

УДК 620.172.2:620.171

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-41-54

УНИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ. ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ И ФОРМИРОВАНИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

© Н. А. Махутов¹, В. В. Москвичев², Е. М. Морозов³, Р. В. Гольдштейн⁴

Статья поступила 18 апреля 2017 г.

Работа посвящена проблемным вопросам унификации методов механических испытаний конструкционных материалов на трещиностойкость и деятельности Научно-методической комиссии по стандартизации в области механики разрушения Научно-технического совета Госстандарта СССР в связи с 40-летием ее создания. Методические основы испытаний на трещиностойкость рассмотрены в связи с видами предельных состояний материалов и конструкций с отражением отечественного опыта исследований характеристик хрупкого разрушения. Результаты научно-организационной деятельности комиссии представлены в исторической ретроспективе с указанием постановочных задач и научных предпосылок создания нормативно-технических документов в области экспериментальных методов механики разрушения. Показана взаимосвязь и преемственность методических принципов испытаний по определению характеристик механических свойств и трещиностойкости. Кратко описаны содержания ГОСТ 25.506–85, методических указаний и рекомендаций, регламентирующих определение характеристик трещиностойкости при статическом, динамическом и циклическом нагружениях. Разработанные НТД стали основой нормативной базы для подготовки методических документов по испытаниям различных конструкционных материалов, описанию условий развития трещин, видов нагружения, экстремальных состояний материалов и воздействий. Подготовка и публикация ГОСТ 25.506–85 предопределили начальный этап становления и дальнейшее плодотворное развитие расчетно-экспериментальных методов механики разрушения.

Ключевые слова: механика разрушения; методы испытаний на трещиностойкость; предельные состояния; стандартизация; нормативно-технические документы; характеристики трещиностойкости.

Научно-методическая комиссия по стандартизации (НМКС) в области механики разрушения — уникальная научно-организационная структура, деятельность которой была прервана событиями начала 1990-х годов. Работа НМКС предопределила практическое развитие методов механики разрушения в СССР и России. Уникальность и эффективность этого научно-организационного проекта определяются организационными принципами, заложенными и сформировавшимися в процессе работы комиссии:

открытостью и добровольностью для организаций и отдельных специалистов, желающих принять участие в работе комиссии;

высоким профессионализмом и демократичностью членов комиссии;

коллегиальностью в принятии решений, зачастую после жестких научных дискуссий, носивших доброжелательный и уважительный характер;

бескорыстной научной работой членов комиссии (командировочные расходы оплачивала направляющая организация, дополнительные расходы, связанные с проведением заседаний, — принимающая сторона);

территориальной распределенностью работы комиссии, что с одной стороны расширяло географию механики разрушения с образованием новых научных точек роста, а с другой — приводило к интеграции специалистов и нацеливало на решение прикладных задач механики разрушения.

Проблемные вопросы унификации методов испытаний на трещиностойкость рассматривались в 1970–1980-е гг. в обзорных, постановочных и информационных статьях [1–9], методические особенности испытаний активно обсуждались на страницах журналов «Заводская лаборатория» (Москва), «Проблемы прочности» (г. Киев), «Физико-химическая механика материалов» (г. Львов). Осознанию важности свойства трещиностойкости не только как характеристики со-

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова 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.

противления материала росту трещин, но и как расчетной характеристики способствовала разработка в рамках механики разрушения концепции и методов построения норм на типы и размеры дефектов и трещин, допустимых в элементах конструкций с учетом эксплуатационных и экстремальных механических нагрузок, физико-химических воздействий и предельных состояний [2, 10 – 15]. Данная работа является данью глубокого уважения к заслугам большого числа научных работников, инженеров и специалистов, принимавших участие в работе комиссии, научные результаты которых обеспечили плодотворное развитие механики разрушения и ее приложений в последующие годы.

Постановка проблемы унификации методов испытаний на трещиностойкость

Развитие экспериментальных методов механики деформируемого твердого тела (МДТТ) в первую очередь в области механических испытаний конструкционных материалов в первой половине XX века предопределило формирование в технически развитых странах национальных систем стандартизации. Направления и методические основы стандартизации, технологии и оборудование, применяемые при испытаниях конструкционных материалов, характеризовались едиными подходами, следующими из потребностей расчетного обеспечения прочности, ресурса, устойчивости, теплостойкости и прочих характеристик при создании машин, конструкций, инженерных сооружений и технических систем. Для различных видов предельных состояний материалов и конструкций — основных (ОПС), дополнительных (ДПС) и аварийных ситуаций (АПС) [13, 14] — соотношения между критериальной величиной и ее предельным значением имеют вид неравенства:

$$C_s \leq [C] = C_m/n, \quad (1)$$

где C_s — расчетная характеристика напряженно-деформированного состояния (общего, местного, локального), описываемого силовыми, деформационными или энергетическими параметрами для элемента конструкции и определяемого методами МДТТ, численными (главным образом МКЭ, МГЭ, МКР) или экспериментальными методами; $[C]$ — допускаемое (предельное) значение расчетной характеристики, устанавливаемое по экспериментально определяемым характеристикам механических свойств (ХМС) и трещиностойкости (ХТ) конструкционных материалов (C_m) с использованием коэффициентов запаса n ($n \geq 1,0$).

Определение величины C_s как расчетной характеристики имеет свои проблемы, при этом возникают большие ограничения по нормативному оформлению используемых расчетных и экспериментальных методов. Работа, предпринимаемая в этом направлении,

сводится к подготовке различных методических рекомендаций и руководящих документов, имеющих, как правило, отраслевой характер, отражающих общие положения по применению отдельных методов (аналитических, численных, экспериментальных) анализа напряженно-деформированных состояний.

Вопросы нормативного оформления процедур, необходимых при анализе неравенств типа (1), наиболее успешно решались при экспериментальном определении характеристик C_m . Именно в этом направлении были достигнуты значительные успехи в области унификации методов испытаний конструкционных материалов как в отечественной, так и зарубежной практике экспериментального обоснования расчетных значений ХМС. В качестве основных предметных целей унификации обозначались геометрия и размеры, схемы и режимы нагружения образцов, силовое оборудование, технологии регистрации деформаций, усилий и диаграмм деформирования, методы их обработки и номенклатура определяемых характеристик. Методы и средства испытаний при определении характеристик C_m развивали в целях:

сравнительной оценки вновь разрабатываемых конструкционных материалов и обоснования вариантов оптимальных технологических процессов их производства и обработки;

определения критериальных характеристик материалов, используемых при расчетах прочности и ресурса конструкции для различных предельных состояний с учетом условий их эксплуатации.

При анализе предельных состояний (ОПС, ДПС, АПС) элементов конструкций и технических систем используются различные характеристики C_m конструкционных материалов. Наступление основных предельных состояний связано с нарушением прочности при действии максимальных нагрузок, нарушением условий эксплуатации при возникновении трещин различной природы (усталостных, коррозионных, радиационных и т.п.), развитием пластических деформаций, возникновением общей или местной потери устойчивости. В этом случае в качестве характеристик C_m применяются, в частности, предел текучести σ_T , временное сопротивление σ_B , сопротивление разрыву S_K , равномерная пластическая деформация e_T , разрушающая деформация e_K , относительное сужение ψ_c и удлинение δ_c , перемещения (прогибы) f , определяемые по ГОСТ 1497–84.

Дополнительные типы предельных состояний (ДПС) отражают наличие и развитие в конструкциях технологических дефектов и эксплуатационных трещин при статическом и циклическом нагружениях, дефектов коррозионно-механического происхождения и предполагают:

наступление разрушения — хрупкого, квазихрупкого или вязкого — с инициацией процесса от технологического дефекта или усталостной трещины при действии максимальных рабочих нагрузок, при воз-

никновении перегрузок в аварийном режиме работы или нерасчетных нагрузок повышенного уровня;

образование и развитие трещин малоциклового усталости от повторных нагрузок, особенно в зонах концентрации напряжений, или трещин многоциклового усталости от вибрационных нагрузок с большим числом циклов нагружения ($N > 10^5$);

образование и развитие трещин коррозионно-механического характера в условиях воздействия коррозионных сред;

образование и развитие трещин при радиационно-механических воздействиях.

