасные состояния элементов при наличии трещиноподобных дефектов

Двухпараметрический критерий разрушения, основанный на осреднении напряжений перед вершиной выреза, может быть успешно адаптирован и применен к конструкциям с трещиноподобными дефектами для анализа их живучести и возможности продления ресурса при сохранении требований безопасности (рис. 24) [1, 10, 12]. Это достигается введением в критериальное уравнение обобщенной диаграммы трещиностойко-



Рис. 24. Схема предельных и безопасных состояний критически важных элементов по критериям трещиностойкости и живучести

сти (12) коэффициента безопасности (запаса по трещиностойкости)  $m_{FAD}$ , уменьшающего критериальную характеристику механики разрушения (трещиностойкость) и тем самым уменьшающего размер критического дефекта  $a_c$  до безопасного размера [a] при фиксированном расчетном напря-

жении (нагрузке)  $\sigma_p \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}$ . Здесь  $[\sigma]$  — допустимое напряжение,  $n_T$  — коэффициент запаса по пределу текучести.

В отличие от остроконечной трещины с радиусом скругления ее вершины  $\rho \rightarrow 0$ , вершина плоскостного трещиноподобного дефекта имеет конечный радиус и может рассматриваться как тупая трещина. В этом случае допустимое (или расчетное) напряжение оказывается связанным с безопасным размером дефекта уравнением вида

$$K_{notch} \leq \frac{K_{mat}}{m_{FAD}} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_0}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_p}\right)^2 \frac{1}{K_t^2}\right]^{-1/2},\tag{19}$$

которое позволяет установить область безопасных состояний конструкции на диаграмме трещиностойкости. Отметим, что расчетное уравнение для определения безопасных размеров трещины не будет содержать теоретический коэффициент концентрации напряжений, так как в этом случае  $K_t \rightarrow \infty$ .

В общем случае искомый коэффициент безопасности при наличии дефекта определяется следующим соотношением:

$$m_{FAD} = n_T \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_T / n_T}{\sigma_0}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2 \frac{1}{K_t^2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_0}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T / n_T}\right)^2 \frac{1}{K_t^2}}}$$
(20)

и зависит не только от механической характеристики материала (предела текучести), но и от геометрических параметров дефекта (коэффициента концентрации напряжений  $K_t$ ) и принятого в расчетной схеме коэффициента запаса по пределу текучести.

При  $K_t \rightarrow \infty$  трещиноподобный дефект трансформируется в трещину и коэффициент безопасности  $m_{FAD}$  асимптотически стремится к минимальному значению, характерному для трещины.

#### Допустимые размеры дефектов в сосудах давления и трубопроводах

Проиллюстрируем методику оценки безопасного (допустимого) размера дефекта на примере протяженного поверхностного U-образного дефекта,

расположенного на внешней поверхности вдоль оси обечайки сосуда давления [20, 21]. Рассмотренный выше подход позволяет установить допустимый теоретический коэффициент концентрации напряжений [ $K_t$ ], сопоставление с которым коэффициента  $K_t$  для реального дефекта, постулируемого или обнаруженного в конструкции, дает область безопасных дефектов.

Поскольку допустимый коэффициент  $[K_t]$  является функцией как допустимой длины (глубины) дефекта [a], так и допустимого радиуса скругления  $[\rho]$  его вершины, то в общем случае задача определения безопасных плоскостных трещиноподобных дефектов может сводиться к определению безопасного размера дефекта при заданном (безопасном) радиусе скругления его вершины либо к определению безопасного радиуса скругления вершины дефекта при заданном (безопасном) его линейном размере.

Коэффициенты концентрации напряжений  $K_t$  рассчитывали для протяженного поверхностного U-образного дефекта глубиной *а* и радиусом скругления вершины  $\rho$ , расположенного на внешней поверхности вдоль оси обечайки сосуда, изготовленного из стали 09Г2С и нагруженного внутренним давлением 6 МПа. Внутренний диаметр сосуда составляет 1200 мм, толщина стенки равна 30 мм, прибавка для компенсации коррозии составляла 3 мм. Для расчета напряженно-деформированного состояния использовали конечно-элементный пакет ANSYS (рис. 25).



