

УДК 620.172.2:620.171

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-55-64

СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ И МЕХАНИКИ КАТАСТРОФ

© Н. А. Махутов¹, В. В. Москвичев², Е. М. Морозов³, Р. В. Гольдштейн⁴*Статья поступила 18 апреля 2017 г.*

Представлены результаты проведения базового эксперимента по механике разрушения в целях проверки основных методических положений испытаний на трещиностойкость. Отмечен ряд проблемных вопросов и ограничений, возникающих при проведении испытаний и интерпретации их результатов, особенно при использовании пластичных сталей и стремлении распространить положения и требования линейной механики разрушения на условия упругопластического деформирования и разрушения. Приведен перечень методических рекомендаций по определению характеристик трещиностойкости для конкретных классов материалов и условий испытаний с привязкой к конкретным объектам и конструкциям, ранее разработанных НМКС и изданных в конце 1990-х годов. Более детально отражена содержательная часть методических рекомендаций, регламентирующих общие подходы к проведению расчетов на трещиностойкость с описанием блок-схемы расчетов по критериям механики разрушения. Показаны области применения силовых, энергетических и деформационных критериев разрушения, применяемые коэффициенты запаса и диапазоны их значений. Рассмотрены тенденции и основные направления развития расчетно-экспериментальных методов механики разрушения и обозначены первоочередные задачи унификации методов испытаний и расчетов на трещиностойкость.

Ключевые слова: механика разрушения; испытания на трещиностойкость; характеристики трещиностойкости; критерии разрушения; коэффициенты запаса.

Цель данной работы — рассмотрение основных тенденций развития расчетно-экспериментальных методов механики разрушения в целях постановки задач их дальнейшего совершенствования.

Направления перспективных исследований базируются на опыте испытаний и практических расчетов, полученных при разработке нормативных документов, и проведении базового эксперимента механики разрушения.

Результаты базового эксперимента по механике разрушения

В целях экспериментальной проверки положений, установленных в Методических указаниях РД 50-261–81, была разработана программа базового эксперимента по определению характеристик трещиностойкости низкопрочных сталей. В ее разработке приняли участие Ю. Н. Работнов, Н. А. Махутов, В. В. Панасюк, Е. И. Тавер, П. Ф. Кошелев, М. Н. Георгиев, Е. М. Морозов и др. В основной состав рабочей груп-

пы по проведению испытаний входили: В. А. Волков, А. М. Орестов, Г. П. Карзов, Г. Н. Меринов, А. А. Гудков, П. Д. Одесский, В. А. Рябов, С. Е. Ковчик. В отдельных испытаниях принимали участие Б. А. Дроздовский, Г. С. Васильченко, В. А. Зазуляк, С. И. Рыбка, С. А. Параев и др. Эксперимент проводили на базе шести организаций: ПО «Ижорский завод», ЦНИИМС, ЦНИИТМАШ, ЦНИИСК, ФМИ АН УССР, МЭИ. Результаты эксперимента детально обсуждали на заседаниях комиссии, затем их частично опубликовали в [1] и трудах семинара «Проблемы разрушения металлов» [2–5]. Образцы (75 шт.) из стали 15Х2МФА толщиной t , равной 25, 50, 70, 100 и 150 мм испытывали на внецентренное растяжение и трехточечный изгиб в диапазоне температур $-140 - +80$ °С. Цель базового эксперимента — проверка основных методических положений при экспериментальном определении характеристик трещиностойкости.

По результатам испытаний в качестве основных характеристик определяли разрушающие напряжения σ_{c0} , критические значения коэффициентов интенсивности напряжений K_c , K_c^* , K_{Ic} , раскрытие трещин δ_c , критические температуры хрупкости T_{k1} и T_{k2} (рис. 1). В процессе испытаний проводили измерения параметров акустической эмиссии для более точной регистрации момента страгивания и развития трещин. Базовый эксперимент позволил уточнить и скорректировать

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Москва, Россия; e-mail: imash-gu@mail.ru

² Институт вычислительных технологий СО РАН. Красноярский филиал — Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука», г. Красноярск, Россия; e-mail: krasn@ict.nsc.ru

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия.

⁴ Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия.