Предельные состояния конструкций в аварийных ситуациях (АПС) связаны с экстремальным падением несущей способности (на 50–90 %) или долговечности (на 1–2 порядка), разрушениями от вторичных факторов, тепловыми повреждениями от первичных и вторичных поражающих факторов.

При анализе ДПС и АПС традиционных характеристик механических свойств, используемых при анализе основных предельных состояний, оказалось недостаточно и в рассмотрение были введены критериальные соотношения линейной и нелинейной механики разрушения. Механика разрушения ввела в научный оборот новые представления о сопротивлении материала внешнему воздействию — способность материала сопротивляться развитию в нем магистральных трещин (трещиностойкость — в отечественной научной литературе, вязкость разрушения (fracture toughness) — в англоязычной). Этапы развития механики разрушения как составной части МДТТ можно проследить по классическим монографическим изданиям [13–33 и др.]. В период 1945–1960 гг. были поставлены опыты по определению характеристик сопротивления возникновению хрупкого разрушения от исходных трещин, показавшие недостаточность для обеспечения прочности использования традиционных стандартных характеристик механических свойств. Дальнейшее развитие теоретических основ механики разрушения (1955–1970 гг.) выдвинуло одну из наиболее важных характеристик напряженно-деформированного состояния и прочности хрупких тел с трещинами — коэффициент интенсивности напряжений. В период 1965–1990 гг. основное внимание было уделено вопросам экспериментального определения силовых, деформационных и энергетических критериев, кинетике развития трещин при различных видах нагружения, методам практических приложений механики разрушения. С середины 1970-х годов и в дальнейшем положения линейной и нелинейной механики разрушения, деформационные и энергетические критерии образования и развития разрушения стали рассматриваться как наиболее перспективные для приложений в решении задач конструкционной прочности и ресурса технических систем и конструкций с учетом наличия технологических и эксплуатационных дефектов. Принципиальное значение в этих условиях

приобрела проблема унификации методов испытаний на трещиностойкость. Результаты ее решения кратко отражены в данной статье.

Отечественный опыт определения и исследования характеристик хрупкого разрушения

Проблема хрупкого разрушения впервые в России обозначилась в начале XX века при разрушениях рельсовых путей Транссибирской железнодорожной магистрали. Однако опыт создания и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры в Европе, США и Центральной России не мог быть использован в условиях Сибири при температурах до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Понятия хладноломкости и хрупкости с 20–30-х годов прошлого столетия стали базироваться на сравнительных и количественных оценках по результатам ударных испытаний образцов с надрезами типа Шарпи и Менаже в широком диапазоне климатических температур — от $+50$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ — с определением удельной работы разрушения — ударной вязкости a_n [34, 35].

Интенсивное промышленное освоение Сибири и Севера в предвоенные годы и особенно мощное развитие тяжелой и горнодобывающей промышленности на Урале и в Сибири в суровые военные годы дало новый импульс и неоценимый опыт проверки научных, конструкторских и технологических решений проблем хладноломкости. При этом в развитие первых фундаментальных работ Н. Н. Давиденкова, А. Ф. Иоффе и В. Д. Кузнецова в исследованиях А. П. Гуляева, А. А. Степанова, Н. П. Щапова и в дальнейшем М. Н. Георгиева, Б. А. Дроздовского, В. П. Ларионова, П. Д. Одесского и др. был обоснован тезис, что хладноломкость является не столько свойством, зависящим от структуры и состава, сколько состоянием металла, зависящим от температуры, скорости нагружения, уровня концентрации напряжений [35–41].

Анализ массовых разрушений конструкций при низких температурах и температурных зависимостей ударной вязкости показал, что сопротивление хрупкому разрушению резко снижается в области критических температур хрупкости T_k , которые могут быть использованы для расчетной оценки температурного запаса вязкости [34]

$$n_T = (T^{\circ} - T_k)/T^{\circ}, \quad (2)$$

где T° — минимальная температура (К) в процессе эксплуатации.

Влияние температуры, скорости нагружения, степени пластического деформирования в предположении двух видов разрушения — хрупкого (отрывом) и вязкого (срезом) анализируется на основе схем (диаграмм) механического состояния (рис. 1) [14].

Переход от вязких разрушений к хрупким наблюдается в результате увеличения скорости деформирования (см. рис. 1, а, схема П. Людвига) или снижения

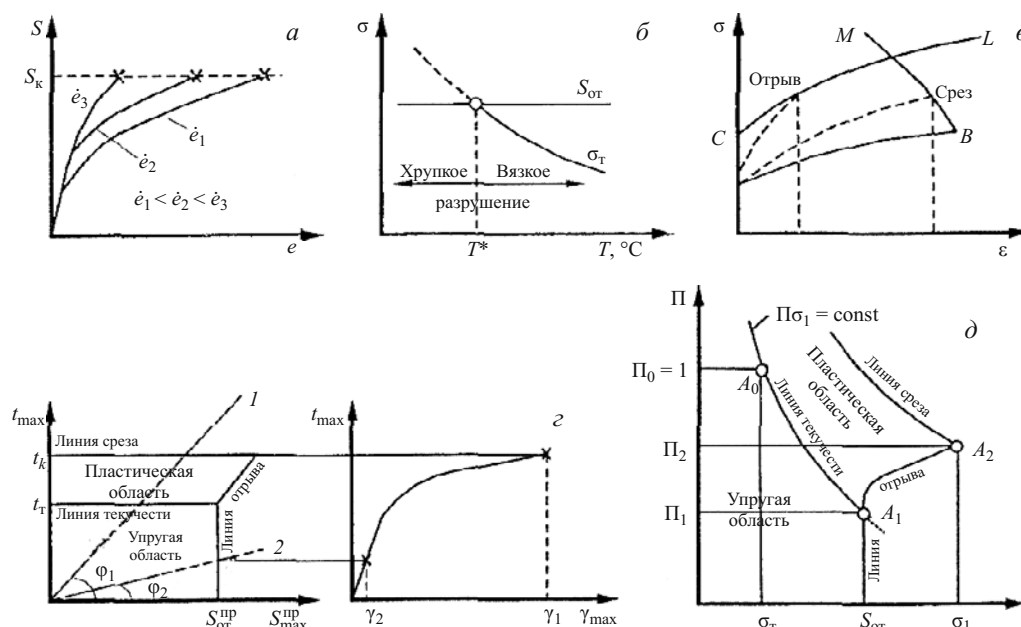


Рис. 1. Схемы механического состояния (*a* — П. Людвига, где $\dot{\epsilon}$ — скорость деформирования; *b* — А. Ф. Иоффе, где $S_{от}$ — сопротивление отрыву) и диаграммы предельного состояния материала (*v* — диаграмма Н. Н. Давиденкова; *z* — Я. Б. Фридмана; *d* — Г. Шнадта)

температуры (см. рис. 1, *b*, схема А. Ф. Иоффе) и связан с повышением сопротивления пластическому деформированию, обуславливающего уменьшение предельной пластической деформации. Схема Н. Н. Давиденкова [34] (см. рис. 1, *v*) определяет не только два характера разрушения, но и два вида сопротивления разрушению — сопротивление срезу (кривая *MB*) при вязком разрушении и сопротивление отрыву (кривая *CL*) при хрупком разрушении. Обобщение этой схемы на случай сложного напряженного состояния дано Я. Б. Фридманом [36] при построении диаграммы механического состояния (см. рис. 1, *z*) в координатах $S_{max}^{пр} - t_{max}$ ($S_{max}^{пр}$ — максимальные истинные напряжения растяжения по 2-й гипотезе прочности; t_{max} — наибольшие касательные напряжения по 3-й гипотезе прочности) для данного напряженного состояния. В виде прямых линий наносят предел текучести t_f , сопротивление срезу t_k и сопротивление отрыву $S_{от}^{пр}$. Вид напряженного состояния характеризуется функцией

$$P = \operatorname{tg} \varphi = \frac{t_{max}}{S_{max}^{пр}} = \frac{1-\beta}{2[1-\mu(\alpha+\beta)]}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент Пуассона; $\alpha = \sigma_2/\sigma_1$, $\beta = \sigma_3/\sigma_1$.