Рис. 25. Конечно-элементная модель в вершине осевого выреза в обечайке сосуда

На основе МКЭ-анализа напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины протяженного поверхностного U-образного дефекта в обечайке сосуда давления получены теоретические коэффициенты концентрации напряжений  $K_t$  для рассматриваемых дефектов различной



Рис. 26. Область (I) допустимых коэффициентов [*K*<sub>t</sub>] для протяженного осевого поверхностного дефекта в обечайке сосуда давления из стали 09Г2С: *1* — *a* = 3.5 мм, *2* — *a* = 7.5 мм, *3* — *a* = 10.5 мм. Допустимый радиус [ρ] скругления вершины дефекта принят равным 0.4 мм

глубины и вершины радиуса скругления дефекта. Предложена приближенная комбинированная формула расчета коэффициента  $K_t$ , включающая теоретический коэффициент концентрации напряжений для плоскости неограниченных размеров со сквозным разрезом и поправочную функцию на глубину дефекта. Для рассматриваемого примера область допустимых теоретических коэффициентов концентрации напряжений на диаграмме  $K_t - \rho$ ограничена линиями допустимого коэффициента  $[K_t]$  и допустимого радиуса  $[\rho]$  (область 1 на рис. 26). Из рисунка следует, что к допустимым дефектам можно отнести дефекты глубиной меньше допустимого [a] = 10.23 мм, с радиусом скругления вершины  $\rho \ge 0.4$  мм. В то же время для допустимого дефекта глубиной 10.5 мм радиус скругления вершины должен превышать ~ 0.57 мм (см. рис. 26).

Применение обобщенной диаграммы трещиностойкости, определяемой в экспериментах на трубах (рис. 27), оказывается также эффективным при анализе области безопасных состояний газопроводов при наличии трещиноподобных коррозионных дефектов [22]. При этом в рассмотрение вводятся возможные вероятности разрушения газопровода, варьируемые от 1 до 10<sup>-6</sup> и устанавливающие соответствующие коэффициенты безопасности в детерминированной диаграмме трещиностойкости, выделяя тем самым области безопасных состояний (рис. 28).



Рис. 27. Испытание трубы под внутренним давлением для определения обобщенной диаграммы трещиностойкости



Рис. 28. Области безопасных состояний поврежденного коррозионными дефектами газопровода на обобщенной диаграмме трещиностойкости с учетом вероятности разрушения

Установление безопасных (допустимых) размеров поверхностных дефектов позволяет оптимизировать требования к созданию и использованию приборного и аппаратного обеспечения для дефектоскопического контроля и диагностики сосудов и трубопроводов с позиций минимально необходимого размера дефектов для соблюдения условий безопасности.

# Моделирование пневматических и гидравлических испытаний нефтепроводов

При вводе в эксплуатацию новых систем нефтепроводов предусмотрено проведение испытаний на прочность и герметичность под действием внутреннего статического давления, превышающего рабочее давление. При этом в качестве рабочей среды используют жидкость, чаще всего воду. Однако при низких температурах окружающей среды или при отсутствии достаточного количества воды (или иной жидкости) необходимого качества гидравлические испытания нефтепроводов невозможны. В качестве альтернативного вида испытаний нефтепроводов «Восточная Сибирь – Тихий океан» (ВСТО) были рекомендованы пневматические испытания, в которых в качестве рабочей среды возможно использование воздуха. Опыт проведения пневматических испытаний нефтепроводов в России не регламентирован и практически отсутствует. Учитывая сложности экспериментального исследования замены гидравлических испытаний нефтепроводов пневматическими испытаниями с учетом низких температур окружающей среды и взаимодействия трубопровода с грунтом, было проведено физико-математическое моделирование напряженно-деформированного и предельного состояния нефтепровода, находящегося в грунте при отрицательных температурах окружающей среды и в условиях постоянного внутреннего давления рабочей среды (воды или воздуха) (рис. 29) [23].



Рис. 29. Векторное поле скоростей истекающего воздуха из трещины в грунт при пневматических испытаниях. Максимальная скорость радиального расширения трубы достигает 157 м/с

По результатам моделирования установлено, что при заданном испытательном внутреннем давлении, составляющем 1.25 от рабочего давления, результаты расчетов НДС участка трубы с поверхностным осевым дефектом при гидравлических и пневматических испытаниях практически не отличаются. При больших давлениях за счет более высокого уровня запасенной потенциальной энергии при пневматических испытаниях отмечаются на 20–50% более высокие напряжения в зоне дефекта, и разрушение при пневматических испытаниях происходит уже при давлении около 12 МПа, соответствующем 1.35 от заданного давления пневматических испытаний. При гидравлических испытаниях разрушение носит локализованный характер и наблюдается при давлениях, превышающих 26 МПа.