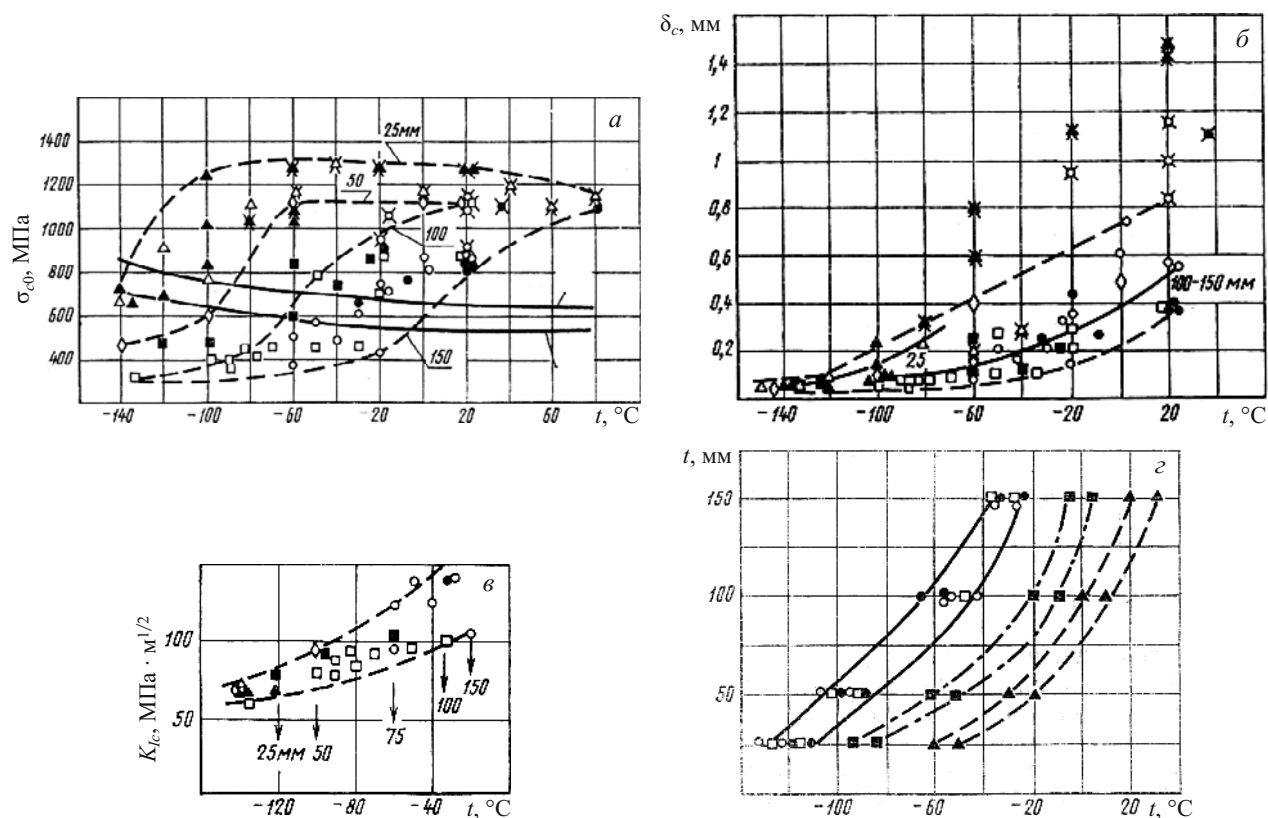


Рис. 1. Температурные зависимости σ_{c0} (а), δ_c (б), K_{Ic} (в) и зависимость критических температур хрупкости от толщин образцов (г)

ряд методических вопросов определения характеристик трещиностойкости в части:

- требований к размерам образцов и трещин;
- условий создания исходных усталостных трещин;
- критериев достоверности определения K_{Ic} ;
- корректности формул для расчета K_{Ic} , δ_c , J_c ;
- представления результатов испытаний.

Полученный опыт коллективной работы существенно повысил общую культуру механических испытаний конструкционных материалов и, безусловно, качество подготовки НТД, что позволило успешно завершить работу по созданию ГОСТ 25.506–85.

Разработка НТД для различных конструкционных материалов и условий развития трещин

Несмотря на успешное решение задач унификации методов испытаний на трещиностойкость в этой области остался ряд нерешенных методических вопросов, а также возникли новые задачи:

неопределенность в определении характеристик трещиностойкости в условиях упругопластического деформирования (испытания тонколистовых материалов, сталей низкой и средней прочности, наличие концентрации напряжений);

определение характеристик трещиностойкости в условиях смешанных моделей деформирования в вершине трещины, продольного и поперечного сдвига;

определение характеристик трещиностойкости структурно-неоднородных конструкционных материалов (волоконистых композиционных материалов, конструкционной керамики, слоистых металлкомпозиционных материалов, сверхпроводящих материалов и т.д.).

Кроме того, опыт практических расчетов на трещиностойкость с использованием расчетных критериев, установленных в соответствии с требованиями разработанных НТД, указывал на ряд проблемных вопросов и приводил в ряде случаев к противоречивым ситуациям:

- 1) при использовании пластичных сталей возникает необходимость испытаний образцов, толщины которых выше, чем конструктивных элементов;
- 2) при экспериментальном определении характеристик трещиностойкости испытания проводятся на образцах с трещинами, размеры которых существенно превышают допускаемые требованиями дефектоскопического контроля;
- 3) при нарушении условий достоверности определения характеристик трещиностойкости возникает их зависимость от размеров трещин и образцов;
- 4) при уменьшении размеров трещин, пределов текучести и модулей упругости расчет по характеристикам трещиностойкости приводит к завышенным оценкам разрушающих напряжений;
- 5) номинальная нагруженность и геометрия значительного числа элементов конструкций, в том числе в местах концентрации, таковы, что размеры

зон пластических деформаций могут превышать размеры дефектов, т.е. условия достоверности заведомо невыполнимы.

Отмеченные проблемы возникают в результате стремления расширить области применения основных положений линейной механики разрушения на условия упругопластического деформирования и разрушения. Однако возможности такого перехода связаны с уровнем номинальной нагруженности рассчитываемых элементов и влиянием эксплуатационных факторов (температуры, скорости нагружения и т.д.). Очевидно, что в этих условиях необходим анализ закономерностей, характеристик и критериев упругопластического деформирования и разрушения. Важным аспектом данного анализа является оценка влияния эффектов объемности напряженного состояния на определяемые характеристики трещиностойкости и его учет в уравнениях предельного состояния. Предварительные результаты, полученные в этом направлении, привели к необходимости использования в расчетных соотношениях эффективного предела текучести в условиях, отличных от линейного однородного напряженного состояния. Наиболее успешно такой подход реализован в отношении деформационного (коэффициент интенсивности деформаций K_{Iec}) и энергетического (J -интеграл) критериев упругопластического разрушения [6 – 8].

Указанные обстоятельства привели к пересмотру некоторых положений разработанных НТД, смещению ряда методических акцентов, разработке НТД для конкретных классов материалов, условий испытаний, экстремальных воздействий с привязкой к конкретным объектам и конструкциям. Результаты этой работы нашли отражение в двухтомном издании «Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации» [9, 10] в рамках программы «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф».

В первом томе были изданы следующие методические рекомендации:

МР 1–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении

МР 2–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении

МР 3–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при динамическом нагружении

МР 4–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при ползучести

МР 5–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) на стадии остановки трещины

МР 6–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) сварных соединений при статическом нагружении

МР 7–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) тонколистовых материалов при статическом нагружении

МР 8–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) биметаллов

Второй том содержал:

МР 9–01. Определение предела трещиностойкости при статическом нагружении

МР 10–01. Метод испытания на сопротивление слоистым разрушениям

МР 11–01. Метод оценки трещиностойкости материалов в условиях релаксации напряжений

МР 12–01. Расчетная и экспериментальная оценка трещиностойкости газонефтепроводных труб

МР 13–01. Определение критических коэффициентов интенсивности деформаций при статическом нагружении

МР 14–01. Определение зависимости трещиностойкости (вязкости разрушения) от скорости распространения трещин

МР 15–01. Определение характеристик вязкости разрушения по энергии упругой деформации

МР 16–01. Определение характеристик сопротивления материалов распространению трещин продольного сдвига

МР 17–01. Определение кривой сопротивления распространению трещины при статическом нагружении (R -кривой) обшивочных материалов при плоском напряженном состоянии

МР 18–01. Определение скорости роста усталостной трещины при двухосном растяжении металлических материалов

В подготовке перечисленных документов приняло участие большое количество специалистов различных организаций, институтов АН СССР и вузов. Таким образом, была реализована идея необходимости постоянного совершенствования и развития экспериментальной нормативной базы механики разрушения.