Если луч, соответствующий определенному значению φ , вначале пересекает линию t_k , то разрушение происходит путем среза, если линию $S_{от}^{пр}$, то — путем отрыва.

Диаграмма предельного состояния (см. рис. 1, *d*), предложенная Г. Шнадтом, также определяет два вида

разрушения — отрыв и срез, однако в качестве функции $P = f(\alpha, \beta)$ принимается величина

$$P = \frac{\sigma_i}{\sigma_1} = \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2 - \alpha - \alpha\beta - \beta}, \quad 0 \leq P \leq 2. \quad (4)$$

Схема А. Ф. Иоффе (см. рис. 1, *b*) вводит представление о критических температурах хрупкости и сопротивлении отрыву $S_{от}$ материала, не зависящего от температуры испытаний, при этом условие $\sigma_T = S_{от}$ определяет значение критической температуры.

В послевоенные годы в Сибири и на Севере интенсивно добывали, перерабатывали и использовали нефть, газ, уголь, металлические руды и другие полезные ископаемые — создавали крупнейшие оборонные (в том числе ядерные) комплексы. В этих условиях на одно из первых мест была выдвинута научно-техническая проблема хладостойкости материалов и конструкций. Здесь существенное значение имели результаты систематических научных исследований, выполненных С. В. Вансовским, Б. А. Дроздовским, П. Ф. Кошелевым, И. О. Пашковым, Г. И. Погодиным-Алексеевым, Я. М. Потаком, С. И. Ратнер, Г. В. Ужиком, Я. Б. Фридманом, Б. Б. Чечулиным, Е. М. Шевандиным [36–38, 42, 43 и др.].

Массовый переход в это время на сварные соединения поставил новые вопросы в проблемах хладноломкости и хладостойкости исходных материалов, зон сварных швов и сварных конструкций в целом. В этом цикле научных и прикладных исследований исключительно важное место приобрели работы В. А. Винокурова, И. В. Горынина, Г. В. Жемчужникова, Б. С. Касаткина, Л. А. Копельмана, И. В. Кудрявцева, О. З. Кудрявцева, С. А. Куркина, В. П. Ларионова,

Н. П. Лякишева, Н. П. Мельникова, Г. А. Николаева, Н. О. Окерблома, Б. Е. Патона, Е. О. Патона, Н. Н. Рыкалина, С. В. Серенсена и др. На базе выполненных исследований в 1960 – 1970-е годы были заложены научные основы создания машин и конструкций в северном исполнении.

Последняя четверть XX века проходила под знаком объединения двух основополагающих научных направлений в области прочности и ресурса машин и конструкций — развитие методов расчетно-экспериментального определения базовых характеристик хладостойкости и трещиностойкости с использованием критериев механики разрушения. По этим направлениям анализа хладостойкости и трещиностойкости в отечественной науке принципиально важные результаты были получены А. Е. Андрейкиным, Р. В. Гольдштейном, Г. П. Карзовым, А. Я. Красовским, В. Г. Кудряшовым, В. П. Ларионовым, Н. А. Махутовым, Е. М. Морозовым, В. В. Новожиловым, В. В. Панасюком, В. З. Партоном, Ю. Н. Работновым, Г. П. Черепановым, А. А. Чижигом, С. Я. Яремой и др.

Таким образом, проблемные вопросы причин хрупкого разрушения элементов машин и конструкций предопределили разработку теоретических основ и проведение массовых экспериментальных исследований разрушения хрупких тел, характеристик трещиностойкости материалов и конструкций.

Для отечественной практики развития исследований по проблемам разрушения большое значение имела оперативная организация переводов на русский язык иностранных изданий, отражавших зарубежный опыт расчетов и испытаний на трещиностойкость [16, 17, 22, 28, 29, 44, 45 и др.].

Создание Научно-методической комиссии по стандартизации в области механики разрушения Госстандарта СССР

Актуальность решения проблемы унификации методов испытаний конструкционных материалов на трещиностойкость в середине 1970-х годов предопределилась следующими обстоятельствами.

1. Внутренняя логика и успехи развития механики разрушения в части формирования критериальной базы, разработки методик экспериментального определения отдельных критериальных характеристик S_m в формуле (1) и методов расчета на трещиностойкость требовали соответствующего нормативного оформления.

2. Резкое увеличение в стране числа специалистов, занятых исследованиями в новой перспективной области МДТТ — механике разрушения, обусловило огромный рост числа публикаций научных работников, специалистов отраслевых институтов, КБ и заводских лабораторий. Этот процесс сопровождался образованием неформальных инициативных групп и творческих коллективов из разных организаций и институтов, объединенных общими научными инте-

ресами к прочности тел с трещинами и проблемам механики разрушения. В 1973 г. при секции «Металловедение и термическая обработка» МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского начал работу постоянно действующий научно-технический семинар «Проблемы разрушения металлов». Руководителями семинара стали Е. М. Морозов и М. Н. Георгиев. Заседания семинара проводились один раз в месяц на протяжении семнадцати лет. На семинаре прослушивали, как правило, один доклад, за которым следовали неограниченные временем вопросы и обсуждения. Труды семинара опубликованы в четырех сборниках — в 1975, 1977, 1980 и 1989 гг. [46 – 49].

В 1975 г. при участии М. Н. Георгиева, Б. А. Дроздовского, В. Г. Кудряшова, Е. М. Морозова и ряда других ученых состоялось первое обсуждение вопроса о необходимости создания специального научного органа для разработки методик экспериментального определения характеристик трещиностойкости, например, в форме комиссии. Начальный список членов этой комиссии включал десять человек. Возглавила организационную работу комиссии профессор В. С. Иванова (ИМЕТ АН СССР). Однако вскоре она покинула свой пост и вопрос о председателе комиссии оставался некоторое время открытым. К середине 1970-х годов ряд ведущих специалистов, конкретно занимавшихся вопросами механики разрушения, защитили докторские диссертации (Г. П. Карзов, Н. А. Махутов, Е. М. Морозов, В. В. Панасюк, Г. П. Черепанов, А. А. Чижик, Д. М. Шур и др.), что существенно продвинуло развитие механики разрушения в стране, открыло новые перспективы для расширения круга специалистов в этой области и формирования кадрового потенциала нового поколения.

3. В рамках Государственного пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1976 – 1980 гг. в соответствии с заданием 6.1.01.04 «Стандарты, устанавливающие методы расчета, испытаний и контроля долговечности, ремонтпригодности, прочности и износостойкости машин, механизмов и приборов» в 1976 – 1977 гг. ИМАШ АН СССР и ВНИИНМАШ под научным руководством академика АН УССР С. В. Серенсена была разработана программа комплексной стандартизации «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении». Координация работ по программе возлагалась на секцию «Расчеты и испытания на прочность» Научно-технического совета Госстандарта СССР (председатель бюро секции д.т.н., профессор В. П. Когаев, заместители — д.т.н. А. П. Гусенков, к.т.н. Е. И. Тавер). Программа предполагала создание около 140 документов, в том числе 35 государственных стандартов на методы механических испытаний конструкционных материалов.