#### «Конструирование» материалов с повышенными служебными характеристиками и модификация поверхности

Фундаментальные исследования кинетики микроструктурно и физически коротких трещин позволяют анализировать циклическую трещиностойкость и долговечность твердых тел на ранних стадиях повреждений и, несомненно, способствуют созданию конструкционных материалов с повышенной живучестью [1]. Такое «конструирование» достигается как посредством формирования различной структуры металла в поверхностных и внутренних объемах металла, так и направленной анизотропией с учетом вида нагружения. Так, например, из анализа уравнения роста микроструктурно коротких трещин, распространяющихся, как правило, с поверхности, следует целесообразность формирования мелкозернистой структуры материала в поверхностном слое, что снижает скорость их роста, а следовательно, повышает долговечность.

Наличие водорода в циркониевых сплавах при определенных условиях приводит к образованию гидридов перед вершиной трещины (рис. 30), что значительно снижает критический коэффициент интенсивности напряжений, вызывая преждевременное хрупкое разрушение конструкций.



Рис. 30. Образование гидридов перед вершиной трещины в циркониевом сплаве Zr-2.5Nb

В качестве критерия растрескивания гидрида использован локальный силовой критерий разрушения [1]. Локальные максимальные напряжения возникают в некоторой точке гидрида, расположенной на критическом расстоянии от вершины трещины. Эти напряжения представлены в виде суперпозиции напряжений: напряжения растяжения от действия внешних напряжений и напряжения сжатия, вызванного образованием гидрида. Для установления локальных максимальных растягивающих напряжений в зоне предразрушения, размера зоны предразрушения, раскрытия в вершине трещины и критического расстояния развита модель Дагдейла – Леонова – Панасюка – Баренблатта. Разработанная модель позволила прогнозировать пороговый коэффициент интенсивности напряжений *K*<sub>IH</sub> при реализации механизма замедленного гидридного растрескивания циркониевых сплавов.

Модель предсказывает экспериментально наблюдаемую температурную зависимость порогового коэффициента интенсивности напряжений, являющегося функцией как предела текучести, так и упругих и кристаллографических свойств сплава, таких как модуль упругости и коэффициент Пуассона. Кроме того, использование локального критерия разрушения впервые позволило теоретически оценить вязкость разрушения гидридов в широком диапазоне температур. Было показано, что улучшение трещиностойкости циркониевых сплавов при наличии гидридов может быть достигнуто посредством увеличения коэффициента Пуассона и отношения модуля упругости к пределу текучести циркониевой матрицы. Благоприятным фактором повышения  $K_{IH}$  также являются микроструктура и кристаллографические особенности сплава, способствующие формированию гидридов большей толщины.

Обеспечение живучести и безопасности объектов машиностроения может быть достигнуто посредством использования перспективных материалов с низкой дефектностью, а также материалов, удовлетворяющих требованиям безопасности и живучести. Эти требования могут быть представлены расчетными уравнениями, устанавливающими области безопасности и живучести поврежденных трещинами технических систем. Анализ допустимых критериальных характеристик механики трещин и скоростей роста усталостной трещины позволяет выбрать максимально рациональные (с точки зрения безопасности и живучести, а следовательно, и ресурса безопасной эксплуатации) сочетания механических характеристик. Проиллюстрируем запись таких условий в рамках концепции *J*-интеграла [1]:

$$[J] \to \max \frac{J_c}{\left(n_\sigma \frac{\sigma_T}{\sigma_B}\right)^{\frac{1+m}{m}}}, \quad [V] \to \max \frac{V^*}{\left(n_\sigma \frac{\sigma_T}{\sigma_B}\right)^{\frac{(1+m)n}{m}}}.$$
 (21)

Важно отметить, что в соотношения (21), наряду с характеристиками трещиностойкости  $J_c$ ,  $V^*$ , n и коэффициентом запаса по пределу прочности, входят механические свойства материала, характеризующие диаграмму деформирования материала, т.е. отношение предела текучести к пределу прочности  $\sigma_T/\sigma_B$  и показатель деформационного упрочнения материала m. Несомненно, что для выбора максимально рациональной комбинации механических свойств материалов с точки зрения безопасности, живучести и ресурса потребуется обширный банк данных по характеристикам деформирования, прочности и трещиностойкости конструкционных материалов.