Особенности расчетов на трещиностойкость

В 1988 г. были подготовлены методические рекомендации, регламентирующие общие подходы по проведению расчетов на прочность и трещиностойкость с использованием характеристик и критериев механики разрушения [11 – 12]:

коэффициента интенсивности напряжений K (силовой критерий);

предела трещиностойкости I (силовой критерий);

раскрытия в вершине трещины δ (деформационный критерий);

J -интеграла (энергетический критерий);

коэффициента интенсивности деформаций K_{Ie} (деформационный критерий);

критических температур T_k .

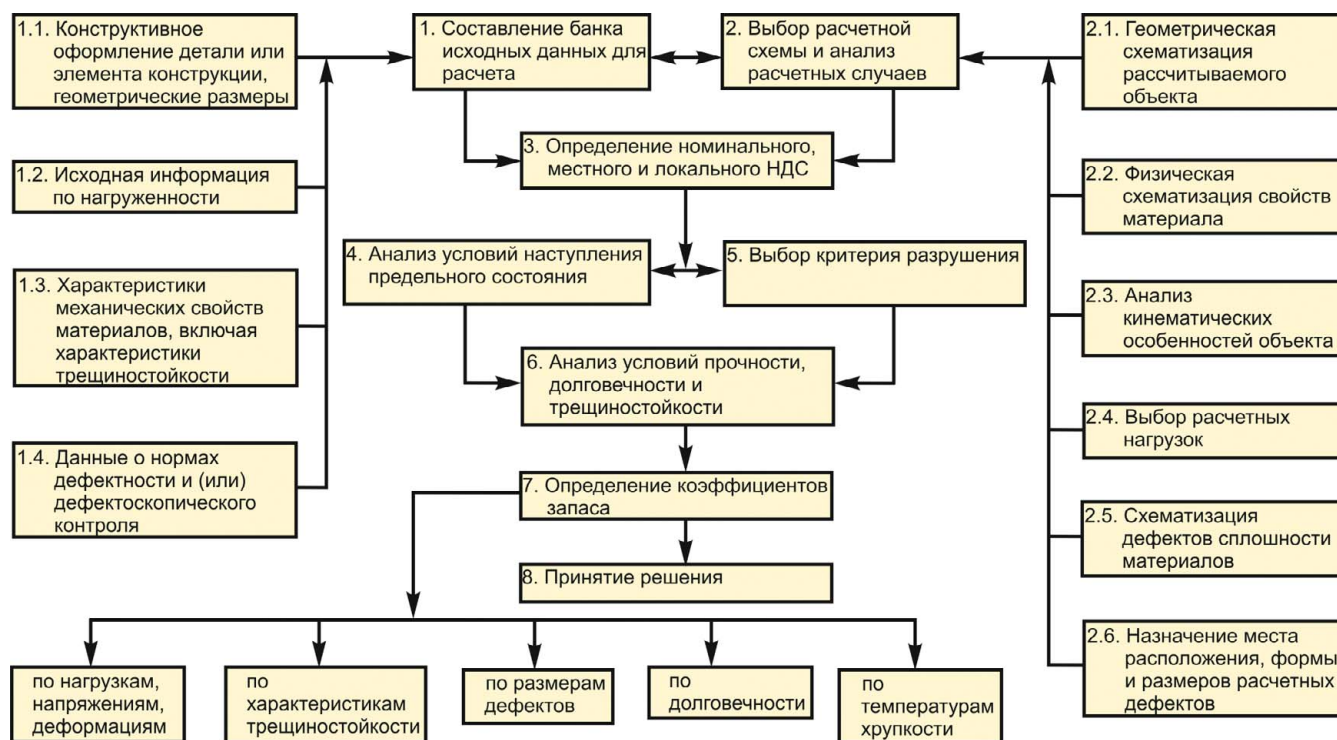


Рис. 2. Блок-схема расчетов по критериям механики разрушения

Расчеты на трещиностойкость являются поверочными и проводятся после основных — нормативных. Основные нормативные расчеты на прочность проводятся без учета наличия макродефектов в элементах конструкций с определением основных геометрических размеров, выбором материалов и способов изготовления.

Поверочные расчеты учитывают возможность образования и развития в элементах конструкций на стадии изготовления, монтажа и эксплуатации трещиноподобных дефектов. Цель расчетов — оценка прочности, трещиностойкости и долговечности машин и элементов конструкций, содержащих дефект в виде трещины. Общая блок-схема расчетов приведена на рис. 2. Расчеты предусматривают два основных случая.

1. Для элементов, не подвергаемых дефектоскопическому контролю в процессе испытаний и эксплуатации, расчет проводят для назначенного расчетного дефекта.

2. Для элементов, подвергающихся дефектоскопическому контролю в процессе испытаний и эксплуатации, расчет проводят:

по размерам дефектов типа трещин в соответствии с нормами, если фактические размеры дефектов не превышают допускаемых по этим нормам;

по фактическим размерам дефектов, выявляемых при изготовлении, испытаниях и эксплуатации.

Основой для проведения расчетов являются:

действующие на стадиях изготовления, монтажа, испытаний и эксплуатации тепловые, механические и

другие виды внешних нагрузок с учетом возможного наличия внутренних силовых воздействий;

геометрические размеры сечений несущих элементов;

данные о полях температур при монтаже, испытаниях и эксплуатации;

стандартные гарантированные характеристики механических свойств, по которым выполнены нормативные проектные расчеты;

дополнительные характеристики механических свойств, используемые при проведении расчетов трещиностойкости, диаграмм разрушения, кратковременной, циклической и длительной прочности;

данные о режимах работы и условиях эксплуатационного нагружения;

данные о нормативных, фактических и гипотетических дефектах конструкций с учетом уровня и объемов дефектоскопического контроля.

Расчеты на трещиностойкость выполняют после определения НДС для наиболее опасных сочетаний напряжений, деформаций, температур и дефектов для всех расчетных и нерасчетных, в том числе аварийных, режимов работы.