К реализации программы в качестве головных исполнителей и соисполнителей были привлечены более 40 ведущих отраслевых НПО, НИИ и КБ, 20 машиностроительных и машинопотребляющих министерств,

в том числе такие известные коллективы, как ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, ЦИАМ им. П. И. Баранова, ВИАМ, ЦНИИ МПС, ЦНИИ им. А. Н. Крылова, ЦНИИТМАШ, ЦКТИ им. И. И. Ползунова; 11 институтов АН СССР и союзных республик.

Для обеспечения единого научно-методического подхода к работе над заданиями программы были организованы научно-методические комиссии по отдельным проблемам стандартизации методов расчетов и испытаний на прочность: усталости, длительной прочности, трещиностойкости, динамических характеристик, численных методов, фрактографии, акустической эмиссии и т.д. К работе в комиссиях были привлечены известные специалисты отечественной науки и техники.

В структуре секции было создано 13 Научно-методических комиссий по стандартизации (НМКС), персональный состав которых был опубликован в 1982 г., в том числе состав НМКС в области механики разрушения: Ю. Н. Работнов — председатель комиссии; Н. А. Махутов, Е. И. Тавер — заместители председателя; Л. К. Бозрова — ученый секретарь; члены комиссии: В. Т. Алымов, А. Е. Андрейкив, В. В. Аниковский, Н. И. Анненков, Е. М. Баско, Г. Ю. Бенгус, Г. С. Васильченко, А. Н. Васютин, О. Н. Винклер, В. А. Винокуров, В. А. Волков, Г. А. Вомпе, М. Н. Георгиев, В. С. Гиренко, А. С. Гневко, Р. В. Гольдштейн, А. А. Гудков, А. П. Гуляев, С. Е. Гуревич, В. Н. Данилов, Ю. Б. Дробот, Б. А. Дроздовский, А. Б. Злочевский, В. С. Иванова, Г. П. Карзов, С. И. Кишкина, С. Е. Ковчик, Л. А. Копельман, Л. Н. Косарев, П. Ф. Кошелев, А. Я. Красовский, В. Г. Кудряшов, В. П. Ларионов, А. Л. Майстренко, В. М. Маркочев, В. Н. Минаев, Е. М. Морозов, В. В. Москвичев, П. Д. Одесский, В. В. Панасюк, В. Н. Потапов, Е. Ю. Ривкин, И. М. Розенштейн, А. Н. Романов, Р. Н. Рыньков, В. Л. Соболев, Н. Д. Соболев, А. М. Соколов, Ю. П. Солнцев, Н. М. Фонштейн, А. А. Чижик, Е. А. Шур, С. Я. Ярема.

Первое организационное заседание комиссии состоялось в декабре 1976 г. во ВНИИНМАШ под председательством академика АН УССР С. В. Серенсена. На начальном этапе общее руководство работой комиссии осуществлял академик Ю. Н. Работнов. В дальнейшем ее практическая деятельность осуществлялась под научным руководством д.т.н., профессора, члена-корреспондента АН СССР Н. А. Махутова.

В последующие годы активное участие в работе комиссии принимали: В. Т. Алымов, Ж. М. Бледнова, Л. Р. Ботвина, А. В. Викулин, А. Ф. Гетман, Я. А. Гохберг, Ю. И. Егоров, В. В. Иванов, В. С. Иванова, А. Г. Козлов, Н. А. Костенко, В. Д. Кулиев, А. В. Лыглаев, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Моношков, В. П. Науменко, И. В. Орыняк, О. П. Осташ, А. А. Отсемина, Ю. И. Пашков, А. А. Попов, О. Н. Романив, О. И. Слепцов, Б. Н. Тимофеев, В. М. Тороп, В. Т. Тро-

щенко, А. П. Черняев, В. Н. Шлянников и многие другие.

Деятельность НМКС в области механики разрушения

Направления и организация работы. Планомерная работа НМКС над созданием нормативно-технических документов (НТД) по методам расчетов и испытаний на трещиностойкость началась в 1977 г. Основные организационные задачи работы комиссии в области стандартизации:

- содействие в проведении единой научно-технической политики;

- разработка и рассмотрение предложений по развитию методов расчетов, испытаний, средств измерений;

- привлечение широкой научно-технической общественности к участию в работе по стандартизации;

- обобщение отечественного и зарубежного опыта работы по разработке НТД в области расчетов и испытаний на прочность и трещиностойкость;

- рассмотрение технических заданий (ТЗ) на разработку государственных стандартов, методических указаний, методических рекомендаций, первых и окончательных редакций этих документов, подготовка НТД к изданию;

- пропаганда и внедрение разработанных НТД в производственную, проектную и расчетную практику инженерной деятельности.

Научная цель деятельности комиссии состояла в разработке на основе современных представлений механики разрушения новых методов экспериментального определения характеристик механических свойства конструкционных материалов, оценивающих их сопротивление развитию трещин (трещиностойкость) в различных условиях нагружения (температура, среда, режимы нагружения, экстремальные условия испытаний).

Начиная с 1977 г. заседания комиссии проходили регулярно — три-четыре раза в год, при этом, как правило, два из них — на предприятиях и в научных организациях разных городов страны — Москве, Ленинграде, Киеве, Одессе, Львове, Волгодонске, Ижевске, Волгограде, Баку, Челябинске, Красноярске, Якутске, Боровске, Паланге. Программа таких выездных заседаний составлялась на несколько дней и включала знакомство с производством или научными результатами, научную часть с инициативными и заказными докладами на заранее определенную тему, постановочные лекции и техническую часть с докладами по различными методическим вопросам разрабатываемых НТД и информационными сообщениями об уровне их готовности, принятых замечаниях и предложениях при редакционной обработке отдельных вариантов НТД. Время для докладов и обсуждений не ограничивалось. Работа комиссии держалась главным образом на научном энтузиазме и увлеченности про-

блемой. Так, рекордное время конца заседания — 7 часов утра следующего дня или время начала очередного заседания — 2 часа ночи. Комиссия работала в очень плотном временном режиме, материала для обсуждений всегда было много. В работе одновременно находилось несколько будущих нормативных документов — на разных стадиях готовности. Иногда для экономии времени комиссия заседала в автобусе, где доклад велся через микрофон экскурсовода или на вахтовом теплоходе по дороге на Нефтяные камни в Каспийском море (г. Баку), здесь использовали капитанский громкоговоритель.

Особо следует отметить огромную организационную работу, проведенную зав. отделом и в последующем директором ВНИИ нормализации в машиностроении к.т.н. Е. И. Тавером, зав. лабораторией этого института к.т.н. А. М. Соковиковым, учеными секретарями комиссии к.т.н. Л. К. Бозровой и к.т.н. О. Н. Ноженковой, готовивших повестки заседаний и решавших технические вопросы издания подготовленных НТД. За время работы комиссии до 1991 г. состоялось более 50 заседаний, было подготовлено и издано два стандарта, восемь методических указаний, 26 методических рекомендаций, было заслушано более 480 докладов и сообщений. Последнее заседание НМКС в области механики разрушения состоялось в сентябре 1991 г. в г. Красноярске во время проведения Всесоюзной конференции «Безопасность и живучесть технических систем». В последующие годы инициативной группой членов НМКС (В. Т. Алымов, М. М. Гаденин, Н. А. Махутов, Е. М. Морозов, В. В. Москвичев, А. М. Соковиков и др.) подготовленные ранее НТД были пересмотрены, дополнены и изданы ограниченным тиражом в 1995 г. и 2001 г. в рамках выполнения заданий ГНТП «Безопасность» [50, 51]. В 2005 г. Росстандартом переиздан ряд нормативных документов в области расчетов и испытаний на прочность, в том числе ГОСТ 25.506–85 [52] с продлением сроков его действия.