В рамках энергетических представлений о процессе нестабильного развития трещин модель разрушения и энергетический баланс для критической прямолинейной трещины в форме узкого эллипса учитывают, что энергия поверхностных напряжений включает в себя работу, необходимую не только для образования новых поверхностей, но и для деформации (расширения) поверхности твердого тела, т.е. учтена разница между удельной энергией поверхностных напряжений и удельной поверхностной энергией твердого тела согласно термодинамической трактовке Гиббса. Таким образом, свойства поверхности твердого тела оказывают значительное влияние на инициирование и распространение трещины, в т.ч. при наличии коррозионно-активных сред. В связи с вышесказанным модификация поверхности является важным инструментом повышения ресурса, живучести и безопасности критически важных элементов машин и конструкций. В ИМАШ РАН разработана и апробирована уникальная методика модификации поверхности посредством газодинамического напыления покрытий на основе меди, цинка и никеля (рис. 31) [24].



Рис. 31. Газодинамическое напыление меди (а), цинка и никеля (б)

### 5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Развитие приоритетных направлений в системе подходов к прогнозированию, обеспечению и повышению прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности машин и конструкций в междисциплинарных проблемах машиностроения обусловлено постановкой и проведением фундаментальных исследований по разработке комплексных и многостадийных моделей, локальных критериев разрушения на различных масштабно-структурных уровнях, методов нормирования прочности, надежности, живучести и безопасности машин и конструкций. Проводимые исследования базируются на физико-математическом и имитационном моделировании; комбинированных экспериментально-расчетных методах анализа напряженно-деформированного и предельного состояний, в т.ч. при наличии дефектов типа трещин и разрезов; комплексном мониторинге процессов нагружения и повреждения критически важных элементов машин и конструкций. Кроме того, привлечение развиваемых современных многопараметрических моделей, критериев механики разрушения представляется также весьма актуальным для решения современных технологических проблем.

В рамках перспективных научных проблем, направленных на создание прорывных технологий в машиностроении, на базе полученных в ИМАШ РАН результатов фундаментальных и прикладных разработок представляется возможным создание мощного импульса в проведении следующих фундаментальных и прикладных исследований:

- создание интеллектуальных конструкций на основе современных многостадийных моделей и критериев механики разрушения и живучести, физико-математического и имитационного моделирования, мониторинга и диагностики напряженно-деформированного состояния, повреждений, дефектности и деградации свойств конструкционных материалов в реальном режиме времени;
- разработка наукоемких технологий модификации поверхности критически важных элементов объектов машиностроения и «конструирование» перспективных материалов для повышения характеристик износостойкости, ресурса и живучести, имеющих большое значение при создании технологий снижения риска разрушений;
- разработка современных моделей и локальных критериев механики разрушения композитных материалов и критически важных элементов машин и конструкций в поврежденных состояниях, а также их диагностика.

Проиллюстрируем технологию создания интеллектуальных конструкций на примере перспективного авиационного комплекса, предполагающую междисциплинарный характер проводимых исследований в тесном сотрудничестве с предприятиями авиационно-космического комплекса. Решение сформулированной проблемы связанно с исследованием механизмов и разработкой моделей и многопараметрических критериев ранних повреждений металлических и композитных материалов, созданием методов комплексного мониторинга повреждений критически важных высокоградиентных зон элементов конструкций в реальном режиме времени, созданием методологии, программного обеспечения и средств для оценки и прогнозирования остаточной прочности и ресурса критически важных элементов конструкций, базирующихся на обработке результатов непрерывного мониторинга технического состояния, осуществляемого на основе комбинированной системы, использующей волоконно-оптические брэгговские решетки.

Материальным базисом методологии мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) и дефектности композитных конструкций служит комплекс специализированных встроенных сенсорных систем, использующих волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решеток, а также специализированное оборудование и программное обеспечение (рис. 32).

Возможность совместного применения методов определения параметров НДС и регистрации АЭ, основанных на единой технологии (волоконно-оптической), позволяет оперативно и точно выявлять не только области опасной концентрации напряжений, но и зоны появления ранних локальных повреждений и дефектов (поверхностных и внутренних). При этом расширенная физико-математическая интерпретация данных, поступающих непосредственно с сенсоров системы, в терминах НДС, деградации свойств, возникновения и развития повреждений представляет собой сложную обратную задачу механики деформируемого твердого тела, корректное и эффективное решение которой требует развития соответствующей теоретической и компьютерной методологии на основе современных многопараметрических моделей и критериев механики разрушения, позволяющих прогнозировать остаточную прочность и живучесть критически важных элементов интеллектуальных конструкций (рис. 33).