При формировании расчетной схемы назначают места расположения, форму и размеры расчетных или фактических дефектов. В случае необходимости проводят схематизацию дефектов и приводят их к эквивалентным по опасности разрушения трещинам. Для установленных расчетных схем и расчетных случаев назначают расчетные нагрузки (механические, тепловые, электромагнитные), как правило, принятые при проведении основных нормативных расчетов.

По указанным нагрузкам, размерам сечений для выбранных расчетных схем определяют номинальное и местное напряженно-деформированное состояние (без учета трещин) в опасных сечениях рассчитываемых элементов. При этом местные напряжения и деформации определяют с учетом концентрации напряжений и деформаций, местных и общих температурных напряжений, остаточных напряжений, сосредоточенных воздействий и т.п., номинальное и местное НДС — с использованием аналитических (формулы сопротивления материалов, теорий пластин и оболочек, ползучести, пластичности и др.) или численных (МКЭ, МГЭ, МКР и др.) методов.

В рассчитываемые зоны с известными номинальными и местными НДС вводят расчетные или фактические дефекты, которые обуславливают возникновение локальных НДС у вершины трещин (вблизи вершины дефектов), описываемых параметрами механики разрушения (K, I, δ, J, K_{Ic}). По результатам расчетов НДС определяют расчетные параметры C_3 в уравнении (1) предыдущей работы.

Расчеты выполняют для случаев предельных состояний, приводящих к возможной реализации хрупких, квазихрупких или вязких разрушений. Пределы применимости критериев разрушения в зависимости от уровня номинальных напряжений и вида разрушения выявляют схемой механического состояния тел с трещинами. В области хрупких разрушений ($T < T_{K2}$) в качестве основного может быть использован силовой критерий разрушения K_{Ic} . В области квазихрупких разрушений ($T_{K2} \leq T \leq T_{K1}$) применяют силовые (I_c, K_c), энергетические (γ_c, J_c) и деформационные (δ_c, K_{Iec}) критерии разрушения. В области вязких состояний ($T > T_{K1}$) анализ разрушений и расчеты прочности выполняют на базе деформационных критериев (K_{Iec}, e_{max}). Основными параметрами для выбора критерия разрушения являются размеры пластических зон в вершине трещины, степень развития которых определяет тип возможного разрушения. Критические значения характеристик находят по результатам испытаний конструкционных материалов на трещиностойкость — значения C_m в уравнении (1) предыдущей статьи.

Силовые критерии в форме коэффициентов интенсивности напряжений K применимы в случаях, когда размеры пластических зон на порядок меньше геометрических размеров элемента конструкции, что соответствует реализации хрупкого разрушения при наступлении предельного состояния. В основном эти критерии применимы для высокопрочных, малопластичных конструкционных материалов с невысокой чувствительностью к температурам, скорости нагружения, для элементов конструкции, номинальные местные напряжения в которых не превышают предела текучести.

Критерий предела трещиностойкости I_c , отражающий взаимосвязь двух силовых критериев — коэффициента интенсивности напряжений и разрушающе-

го напряжения, может быть использован независимо от размера пластических зон и предпочтителен в тех случаях, когда в расчетах размер трещины варьируется в широких пределах при малых градиентах напряжений по рассчитываемому сечению. При этом номинальные напряжения могут превышать предел текучести.

Деформационный критерий δ_c раскрытия трещины и энергетический критерий в форме J -интеграла используют как в условиях малой зоны пластичности у вершины трещины, так и при общем пластическом течении ослабленного сечения. Критерий раскрытия трещины рекомендуется для листовых и оболочковых конструкций вне зоны концентрации и при отсутствии температурных напряжений. Использование J -интеграла возможно для широкого класса конструкций. Деформационный критерий K_{Ie} — коэффициент интенсивности деформаций в упругопластической области — применим независимо от размеров пластической зоны для конструкций различного назначения и разных условий нагружения. Важным преимуществом критерия является то, что он не требует большого объема вычислений при определении напряженно-деформированного состояния в упругопластической области деформирования.

Для материалов и конструкций, имеющих ярко выраженные температурные зависимости характеристик механических свойств и трещиностойкости, наряду с силовыми, энергетическими и деформационными критериями в расчет вводят критические температуры. Критические температуры, с одной стороны, требуют отдельного расчетно-экспериментального обоснования, включая температурные запасы для конкретных условий эксплуатации, а с другой — позволяют конкретизировать области применения критериев и уравнений предельных состояний, сформулированных на базе механики деформирования и разрушения.

По результатам расчетов деталей машин и элементов конструкций на трещиностойкость могут быть установлены критические и допускаемые размеры трещин, температуры, предельные и допускаемые напряжения и (или) нагрузки, числа циклов или время.

По полученным значениям размеров трещин, напряжений, нагрузок, температур, чисел циклов и времени определяют коэффициенты запасов:

$$\begin{aligned} n_p &= P_c/P_3 \text{ — по предельным нагрузкам;} \\ n_\sigma &= \sigma_{nc}/\sigma_n^3 \text{ — по номинальным напряжениям;} \\ n_K &= K_c/K; \quad n_\delta = \delta_c/\delta; \quad n_J = J_c/J; \quad n_I = I_c/I; \quad n_{K_e} = \\ &= K_{ec}/K_e \text{ — по характеристикам трещиностойкости;} \\ \Delta T &= T_{\min}^3 - T_K \text{ — по критическим температурам;} \\ n_l &= l_c/l \text{ — по критическим размерам дефектов;} \\ n_N &= N_c/N_3; \quad n_\tau = \tau_c/\tau_3 \text{ — по долговечности на стадии роста трещины.} \end{aligned}$$

Допускаемые уровни запасов для рассчитываемых деталей машин и элементов конструкций назначают

в зависимости от их типов, ответственности, опыта эксплуатации и др.

Для основных предельных состояний (ОПС) в штатных ситуациях эксплуатации запасы по пределам текучести и временному сопротивлению принимают соответственно в интервалах 1,1 – 2,0 и 1,5 – 2,6. Для дополнительных предельных состояний (ДПС) запасы по характеристикам трещиностойкости рекомендуется принимать в интервале между указанными запасами. Запасы по разрушающим напряжениям назначают в пределах 1,5 – 2,0, по коэффициентам интенсивности напряжений — 1,7 – 2,2, по разрушающему числу циклов — в пределах от 3 до 10, по размерам трещин — 1,5 – 2,5, по критическим температурам хрупкости — не менее 20 – 40 °С.