Научные предпосылки и принципы создания НТД по механике разрушения. Ко времени образования НМКС в стране существовал ряд отраслевых методик испытаний на трещиностойкость и методических разработок отдельных институтов (ФМИ АН УССР, ВИЛС, ВИСХОМ, ИМАШ АН СССР, ЦНИИТМАШ). На основе этих документов и их зарубежных аналогов был составлен перечень, структура и содержание первоочередных материалов для разработки НТД. С учетом новизны и разнообразия определяемых характеристик было принято решение о разработке на первом этапе межотраслевых методических указаний (МУ) и только на втором — государственных стандартов. МУ должны включать максимально возможное число апробированных методик, обеспечивать одновременное определение как можно большего числа характеристик и давать конкретные рекомендации по выбору образцов, методам измерений, проведению испытаний

и обработке результатов, а также содержать терминологию и определения основных понятий и величин.

В основу методов испытаний на трещиностойкость были положены схемы и виды нагружения, конструкции образцов, размеры и ориентация трещин, критерии разрушения и расчетные уравнения, принятые и разработанные в механике разрушения. Характеристики трещиностойкости и методы их определения рассматривались как необходимое дополнение общепринятых стандартных характеристик механических свойств (пределов текучести σ_T и $\sigma_{0,2}$, прочности σ_B , выносливости σ_{-1} , длительной прочности $\sigma_{д.п.}$, ползучести σ_p , относительного сужения ψ , удлинения δ , работы разрушения a и ударной вязкости a_n) при выборе материалов и в расчетах прочности. При этом, как при определении базовых свойств на гладких образцах, в механику разрушения были введены силовые критерии разрушения (K_{Ic} , K_c , $K_{c\sigma}$ — критические коэффициенты интенсивности напряжений; I_c — пределы трещиностойкости), деформационные (δ_c — критическое раскрытие трещин; K_{ec} — критический коэффициент интенсивности деформаций) и энергетические (G_{Ic} , G_c , J_{Ic} , J_c — критическое значение энергии, затрачиваемой на продвижение трещины на единицу длины). Указанные характеристики трещиностойкости расширили набор экспериментально определяемых характеристик C_m конструкционных материалов, необходимых для проведения расчетов на прочность и трещиностойкость.

Принципиальное отличие характеристик трещиностойкости от стандартных характеристик механических свойств состоит в том, что они определяются не только предельными усилиями (или деформациями), но и размерами трещин. При испытаниях на растяжение силой P гладких цилиндрических или плоских образцов с площадью поперечного сечения F_0

$$\{\sigma_T, \sigma_{0,2}, \sigma_B, \sigma_{-1}, \sigma_{д.п.}, \sigma_p\} = P/F_0 = \sigma,$$

$$\delta, \psi = f\left(\frac{\Delta l}{l_0}, \frac{\Delta F}{F_0}\right), \{a\} = f(P/F_0, \delta, m_0). \quad (5)$$

При растяжении силой P широких плоских образцов с центральной трещиной длиной $2l$

$$\{K_{Ic}, K_c, K_{c\sigma}, I_c\} = f\left[\frac{P}{F_0}, \frac{\sigma}{\sigma_T} (\sqrt{l})^{m_\sigma}, m_0\right],$$

$$\{\delta_c, K_{ec}\} = f\left[\frac{P}{F_0}, \frac{\sigma}{\sigma_T} (\sqrt{l})^{m_c}, m_0\right],$$

$$\{G_{Ic}, J_{Ic}, G_c, J_c\} = f\left(\frac{P}{F_0}, \frac{\sigma}{\sigma_T}, l^{m_g}, m_0\right), \quad (6)$$

где f — соответствующие функциональные зависимости критерияльных характеристик разрушения от уровня нагрузок P , свойств материала, размеров об-

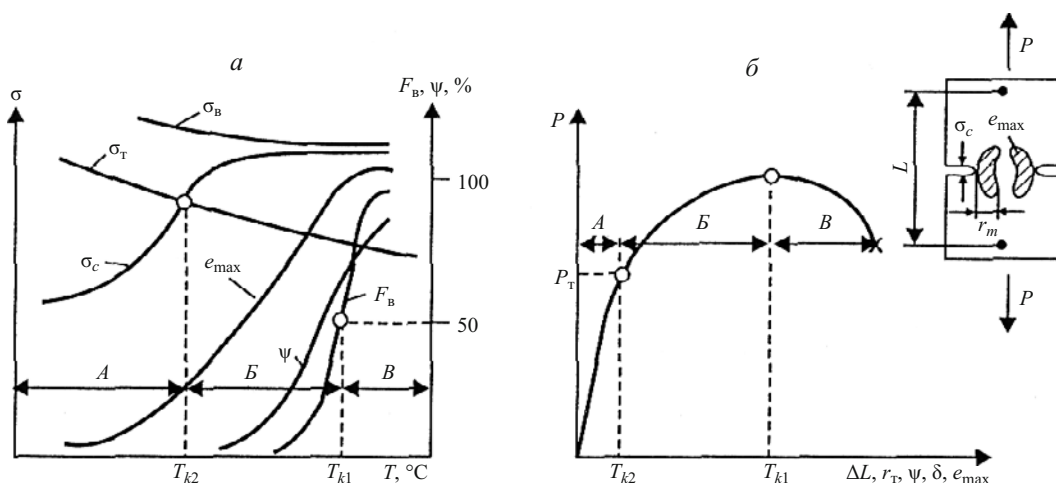


Рис. 2. Температурная схема механического состояния (а) и диаграмма разрушения (б) тела с трещиной

разцов и трещин; m_σ , m_e , m_G — постоянные, зависящие от свойств материала и уровня нагружения σ/σ_T ; m_0 — показатель упрочнения материала в упругопластической области; σ_T — предел текучести.

Параметры σ , δ , a в уравнениях (5) характеризуют номинальные (осредненные по сечению и длине образца) напряжения, деформации и энергию, а ψ — осредненную по сечению образца деформацию. В уравнениях (6) величины K , I , δ , G , J определяют местные напряжения, деформации и энергию в окрестности вершины трещины.

Такое представление обеспечивало преимущество и взаимосвязь экспериментального определения характеристик механических свойств и трещиностойкости конструкционных материалов, расширило и сформировало единую базу данных расчетов на прочность.

Другим важным аспектом при разработке НТД стало понимание того, что в зависимости от условий нагружения, вида напряженного состояния, наличия концентрации напряжений, дефектов и трещин, условий эксплуатации один и тот же конструкционный материал может находиться в различных предельных состояниях (см. рис. 1), реализуемых для тел с трещинами в виде хрупких, квазихрупких и вязких разрушений. Наиболее информативно это отражается температурной схемой механического состояния тел с трещинами Серенсена – Махутова [2, 13, 14] и диаграммой разрушения, представленными на рис. 2. В качестве основного отказаобразующего фактора рассматривается температура эксплуатации, а тип разрушения определяется уровнем пластического деформирования в зоне разрушения. Данная схема характерна для большинства малоуглеродистых и низколегированных сталей, применяемых в металлоконструкциях. Схема строится по результатам низкотемпературных испытаний стандартных гладких образцов (ГОСТ 1497–84, ГОСТ 11150–84) и образцов с трещинами (ГОСТ 25.506–85). На гладких образцах определяются истинное сопротивление разрыву S_K , временное со-

противление σ_B и предел текучести σ_T , при испытаниях образцов с трещинами — разрушающее напряжение σ_c и доля вязкой составляющей в изломе F_B . По температурным зависимостям характеристик разрушения выделяются две критические температуры: T_{k1} при $F_B = 50\%$ и T_{k2} , характеризующаяся точкой пересечения σ_c и σ_T . Принято считать, что при $T > T_{k1}$ (B) возникают вязкие разрушения, при $T < T_{k2}$ (A) — хрупкие, при $T_{k2} < T < T_{k1}$ (B) — квазихрупкие. При переходе от образцов к реальным конструкциям проявляются эффекты конструкционных, эксплуатационных и технологических факторов, выражающиеся в изменении положений температурных зависимостей (в первую очередь σ_c и F_B). Это приводит к изменению абсолютных значений T_{k1} , и T_{k2} и, как следствие, к смене возможного типа разрушения.