Многоуровневая диагностика повреждений, основанная на комплексном подходе и не имеющая в мировой практике аналогов, позволит с высокой степенью надежности контролировать весь процесс деформирования изделия, начиная от упругих деформаций и практически до момента разрушения. При этом с использованием разработанных критериев распознава-



Рис. 32. Применение волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток



Рис. 33. Остаточная прочность и живучесть интеллектуальной конструкции с учетом нагруженности и имеющихся дефектов

ния источников сигналов АЭ, графиков активности и локации источников сигналов можно выявлять зоны с высоким уровнем деградации свойств материала, наблюдать динамику процесса разрушения структуры композитного материала, прогнозировать предельные уровни нагрузки и сроки эксплуатации интеллектуальной конструкции.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая постановка и решение системных фундаментальных задач безопасности и риска объектов машиностроения основаны на учете их прямой количественной связи с постановкой задач прочности, ресурса, надежности и живучести. В рамках этих представлений с общих позиций сформулированы расчетно-экспериментальные подходы к анализу ресурса, живучести и безопасности машин и конструкций, включающие: комплексный анализ прочности, ресурса, живучести и безопасности; комплексные многопараметрические модели и критерии нелинейной механики разрушения; применение методов экспериментального определения характеристик нелинейной механики разрушения на нестандартных образцах и элементах натурных конструкций; мониторинг и диагностику повреждений и разрушений, локацию трещиноподобных дефектов; физико-математическое и имитационное моделирование; инженерно-технологические аспекты современной механики разрушения.

Значительное внимание уделено перспективному направлению, связанному с физико-математическим и имитационным моделированием нелинейных процессов деформирования, повреждений и разрушения конструкционных материалов и критически важных элементов объектов машиностроения при экстремальных физико-механических условиях нагружения. При этом приоритет отдается комбинированному экспериментально-численному моделированию в трехмерных задачах механики деформирования и разрушения.

Предложены методология и основные принципы построения алгоритмов и систем косвенной диагностики термонапряженного состояния элементов конструкций, в рамках которых разработана программа решения обратных задач теплопроводности для анализа напряженного состояния в связи с оценкой прочности и ресурса атомного энергетического оборудования.

Разработаны методика, аппаратура и программное обеспечение для регистрации неоднородных полей перемещений, созданы действующие макеты электронных цифровых интерферометров различных типов, предназначенные для исследования существенно неоднородных напряженно-деформированных состояний (включая зоны остаточных напряжений и трещинообразования) в лабораторных и натурных условиях при квазистатическом и циклическом нагружениях. Предложен метод определения различных параметров напряженно-деформированного состояния объектов (нагрузок, остаточных напряжений, геометрии дефектов, параметров механики разрушения и трехосности напряженного состояния в зоне дефекта), базирующийся на решении задачи минимизации целевой функции, комплексно отражающей различие между результатами экспериментов (значительных массивов экспериментальных данных) и расчетов серии соответствующих модельных задач. Для реализации метода создан гибкий программный комплекс.

Разрабатываются методические подходы, программное обеспечение и экспериментальное оборудование для анализа нагруженности, дефектности, мониторинга процесса накопления повреждений, образования и развития трещин, локальных деформационных характеристик материалов с учетом деградации их свойств.

Создана многоуровневая иерархическая система комплексных моделей и критериев разрушения конструкционных материалов в условиях экстремальных физико-механических воздействий для обеспечения и повышения комплексов характеристик прочности, трещиностойкости, ресурса и живучести машин и конструкций. В результате многосторонних экспериментально-расчетных и теоретических исследований разработана критериальная база расчетно-экспериментального обоснования предельно допустимых уровней ресурса, живучести и безопасности критически важных элементов конструкций сложных технических систем.

Разработанные подходы, методы и критерии позволяют упростить и формализовать инженерные расчеты на прочность, ресурс, живучесть и безопасность критически важных элементов машин и конструкций.