В перспективных планах работы НМКС значилась подготовка серии НТД по расчетам на трещиностойкость отдельных видов конструкций, машин и оборудования с отражением специфики их проектирования и эксплуатации.

Задачи унификации методов испытаний и расчетов на трещиностойкость

В 1990-е годы количество научных публикаций по вопросам механики разрушения стало сокращаться по причинам:

снижения числа исследователей и специалистов в области конструкционной прочности, обусловленного значительным падением промышленного производства в стране и их невостребованностью в реальном секторе промышленности;

непродуманных «реформ» системы высшего инженерного образования, результатом которых стало сокращение профильных кафедр и переход на бакалавриат по таким направлениям подготовки, как «Динамика и прочность машин», «Технологии производства», «Материаловедение» и др.;

разрушения системы отраслевых НИИ и КБ, ликвидации заводских лабораторий.

Но необходимо отметить и следующее.

1. Механика разрушения начиная с 1960-х годов вполне оформилась в самостоятельное научное направление, интегрированное в МДТТ, и заняла соответствующее место в сферах инженерной, проектно-конструкторской и производственной деятельности, в образовательных стандартах многих классических и технических университетов.

2. В начале 2000-х годов обозначилось смещение научной активности в сторону решения задач безопасности технических систем и объектов. Экспериментальные и расчетные методы механики разрушения наряду с методами технической диагностики и неразрушающего контроля оказались востребованными при подготовке НТД по линии Ростехнадзора. В первую очередь это касается НТД по оценке остаточного ресурса объектов технического регулирования, потенци-

ально опасных, критически важных и стратегических объектов [13].

3. В разработанных НТД обобщен отечественный и зарубежный опыт испытаний конструкционных материалов на трещиностойкость. В отличие от зарубежных НТД, регламентирующих раздельное определение характеристик механики разрушения, в ГОСТ 25.506–85 отражены методические особенности определения всего комплекса характеристик трещиностойкости, при этом особое внимание уделено пределу трещиностойкости I_c , коэффициенту интенсивности деформаций в упругопластической области K_{ec} и критическим температурам.

4. Дальнейшее развитие механики разрушения наиболее активно продолжалось в таких направлениях, как:

вероятностная механика разрушения с выходом на теорию анализа рисков аварийных ситуаций [14 – 16 и др.];

динамическая механика разрушения с анализом высокоскоростных процессов разрушения [17 – 20 и др.];

механика разрушения сварных конструкций [16, 20 – 25 и др.];

структурная механика разрушения композитных и структурно-неоднородных материалов на макро- и микроуровнях [17, 26 – 29 и др.];

механика разрушения контактного взаимодействия [30, 31 и др.];

механика квазихрупкого, циклического и коррозионного разрушения [32 – 34 и др.];

развитие аналитических и численных методов анализа НДС в локальных зонах дефектов и вершинах трещин и методов моделирования конструкций с трещинами [25, 27, 35 – 39 и др.];

приложения механики разрушения к отдельным типам конструкций, машин и оборудования [22, 25, 40 – 45 и др.];

накопление экспериментальных данных по характеристикам трещиностойкости конструкционных материалов и обобщение классических представлений МР в соответствующих учебных, научных и справочных изданиях [20, 24, 32 – 34, 46 – 53 и др.].

На данном этапе развития механики разрушения вновь ставятся задачи унификации методов испытаний и расчетов с учетом накопленного объема знаний, практического опыта применения и использования современных средств измерений, технологий испытаний для различных сред и воздействий, обусловленных потребностями создания уникальных технических объектов. Заложенный в 1980-е годы фундамент нормативной базы экспериментального определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов требует дальнейшего развития и совершенствования.

В связи с успехами в создании новых классов конструкционных материалов необходимо критически

проанализировать имеющиеся методы и схемы испытаний по определению характеристик трещиностойкости и специализировать их применительно к композиционным материалам различной природы.

Новые технологии, в частности аддитивные, позволяют получить изделие и элементы конструкции непосредственно, минуя стадию производства материала. Адекватные концепции и методики измерения характеристик механических свойств и трещиностойкости подобных изделий еще предстоит разработать. Отметим, что в этом направлении активные работы ведутся за рубежом.

В последнее время проявилась проблема оценки трещиностойкости по результатам испытаний малых образцов, не удовлетворяющих критериям применимости как линейной, так и нелинейной механики разрушения. Характерный пример — малые образцы-свидетели, проходящие жизненный цикл в условиях эксплуатации атомных энергетических установок. По результатам испытаний образцов-свидетелей нужно оценивать степень деградации и остаточную трещиностойкость материала вследствие радиационного и температурного воздействий. Существенный прогресс в этом направлении достигнут в ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» [54, 55].

В последние годы все больше внимания уделяется анализу сценариев процессов разрушения материалов, конструкций и сооружений, сопровождаемых формированием множества трещин или трещиноподобных дефектов, во многих случаях геометрически упорядоченных (структур разрушения), что приводит к необходимости рассмотрения новых предельных состояний и соответствующих им характеристик трещиностойкости, учета возможной зависимости этих характеристик от масштаба трещин.

Наконец, в рамках механики разрушения разработаны новые подходы и критерии инициирования и роста трещин. Применительно к динамическим нагружениям это критерий инкубационного времени [56]. Критерий приводит к новой постановке вопроса об адекватных характеристиках трещиностойкости и методах их измерений. Эти вопросы предстоит решать.

В качестве первоочередных задач и основных предложений по унификации методов расчетов и испытаний на прочность и трещиностойкость можно выделить следующие.

1. Проведение инвентаризации НТД государственного, отраслевого и корпоративного уровня с обобщением всего отечественного опыта разработок в области испытаний и расчетов с использованием критериев механики разрушения.

2. Формирование программы стандартизации, предусматривающей разработку новых многоуровневых НТД (ГОСТ, МУ, МР, РТМ, СП и т.д.), актуализацию ранее разработанных НТД и обоснование перспективных направлений исследований и стандартизации. Программа стандартизации должна включать

разработку нормы проектирования общего назначения по отраслевому (машиностроение, строительство, энергетика, транспорт и т.д.) и объектовому (виды техники, оборудования, типы конструкций и т.д.) принципам; НТД по методам испытаний материалов, машин, оборудования, по методам расчетов на прочность, ресурс, надежность, безопасность.