Основные признаки для данных типов разрушений представлены в таблице. Тип разрушения характеризуется уровнем напряжений, размером пластической зоны r_T , скоростью развития трещин и долей вязкой составляющей в изломе F_B , отражающей степень пластического деформирования на поверхности разрушения.

Определение критических температур хрупкости T_{k1} , T_{k2} по результатам испытаний гладких образцов и образцов с трещинами также указывает на необходимость совместного анализа характеристик механических свойств и трещиностойкости при проведении расчетных оценок конструкционной прочности.

Основополагающие НТД определения характеристик трещиностойкости. К числу первых методических указаний, предназначенных для определения характеристик трещиностойкости, относятся НТД для следующих видов нагружения:

- при статическом нагружении (головной разработчик ГосНИИмаш);
- при циклическом нагружении (ФМИ АН УССР);
- при динамическом нагружении (ГосНИИмаш);
- на стадии остановки трещины (ВНИИМСС);

Основные признаки хрупкого, квазихрупкого и вязкого разрушений

Тип разрушения	Уровень напряжений σ	Размер пластической зоны r_T	Скорость развития трещины, м/с	Характеристика поверхности разрушения F_B , %
Хрупкое	$<0,8\sigma_T$	$\ll l, B$ (l, B — размер дефекта, конструкции)	200 – 1500	≈ 0 (кристаллический излом)
Квазихрупкое	$>0,8\sigma_T$	$\approx l$	800 – 1500	$\approx 0 - (50 - 60)$
Вязкое	$>\sigma_T$	Сопоставим с размерами сечения	0 – 600	$>50 - 60$

при статическом нагружении сварных соединений (ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР);

при длительном высокотемпературном статическом нагружении (НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова).

Для разработки каждого из этих документов были созданы рабочие группы, возглавляемые специалистами, представляющими ведущие в соответствующих областях институты. Кроме внутреннего контрольного рассмотрения, первую и вторую редакции каждого документа отправляли на внешнее рецензирование и обсуждение. Первую редакцию рассылали в 200 адресов, вторую — в 50 по списку НТС Госстандарта СССР. На очередном заседании рабочая группа докладывала результаты анализа поступивших замечаний и предложений. Такой подход существенно повышал качество подготовки НТД.

При разработке документов, регламентирующих экспериментальные методы и технологии определения характеристик трещиностойкости, во внимание принимали следующие обстоятельства:

с учетом взаимосвязи силовых, деформационных и энергетических характеристик в НТД должно регламентироваться определение максимально возможного числа критериев;

подобие диаграмм деформирования гладких образцов и образцов с трещинами предполагает преемственность технологий проведения эксперимента и прямые аналогии для характерных точек диаграмм деформирования;

для различных схем испытаний образцов и режимов нагружения целесообразно проведение стандартных низкотемпературных испытаний гладких образцов и испытаний образцов на трещиностойкость с выделением температурных диапазонов хрупких, квазихрупких и вязких разрушений;

целью испытаний на трещиностойкость должна стать не только оценка сопротивления конструкционного материала развитию трещин, но и формирование баз данных расчетных характеристик для последующей оценки несущей способности элементов сложных технических систем и конструкций при наличии трещин.

При формировании нормативной базы экспериментальных методов механики разрушения в качестве основных были приняты силовые (K_c , K_{Ic} , I_c , σ_c), деформационные (δ_c , K_{ec}) и энергетические (α_c , G_c , J_c) критерии разрушения.

Определение характеристик трещиностойкости при статическом нагружении. Сначала подготавлива-

ли методические указания РД 50-260–81 [53], которые после практической апробации и корректировки по результатам базового эксперимента [54] были оформлены в ГОСТ 25.506–85 [55]. Определяемые характеристики применимы к трем типам разрушения — хрупкому, квазихрупкому и вязкому, различающимся по степени пластических деформаций в зоне разрушения и уровню номинальных разрушающих напряжений. Для их оценки проводят испытания образцов с предварительно созданной усталостной трещиной на трехточечный изгиб, внецентренное и осевое растяжения. В качестве основных применяют плоские с боковой и центральной трещиной, дисковые и цилиндрические образцы. В процессе испытаний регистрируют диаграммы нагрузка — смещение берегов трещины, при обработке которых с использованием соответствующих формул находят указанные критерии разрушения, которые должны удовлетворять определенным требованиям достоверности.

Корректное и достоверное определение критических значений КИН в условиях плоской деформации (K_{Ic}) стало одной из важнейших методических проблем. Условия плоской деформации считаются выполненными, если размер пластической зоны у вершины трещины не превышает $1/50$ любого характерного размера образца (элемента конструкции), а именно толщины образца t , размера нетто-сечения ($B - l$) или длины трещины l , что достигается выполнением соотношения

$$t, B - l, l \geq \beta(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2, \quad (7)$$

где β — безразмерный коэффициент, учитывающий стеснение пластических деформаций; $\beta = 2,5$ для алюминевых, титановых, магниевых сплавов и сталей; $\beta = 0,6$ для чугунов.

В дополнение к (7) предложен ряд других условий, связанных с ограничением уровня максимальных нагрузок на диаграмме нагрузка — смещение берегов трещины ($P_c/P_Q \leq 1,1$) [17], смещений берегов трещины ($V_c/V_Q \leq 1,2$) [56], относительного остаточного сужения в зоне разрушения ($\psi_c \leq 1,5\%$) [57], относительного приращения длины трещины ($\Delta l \leq 2\%$) [17, 58], уровня номинальных напряжений по нетто-сечению образца ($\bar{\alpha} = \sigma / \sigma_{0,2}$; $\bar{\alpha} \leq 0,7$ по данным [57], $\bar{\alpha} \leq 0,8$ согласно [6, 33]). Аналогично указанным условиям для коэффициентов интенсивности напряжений экспериментально установлены ограничения на размеры пластических зон для критических значений

J -интеграла и раскрытия трещины, отражающие в основном влияние геометрических размеров:

$$t, B-l, l \geq \beta \left(\frac{J_{Ic}}{\sigma_T}; \frac{\delta_c}{e_T} \right). \quad (8)$$

Значение коэффициента β по различным данным принимается от 25 до 200 [55, 59–62].

Требования к размерам образцов и трещин в соответствии с условиями (7) и (8) сформулированы в «мягкой» форме через значения коэффициентов β , что предполагало возможность решения данного вопроса в зависимости от данных условий испытаний и характеристик механических свойств конкретного конструкционного материала.

Определение характеристик трещиностойкости при динамическом нагружении регламентируется РД 50-433–82 [63], являющимися логическим развитием методических указаний [53] для диапазона скоростей изменения коэффициента интенсивности напряжений $\dot{K}_I$ от 10^2 до 10^7 кгс/(мм^{3/2} · мин), рассчитываемого по формуле

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{P}Y}{t\sqrt{b}}, \quad (9)$$

где $\dot{P}$ — скорость нагружения (кгс/мин).

Так же, как и в [50], определение комплекса характеристик трещиностойкости (силовых K_{Ic}^d , K_c^d , деформационных δ_c^d и энергетических α_c^d) для заданной скорости $\dot{K}$ относится к стадии инициации исходной трещины. В диапазоне средних значений $\dot{K}_I$ до 10^4 кгс/(мм^{3/2} · мин) сохраняют силу рекомендации и предложения [50]. При высоких значениях $\dot{K}_I$ с учетом наличия волновых процессов, инерционных усилий и колебаний рекомендованы наиболее оптимальные схемы расположения датчиков усилий и перемещений, требования к их калибровке, методы регистрации перемещений и полных диаграмм разрушения.