Вышеупомянутые результаты фундаментальных исследований и разработок ИМАШ РАН последних лет в области нелинейной механики разрушения привлекаются для решения прикладных задач прочности, живучести, ресурса и безопасности критически важных объектов машиностроения с повышенными параметрами рабочих процессов, ресурса и техногенной безопасности на стадиях конструирования, изготовления, доводки и эксплуатации в штатных, аварийных и катастрофических ситуациях, что обеспечивает возможность создания интеллектуальных конструкций и машин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2006. — 328 с.
- 2. Левин В. А., Морозов Е. М., Матвиенко Ю. Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 408 с.
- Ганиев Р.Ф. Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН. Часть 1 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 1. С. 3–20.
- Ганиев Р.Ф. Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. Часть 2 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 3. С. 3–17.
- Обеспечение ресурса и живучести водо-водяных энергетических реакторов / Под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гаденина. М.: Наука, 2009. — 343 с.
- 6. Напряженно-деформированное состояние ЖРД / Под ред. Н.А. Махутова и В.С. Радчука. М.: Наука, 2013. — 646 с. (Исследование напряжений и прочности ракетных двигателей).
- 7. Матвиенко Ю.Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 80–89.
- 8. Батанова О.А., Матвиенко Ю.Г. Закономерности образования трещин при скалывании кромки образца и индентировании хрупких материалов // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18, № 2. С. 22–36.
- 9. Матвиенко Ю.Г., Бубнов М.А. Контактное взаимодействие и разрушение поверхностного слоя в условиях трения качения и заклинивания // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 4. С. 43–49.
- Матвиенко Ю. Г. Двухпараметрическая механика разрушения в современных проблемах прочности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 37–46.
- Likeb A., Gubeljak N., Matvienko Yu.G. Finite element estimation of the plastic ηpl factors for pipe-ring notched bend specimen using the load separation method // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2014. Vol. 37. P. 1319–1329.

- 12. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Иванов В.И., Елизаров С.В. Акустико-эмиссионные свойства оксидных тензоиндикаторов и распознавание сигналов при образовании трещин в хрупком слое // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 48–60.
- Писарев В. С., Матвиенко Ю. Г., Одинцев И. Н. Определение параметров механики разрушения при малом приращении длины трещины // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78, № 4. С. 45–51.
- Матвиенко Ю. Г., Починков Р. А. Влияние несингулярных компонентов *Т*-напряжений на зоны пластической деформации у вершины трещины нормального отрыва // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 3. С. 6–14.
- Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I., Chernov A. V. Determination of fracture mechanics parameters by measurements of local displacements due to crack length increment // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2014. Vol. 37. P. 1306–1318.
- Chernyatin A. S., Matvienko Y. G., Razumovsky I. A. A computational tool for estimating stress fields along a surface crack front // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2015. Vol. 38. P. 180–189.
- 17. Hadj Meliani M., Matvienko Yu.G., Pluvinage G. Two-parameter fracture criterion (Kρ,c-Tef,c) based on notch fracture mechanics // International Journal of Fracture. 2011. Vol. 167. P. 173–182.
- Matvienko Yu. G. Maximum average tangential stress criterion for prediction of the crack path // International Journal of Fracture. 2012. Vol. 176. P. 113– 118.
- Семенова М.М., Матвиенко Ю.Г. Прогнозирование траектории поверхностной трещины при контактном нагружении в условиях трения скольжения // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 2. С. 47–52.
- 20. Матвиенко Ю.Г. Анализ допустимых размеров трещиноподобных дефектов на основе диаграмм трещиностойкости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 2. С. 110–115.
- 21. Matvienko Yu.G. Safety factors in structural integrity assessment of components with defects // International Journal of Structural Integrity. 2013. Vol. 4, No 4. P. 457–476.
- 22. Hadj Meliani M., Pluvinage G., Matvienko Yu. G. Corrosion defect assessment on pipes using limit analysis and notch fracture mechanics // Engineering Failure Analysis. 2011. Vol. 18. P. 271–283.

- 23. Матвиенко Ю. Г., Бубнов М. А. Моделирование напряженно-деформированного и предельного состояния нефтепровода с осевым поверхностным дефектом при пневматических и гидравлических испытаниях // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 2. С. 23–49.
- 24. Архипов В. Е., Лондарский В. Е., Москвитин Г. В., Мельшанов А. Ф., Пугачев М. С. Повышение ресурса изделий газодинамическим напылением покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 6. С. 65–70.

Матвиенко Юрий Григорьевич

### ТЕНДЕНЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ В ПРОБЛЕМАХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Дизайнер А.А.Гурьянова Технический редактор А.В.Бакиев Компьютерная верстка А.И.Ереметовой Корректор Е.В.Огородникова

Подписано в печать 05.05.2015. Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,55. Уч. изд. л. 4,12. Гарнитура Minion Pro. Бумага мелованная. Заказ № 15-37. АНО «Ижевский институт компьютерных исследований» 426034, г. Ижевск, ул. Кооперативная, д. 5 E-mail: mail@rcd.ru Тел./факс: +7(3412) 50–02–95