Методы (нормы) расчетов напряженно-деформированных состояний при определении расчетных характеристик C_3 в уравнении (1), базирующиеся на технологиях конечно-элементного моделирования, должны быть структурированы в виде алгоритмов с обоснованием точности получаемых характеристик.

В НТД общего назначения для отдельных типов конструкций, машин и оборудования следует включать:

описания возможных предельных состояний в процессе эксплуатации;

анализ показателей эксплуатационной надежности;

основные расчетные схемы и методы их анализа; номенклатуру расчетных критериев для обеспечения многокритериальных расчетов.

НТД по методам механических испытаний должны в полном объеме содержать необходимую информацию по всем процедурам и этапам испытаний.

3. Подготовка и издание справочной научно-технической литературы по механике деформирования и разрушения, включая справочники по характеристикам трещиностойкости конструкционных материалов.

Решение задач, связанных с созданием второго поколения нормативных документов в области механики разрушения, имеет принципиальное значение для дальнейшего развития расчетов на трещиностойкость, живучесть и безопасность сложных технических систем, включая проблему остаточного ресурса потенциально опасных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков В. А., Орестов А. М., Карзов Г. П. и др. Экспериментальная оценка применимости методических указаний для определения характеристик трещиностойкости низкопрочных сталей / Унификация методов испытаний металлов на трещиностойкость. Вып. 2. — М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 10 – 31.
2. Проблемы разрушения металлов. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1975. — 208 с.
3. Проблемы разрушения металлов. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1977. — 175 с.
4. Проблемы разрушения металлов. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1980. — 246 с.
5. Проблемы разрушения металлов и фрактография. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1989. — 138 с.
6. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
7. Красовский А. А., Вайншток В. А. Критерий разрушения материалов, учитывающий вид напряженного состояния у вершины трещины / Проблемы прочности. 1978. № 5. С. 64 – 69.
8. Махутов Н. А., Москвичев В. В., Козлов А. Г., Сухоруков С. В. Расчет на трещиностойкость плоских элементов конструкций с использованием J -интеграла / Проблемы прочности. 1988. № 8. С. 3 – 14.

9. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов: Методические рекомендации. — М.: Изд. МИБ СТС. Ассоциация КОДАС, 1995. — 360 с.
10. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов: Методические рекомендации. Т. 2. — М.: Изд. ФЦГТП ПП «Безопасность». Ассоциация КОДАС, 2001. — 254 с.
11. Унификация и стандартизация методов расчетов и испытаний на прочность: Сб. статей. Вып. 1. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 88 с.
12. МР 1–89. Методические рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Расчетные методы определения несущей способности и долговечности элементов машин и конструкций. Расчеты на прочность по критериям механики разрушения. Общие положения. — Красноярск: КПСНИИП, 1988. — 14 с.
13. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов подконтрольных Госгортехнадзору России / Безопасность труда в промышленности. 1996. № 3. С. 45 – 51.
14. Лепихин А. М., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Черняев А. П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. — Новосибирск: Наука, 2003. — 174 с.
15. Тимашев С. А. Инфраструктуры. Ч. 1. Надежность. Долговечность. — Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2016. — 530 с.
16. Гетман А. Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1999. — 258 с.
17. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
18. Ионов В. Н., Селиванов В. В. Динамика разрушения деформируемого тела. — М.: Машиностроение, 1987. — 272 с.
19. Партон В. З., Борисковский В. Г. Динамика хрупкого разрушения. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
20. Москвичев В. В., Махутов Н. А., Черняев А. П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. — Новосибирск: Наука, 2002. — 334 с.
21. Копельман Л. А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. — Л.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
22. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т. Сварные сосуды высокого давления. — Л.: Машиностроение, 1982. — 287 с.
23. Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами. — Челябинск: ЦНТИ, 2000. — 227 с.
24. Ларионов В. П. и др. Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 593 с.
25. Доронин С. В., Лепихин А. М., Москвичев В. В., Шокин Ю. И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. — Новосибирск: Наука, 2005. — 250 с.
26. Карзов Г. П., Марголин В. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. — СПб.: Политехника, 1993. — 391 с.
27. Буров А. Е., Кокшаров И. И., Москвичев В. В. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомполитов. — Новосибирск: Наука, 2003. — 173 с.
28. Полилов А. Н. Экспериментальная механика комполитов. — М.: Изд-во МГТУ, 2015. — 375 с.
29. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Наука, 1983. — 296 с.
30. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. — М.: Наука, 1988. — 224 с.
31. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. — М.: Машиностроение, 1999. — 544 с.
32. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. — Киев: Наукова думка, 1990. — 545 с.
33. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 294 с.
34. Трошенко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. — Киев: Наукова думка, 1987. — 252 с.
35. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Наука, 1980. — 256 с.
36. Морозов Н. Ф. Математические вопросы теории трещин. — М.: Наука, 1984. — 256 с.
37. Андрейкив А. Е. Пространственные задачи теории трещин. — Киев: Наукова думка, 1982. — 348 с.
38. Гольдштейн Р. В., Ентов В. М. Качественные методы в механике сплошных сред. — М.: Наука, 1989. — 224 с.
39. Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. — М.: Ленанд, 2008. — 456 с.
40. Шарый Н. В., Семишкин В. П., Пиминов В. А., Драгунов Ю. Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. — М.: ИздАТ, 2004. — 496 с.
41. Махутов Н. А., Фролов К. В., Драгунов Ю. Г. и др. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов. — М.: Наука, 2009. — 499 с.
42. Тимашев С. А., Бушинская А. В., Малюкова М. Г., Полуян Л. В. Целостность и безопасность трубопроводных систем. — Екатеринбург: УрО РАН, 2013. — 590 с.
43. Махутов Н. А., Лыглаев А. В., Большаков А. М. Хладостойкость (метод инженерной оценки). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 195 с.
44. Гетман А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 427 с.
45. Махутов Н. А., Пермяков В. Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. — Новосибирск: Наука, 2005. — 516 с.
46. Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Гигиняк Ф. Ф., Ломашевский В. П. Механические свойства конструкционных материалов: справочник. — Киев: Наукова думка, 1983. — 367 с.
47. Машиностроение. Энциклопедия. Том II-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. — М.: Машиностроение, 2010. — 852 с.
48. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
49. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
50. Левин В. А., Морозов Е. М., Матвиенко Ю. Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. — М.: Физматлит, 2004. — 408 с.
51. Красовский А. Я. Хрупкость металлов при низких температурах. — Киев: Наукова думка, 1980. — 340 с.
52. Астафьев В. И., Радаев Ю. Н., Степанова Л. В. Нелинейная механика разрушения. — Самара: Изд-во «Самарский университет», 2001. — 632 с.
53. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. — М.: Наука, 1994. — 383 с.
54. Марголин В. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. Дальнейшее развитие модели «Прометей» и метода Unified Curve. Ч. 1. Развитие модели «Прометей» / Вопросы материаловедения. 2016. № 4(88). С. 120 – 150.
55. Марголин В. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели «Прометей» и метода Unified Curve. Ч. 2. Развитие метода Unified Curve / Вопросы материаловедения. 2016. № 4(88). С. 151 – 178.
56. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. — СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 1997. — 132 с.