Результаты испытаний представляют в виде зависимостей характеристик разрушения, в частности K_{Ic}^d от $\dot{K}_I$, а в случае серийных испытаний с варьированием температуры T предусмотрено получение обобщенных температурно-скоростных зависимостей типа

$$K_{Ic}^d = T \ln \frac{A\dot{K}_I}{\dot{K}_I}, \quad (10)$$

что позволяет сократить объем испытаний в интересующем диапазоне температур и скоростей нагружения. Температурные испытания предполагают определение первых T_{k1} и вторых T_{k2} критических температур, а также температуры нулевой пластичности $T_{н.п.}$, которые наряду с характеристиками трещиностойкости оценивают сопротивление материала развитию трещины.

Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Испытания проводят в соответствии с методическими рекомендациями РД 50-345–82 [64], основное внимание уделяют анализу процесса развития усталостных трещин. Испытания состоят в последовательном измерении при заданных параметрах цикла нагружения длины или глубины растущей трещины и числа циклов нагружения. На основании этих данных строят графики роста трещины, представляющие зависимость длины трещины от числа циклов нагружения;

вычисляют скорость роста трещины dl/dN как средний прирост ее длины за один цикл при заданных условиях испытаний;

устанавливают зависимость скорости роста трещины от величины, характеризующей напряженно-деформированное состояние в ее вершине, и определяют параметры этой зависимости — характеристики сопротивления развитию трещины (трещиностойкости) материала при циклическом нагружении.

В качестве основной характеристики напряженно-деформированного состояния в вершине трещины используют коэффициент интенсивности напряжений K_I . При испытаниях применяют те же типы образцов, что и при статическом нагружении, а также ряд специальных. Окончательные результаты представляют в виде графика $dl/dN - K_I$ (диаграммы циклического разрушения) в двойных логарифмических координатах. Среднюю часть диаграммы циклического разрушения описывают зависимостью, предложенной Пэрисом:

$$dl/dN = C(\Delta K)^n, \quad (11)$$

где C , n — константы (характеристики циклической трещиностойкости); ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжений.

Полностью диаграмму описывают уравнением, обоснованным С. Я. Яремой (ФМИ АН УССР):

$$\frac{dl}{dN} = V_0 \left(\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_{fc} - K_{\max}} \right)^q, \quad (12)$$

где $K_{\max}$ — максимальный коэффициент интенсивности напряжений цикла; K_{th} , K_{fc} , V_0 , q — параметры диаграммы циклического разрушения.

Уравнения (11) и (12) позволяют связать длину трещины и уровень номинальных напряжений с числом циклов нагружения. Для сопоставления материалов по характеристикам циклической трещиностойкости используют значения $K_{\max}$ или ΔK при заданной V или значения скорости трещины V при заданных $K_{\max}$ и ΔK .

Опыты при циклическом нагружении проводят на образцах, аналогичных принятым в [53], на дисковых образцах с центральной трещиной, на плоских и цилиндрических образцах с поверхностной трещиной в воздушной среде при температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$, влаж-

ности 40–60 %, с коэффициентом асимметрии $R = 0 - 0,1$ и частоте 10–20 Гц. Большое значение при этом имеют рекомендуемые методы и средства регистрации трещин, статистическая и компьютерная обработка экспериментальной информации.

Определение характеристик трещиностойкости сварных соединений. Регламентируется методическими рекомендациями МР 170–85 [65] с учетом требований ГОСТ 25.506–85 при кратковременном статическом нагружении с отражением следующих особенностей:

неоднородность механических свойств различных зон сварного соединения;

наличие остаточных напряжений;

наличие дефектов, приводящих при определенных условиях к изменению сопротивления разрушению в процессе термомеханического цикла сварки;

необходимость учета конструктивной формы сварных соединений, вызывающих концентрацию напряжений.

Рекомендации распространяются на сварные соединения, выполненные электродуговой, электронно-лучевой, электрошлаковой и контактной сваркой плавлением, и устанавливают методы их испытаний для случаев, когда при одинаковых значениях модуля упругости пределы текучести и прочности металла сварных швов превосходят соответствующие показатели основного материала. При этом большое значение имеет выбор зоны создания исходного дефекта (металл шва, зона сплавления, термического влияния, основной металл), а также наличие термопластических деформаций и остаточных напряжений в вершине трещины, обусловленных процессом сварки.

Определение характеристик трещиностойкости на стадии остановки трещины. Регламентируется методическими рекомендациями МР 71–82 [66] и включает два вида испытаний. Первое проводят на двухконсольном балочном образце в изотермических условиях, что позволяет оценить стадию остановки трещины, обусловленную уменьшением жесткости напряженного состояния в вершине движущейся трещины. Условия остановки в этом случае описывают с помощью K_c^0 как функции температуры испытаний. Второй вид испытаний с предварительным инициированием хрупкого разрушения проводят на плоских образцах при растяжении с градиентом температур рабочей части, что дает возможность оценить условия остановки, происходящей за счет повышения трещиностойкости материала на пути трещины. В качестве критерия используют температуру материала в вершине остановившейся трещины T_k^0 , а результаты испытаний записывают в виде зависимости $T_k^0 - (\sigma/\sigma_{0,2})$ для данной толщины листа, где σ — исходное номинальное напряжение.

Указанные выше НТД стали основой нормативной базы для разработки методических рекомендаций

по испытаниям на трещиностойкость различных конструктивных материалов, условий развития трещин, видов нагружения, экстремальных состояний материалов и воздействий.

Наиболее важное значение имело то обстоятельство, что НТД были тесно взаимосвязаны по своему внутреннему содержанию и дополняли комплекс традиционных расчетных характеристик новыми критериями характеристиками, позволяющими обеспечить проведение расчетов на прочность тел с трещинами, технологическими и эксплуатационными дефектами и повреждениями.

Издание в 1985 г. ГОСТ 25.506–85 сыграло огромную роль в развитии механики деформирования и разрушения, направлений научных исследований и формировании новых представлений о расчетах на прочность и трещиностойкость. В ретроспективе исследований в области механики разрушения подготовка стандарта может рассматриваться как знаковое событие, подводящее итог начального этапа становления и наиболее плодотворного развития расчетно-экспериментальных методов механики разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н., Фролов К. В., Когаев В. П. и др. Проблемы прочности изделий машиностроения и стандартизации / Стандарты и качество. 1978. № 5. С. 19–21.
2. Махутов Н. А. Расчетные характеристики сопротивления хрупкому разрушению и методы их определения / Заводская лаборатория. 1976. Т. 42. № 8. С. 987–995.
3. Махутов Н. А. Механические испытания и прочность конструкции (обзор) / Заводская лаборатория. 1977. Т. 43. № 10. С. 1260–1270.
4. Махутов Н. А., Тавер Е. И. Стандартизация методов механических испытаний на трещиностойкость / Заводская лаборатория. 1984. Т. 50. № 1. С. 1–3.
5. Фролов К. В., Махутов Н. А. Механические испытания материалов в проблемах машиноведения / Заводская лаборатория. 1988. Т. 54. № 10. С. 50–53.
6. Дроздовский Б. А., Морозов Е. М. Методы оценки вязкости разрушения / Заводская лаборатория. 1976. Т. 42. № 8. С. 996–1004.
7. Махутов Н. А., Тавер Е. И., Бозрова Л. К. О деятельности научно-методической комиссии по стандартизации в области механики разрушения / Физико-химическая механика материалов. 1980. Т. 16. № 3. С. 124–126.
8. Махутов Н. А., Панасюк В. В., Тавер Е. И. Унификация методов испытаний в механике разрушения / Унификация методов испытаний металлов на трещиностойкость. Вып. 2. — М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 5–10.
9. Махутов Н. А., Кошелев П. Ф., Черняев А. П. и др. Унификация механических испытаний в области механики разрушения / Унификация и стандартизация методов расчетов и испытаний на прочность. Вып. 1. — М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 40–49.
10. Баренблатт Г. И. О некоторых общих представлениях математической теории хрупкого разрушения / ПММ. 1964. Т. 28. Вып. 4. С. 630–643.
11. Баренблатт Г. И., Вавакин А. С., Гольдштейн Р. В., Ентов В. М., Салганик Р. Л. Общая схема применения квазистатической теории трещин к прогнозированию прочности и долговечности элементов конструкций. В сб.: Пластическая деформация легких и специальных сплавов. Вып. 1. — М.: Металлургия, 1978. С. 170–180.
12. Гольдштейн Р. В. Некоторые вопросы механики разрушения крупногабаритных конструкций. В кн.: Механика разрушения. Разрушение конструкций. Сер. Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 20. — М.: Мир, 1980. С. 228–255.
13. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2-х ч. — Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1: Критерии