UDC 620.172.2:620.171

UNIFICATION OF COMPUTATION AND EXPERIMENTAL METHODS OF TESTING FOR CRACK RESISTANCE: DEVELOPMENT OF THE FRACTURE MECHANICS AND NEW GOALS

© N. A. Makhutov, V. V. Moskvichev, E. V. Morozov, and R. V. Goldstein

Submitted April 18, 2017.

Results of the activities of the Scientific and Methodological Commission for Standardization in the field of Fracture Mechanics of the Scientific and Technical Council of the State Standard of the USSR in connection with the 40th anniversary of its creation are presented. An emphasis is made on the results of the basic experiment in fracture mechanics in order to verify the main methodological guidelines of tests for crack resistance. A number of problematic issues and limitations arising upon testing and interpretation of the results, especially when using plastic steels and inherent strive to extend ideas and requirements of linear fracture mechanics to elastoplastic strain and fracture. The list of methodological recommendations for determining the characteristics of crack resistance for specific classes of materials and test conditions with reference to specific objects and structures previously developed by the commission and published in the late 1990s is presented. The substantial part of the methodological recommendations regulating the general approaches to carrying out calculations for crack resistance with a description of the flowchart calculations based on the criteria of fracture mechanics is given in more details. Areas of application of force, energy and deformation criteria of fracture are determined, as well as existing assurance coefficients and their allowed values are specified. The main trends and directions of the development of computational and experimental methods of fracture mechanics are considered in conclusion along with the primary goals of unification of test and computation methods used for determination of the crack resistance.

Keywords: fracture mechanics, tests for crack resistance, crack resistance characteristics, failure criteria, assurance coefficient.

REFERENCES

1. Volkov V. A., Orestov A. M., Karzov G. P., et al. Experimental evaluation of the applicability of methodological guidelines for determining the fracture toughness characteristics of low-strength steels / Unification of methods for testing metals for crack resistance. Issue 2. — Moscow: Izd. standartov, 1982. P. 10 – 31 [in Russian].
2. Problems of the fracture of metals. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1975. — 208 p. [in Russian].
3. Problems of the fracture of metals. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1977. — 175 p. [in Russian].
4. Problems of the fracture of metals. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1980. — 246 p. [in Russian].
5. Problems of fracture of metals and fractography. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1989. — 138 p. [in Russian].
6. Makhutov N. A. Deformation criteria for destruction and calculation of structural elements for strength. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 272 p. [in Russian].
7. Krasovskii A. A., Vainshtok V. A. Criterion for the destruction of materials, taking into account the form of the stressed state at the crack tip / Probl. Prochn. 1978. N 5. P. 64 – 69 [in Russian].
8. Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Kozlov A. G., Sukhorukov S. V. Calculation of the fracture toughness of flat structural elements using the J -integral / Probl. Prochn. 1988. N 8. P. 3 – 14 [in Russian].
9. Mechanics of disasters. Determination of the characteristics of crack resistance of structural materials. Guidelines. — Moscow: Izd. MIB STS. Assotsiatsiya KODAS, 1995. — 360 p. [in Russian].
10. Mechanics of disasters. Determination of the characteristics of crack resistance of structural materials. Guidelines. Vol. 2. — Moscow: Izd. FTsGTP PP «Bezopasnost». Assotsiatsiya KODAS, 2001. — 254 p. [in Russian].
11. Unification and standardization of methods of calculation and strength tests. Issue 1. — Moscow: Izd. standartov, 1983. — 88 p. [in Russian].
12. MR 1–89. Guidelines. Calculations and strength tests. Calculation methods for determining the bearing capacity and durability of machine elements and structures. Calculations for strength according to the criteria of fracture mechanics. General provisions. — Krasnoyarsk: KPSNIP, 1988. — 14 p. [in Russian].
13. Methodical guidelines for determining the residual life of potentially hazardous facilities controlled by the Federal Committee for Mining and Industrial Supervision of Russia / Bezopasn. Truda Promyshl. 1996. N 3. P. 45 – 51 [in Russian].
14. Lepikhin A. M., Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Chernyaev A. P. Probabilistic risk analysis of engineering systems constructions. — Novosibirsk: Nauka, 2003. — 174 p. [in Russian].
15. Timashev S. A. Infrastructure. Part 1. Reliability. Durability. — Yekaterinburg: Izd. UrO RAN, 2016. — 530 p. [in Russian].
16. Getman A. F. The concept of safety “flow before destruction” for pressure vessels and pipelines of nuclear power station. — Moscow: Énergoatomizdat, 1999. — 258 p. [in Russian].
17. Botvina L. R. Destruction: kinetics, mechanisms, common patterns. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
18. Ionov V. N., Selivanov V. V. Fracture dynamics of a deformable body. — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 272 p. [in Russian].
19. Parton V. Z., Boriskovskii V. G. Dynamics of brittle fracture. — Moscow: Mashinostroenie, 1988. — 240 p. [in Russian].
20. Moskvichev V. V., Makhutov N. A., Chernyaev A. P., et al. Crack resistance and mechanical properties of structural materials of technical systems. — Novosibirsk: Nauka, 2002. — 334 p. [in Russian].
21. Kopel'man L. A. Weldment resistance to brittle fracture. — Leningrad: Mashinostroenie, 1978. — 232 p. [in Russian].
22. Karzov G. P., Leonov V. P., Timofeev B. T. Welded high-pressure vessels. — Leningrad: Mashinostroenie, 1982. — 287 p. [in Russian].
23. Shakhmatov M. V., Erofeev V. V., Kovalenko V. V. Working capacity and non-destructive testing of welded joints with defects. — Chelyabinsk: TsNTI, 2000. — 227 p. [in Russian].
24. Larionov V. P., et al. Welding and viscoelastic transition problems. — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 1998. — 593 p. [in Russian].
25. Doronin S. V., Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Shokin Yu. I. Simulation of strength and fracture of load-bearing structures of technical systems. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 250 p. [in Russian].
26. Karzov G. P., Margolin V. Z., Shvetsova V. A. Physical and mechanical modeling of destruction processes. — St. Petersburg: Politehnika, 1993. — 391 p. [in Russian].
27. Burov A. E., Koksharov I. I., Moskvichev V. V. Modeling of fracture and fracture toughness of fibrous metal composites. — Novosibirsk: Nauka, 2003. — 173 p. [in Russian].
28. Polilov A. N. Experimental Mechanics of Composites. — Moscow: Izd. MGTU, 2015. — 375 p. [in Russian].
29. Cherepanov G. P. Fracture mechanics of composite materials. — Moscow: Nauka, 1983. — 296 p. [in Russian].

30. **Kolesnikov Yu. V., Morozov E. M.** Mechanics of contact failure. — Moscow: Nauka, 1988. — 224 p. [in Russian].
31. **Morozov E. M., Zernin M. V.** Contact problems of fracture mechanics. — Moscow: Mashinostroenie, 1999. — 544 p. [in Russian].
32. **Panasyuk V. V.** Mechanics of quasibrittle fracture of materials. — Kiev: Naukova dumka, 1990. — 545 p. [in Russian].
33. **Romaniv O. N., Nikiforchin G. N.** Mechanics of corrosion fracture of structural alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 294 p. [in Russian].
34. **Troshchenko V. T., Pokrovskii V. V., Prokopenko A. V.** Crack resistance of metals under cyclic loading. — Kiev: Naukova dumka, 1987. — 252 p. [in Russian].
35. **Morozov E. M., Nikishkov G. P.** The finite element method in fracture mechanics. — Moscow: Nauka, 1980. — 256 p. [in Russian].
36. **Morozov N. F.** Mathematical problems in the crack theory. — Moscow: Nauka, 1984. — 256 p. [in Russian].
37. **Andreikiv A. E.** Spatial problems in the crack theory. — Kiev: Naukova dumka, 1982. — 348 p. [in Russian].
38. **Gol'dshtein R. V., Entov V. M.** Qualitative methods in the mechanics of continue. — Moscow: Nauka, 1989. — 224 p. [in Russian].
39. **Morozov E. M., Muizemnek A. Yu., Shadskii A. S.** ANSYS in the hands of an engineer: Fracture mechanics. — Moscow: Lenand, 2008. — 456 p. [in Russian].
40. **Sharyi N. V., Semishkin V. P., Piminov V. A., Dragunov Yu. G.** Strength of the main equipment and pipelines of WWER reactor facilities. — Moscow: Izdat, 2004. — 496 p. [in Russian].
41. **Makhutov N. A., Frolov K. V., Dragunov Yu. G., et al.** Risk analysis and improvement of safety of water-water power reactors. — Moscow: Nauka, 2009. — 499 p. [in Russian].
42. **Timashev S. A., Bushinskaya A. V., Malyukova M. G., Poluyan L. V.** Integrity and safety of pipeline systems. — Yekaterinburg: UrO RAN, 2013. — 590 p. [in Russian].
43. **Makhutov N. A., Lyglaev A. V., Bol'shakov A. M.** Cold resistance (engineering evaluation method). — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2011. — 195 p. [in Russian].
44. **Getman A. F.** The service life of the vessels and pipelines of nuclear power stations. — Moscow: Énergoatomizdat, 2000. — 427 p. [in Russian].
45. **Makhutov N. A., Permyakov V. N.** Safe operation life of vessels and pipelines. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 516 p. [in Russian].
46. **Lebedev A. A., Koval'chuk B. I., Giginyak F. F., Lomashevskii V. P.** Mechanical properties of structural materials: reference book. — Kiev: Naukova dumka, 1983. — 367 p. [in Russian].
47. **Mechanical engineering. Encyclopedia. Volume II-1. Physical and mechanical properties. Tests of metallic materials.** — Moscow: Mashinostroenie, 2010. — 852 p. [in Russian].
48. **Kogaev V. P., Makhutov N. A., Gusenkov A. P.** Calculations of machine parts and structures for strength and durability: Reference book. — Moscow: Mashinostroenie, 1985. — 224 p. [in Russian].
49. **Bolotin V. V.** Resource of machines and structures. — Moscow: Mashinostroenie, 1990. — 448 p. [in Russian].
50. **Levin V. A., Morozov E. M., Matvienko Yu. G.** Selected nonlinear problems of fracture mechanics. — Moscow: Fizmatlit, 2004. — 408 p. [in Russian].
51. **Krasovskii A. Ya.** Brittleness of metals at low temperatures. — Kiev: Naukova dumka, 1980. — 340 p. [in Russian].
52. **Astaf'ev V. I., Radaev Yu. N., Stepanova L. V.** Nonlinear fracture mechanics. — Samara: Izd. «Samar'skii universitet», 2001. — 632 p. [in Russian].
53. **Ivanova V. S., Balankin A. S., Bunin I. Zh., Oksogoev A. A.** Synergetics and fractals in materials science. — Moscow: Nauka, 1994. — 383 p. [in Russian].
54. **Margolin B. Z., Fomenko V. N., Gulenko A. G., Kostylev V. I., Shvetsova V. A.** Further development of the "Prometheus" model and the Unified Curve method. Part 1. Development of the "Prometheus" model / Vopr. Materialoved. 2016. N 4(88). P. 120 – 150.
55. **Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I.** Further development of the "Prometheus" model and the Unified Curve method. Part 2. Development of the Unified Curve method / Vopr. Materialoved. 2016. N 4(88). P. 151 – 178.
56. **Morozov N. F., Petrov Yu. V.** Problems of the dynamics of the solids fracture. — St. Petersburg: Izd. S.-Peterburgskogo universiteta, 1997. — 132 p. [in Russian].