- прочности и ресурса. — 494 с.; Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.
14. **Москвичев В. В.** Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений. — Новосибирск: Наука, 2002. — 106 с.
 15. **Копельман Л. А.** Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. — Л.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
 16. Прикладные вопросы вязкости разрушения / Пер. с англ.; под ред. Б. А. Дроздовского. — М.: Мир, 1968. — 552 с.
 17. **Браун У., Сроули Д.** Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации / Пер. с англ.; под ред. Б. А. Дроздовского и Е. М. Морозова. — М.: Мир, 1972. — 246 с.
 18. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. В 4-х т. — Киев: Наукова думка, 1988 — 1990. Т. 1. Основы механики разрушения. — 488 с.; Т. 2. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. — 620 с.; Т. 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их наблюдения. — 436 с.; Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. — 680 с.
 19. **Васильченко Г. С., Кошелев П. Ф.** Практическое применение механики разрушения для анализа прочности конструкций. — М.: Наука, 1974.
 20. **Ботвина Л. Р.** Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
 21. Трещиностойкость материалов и элементов конструкций / Труды Всесоюзного симпозиума. — Киев: Наукова думка, 1980. — 370 с.
 22. Разрушение / Под ред. Г. Либовица; пер. с англ. В 7 т. — М.: Мир, Машиностроение. Металлургия, 1973 — 1978.
 23. **Партон В. З., Морозов Е. М.** Механика упругопластического разрушения. — М.: Наука, 1985. — 504 с.
 24. **Махутов Н. А.** Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
 25. **Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т.** Сварные сосуды высокого давления. — Л.: Машиностроение, 1982. — 287 с.
 26. **Карзов Г. П., Марголин В. З., Швецова В. А.** Физико-механическое моделирование процессов разрушения. — СПб.: Политехника, 1993. — 391 с.
 27. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
 28. **Броек Д.** Основы механики разрушения / Пер. с англ. — М.: Высшая школа, 1980. — 368 с.
 29. **Хеллан К.** Введение в механику разрушения / Пер. с англ.; под ред. Е. М. Морозова. — М.: Мир, 1988. — 364 с.
 30. **Пестриков В. М., Морозов Е. М.** Механика разрушения. — СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. — 552 с.
 31. **Матвиенко Ю. Г.** Модели и критерии механики разрушения. — М.: Физматлит, 2006. — 328 с.
 32. **Панасюк В. В.** Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. — Киев: Наукова думка, 1968. — 246 с.
 33. **Махутов Н. А.** Сопrotивление элементов конструкций хрупкому разрушению. — М.: Машиностроение, 1974. — 200 с.
 34. **Давиденков Н. Н.** Динамические испытания металлов. — М.: ОНТИ, 1936. — 395 с.
 35. **Махутов Н. А., Морозов Е. М., Матвиенко Ю. Г.** Становление и развитие испытаний на ударную вязкость в СССР и России / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. Т. 67. № 7. С. 42 — 49.
 36. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. — М.: Машиностроение, 1974. Ч. 1. — 472 с. Ч. 2. — 368 с.
 37. **Дроздовский Б. А., Фридман Я. Б.** Влияние трещин на механические свойства сталей. — М.: Металлоиздат, 1961. — 260 с.
 38. **Шевандин Е. М., Разов И. А.** Хладноломкость и предельная пластичность металлов в судостроении. — Л.: Судостроение, 1965. — 336 с.
 39. **Георгиев М. Н.** Вязкость стали. — М.: Металлургия, 1973. — 224 с.
 40. **Георгиев М. Н.** Трещиностойкость железнодорожных рельсов. — Кемерово: Мастер-флаг, 2006. — 212 с.
 41. **Одесский П. Д., Ведяков И. И.** Ударная вязкость сталей для металлических конструкций. — М.: Интермет Инжиниринг, 2003. — 232 с.
 42. **Ужик Г. В.** Сопrotивление отрыву и прочность металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 255 с.
 43. **Кошелев П. Ф.** Механические свойства сплавов для криогенной техники. — М.: Машиностроение, 1971. — 384 с.
 44. Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению / Пер. с англ.; под ред. Ю. Н. Работнова. — М.: Мир, 1972. — 439 с.
 45. Ударные испытания металлов / Пер. с англ. В. М. Маркочева; под ред. Б. А. Дроздовского и Е. М. Морозова. — М.: Мир, 1973. — 317 с.
 46. Проблемы разрушения металлов. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1975. — 208 с.
 47. Проблемы разрушения металлов. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1977. — 175 с.
 48. Проблемы разрушения металлов. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1980. — 246 с.
 49. Проблемы разрушения металлов и фратография. Материалы семинаров. — М.: Изд. МДНТП, 1989. — 138 с.
 50. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации. — М.: Изд. МИБ СТС. Ассоциация КОДАС, 1995. — 360 с.
 51. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации. Т. 2. — М.: Изд. ФЦТП ПП «Безопасность». Ассоциация КОДАС, 2001. — 254 с.
 52. Механические испытания. Расчеты и испытания на прочность. — М.: Стандартиформ, 2005. — 240 с.
 53. РД 50-260-81. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. Введ. 01.07.1982. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 56 с.
 54. **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. — М.: Изд-во стандартов, 1982. Вып. 2. С. 10 — 31.
 55. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 62 с.
 56. **Маркочев В. М., Морозов Е. М.** О критериях достоверности экспериментального определения вязкости разрушения / ФХММ. 1976. № 2. С. 21 — 23.
 57. **Проходцева Л. В., Дроздовский Б. А.** О критериях применимости экспериментального определения вязкости разрушения K_{Ic} / Заводская лаборатория. 1975. Т. 41. № 11. С. 1380 — 1384.
 58. **Кудряшов В. Г.** Методика оценки истинности определяемого параметра вязкости разрушения K_{Ic} / Заводская лаборатория. 1975. Т. 41. № 11. С. 1388 — 1390.
 59. E 813-81 Standard Test Method for J_{Ic} , a Measure of Fracture toughness / 1982 Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: ASTM, 1982. Pt. 10. H. 822 — 840.
 60. **Landes J. D., Begley J. A.** Test results from J -integral studies: an attempt to establish of a J_{Ic} testing procedure / Fracture analysis. ASTM STP. 1974. N 560. P. 170 — 176.
 61. **Harrison J. D.** COD testing and analysis: the present states of the art. — Abington: Weld. Inst., 1981. — 30 p.
 62. **Begley J. A., Landes J. D.** The J -integral as fracture criterion / Fracture analysis. ASTM STP. 1972. N 514. P. 1 — 20.
 63. РД 50-433-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости при динамическом нагружении). — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 52 с.
 64. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 96 с.
 65. МР 170 — 85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) сварных соединений при статическом нагружении. — М.: ВНИИНМАШ, 1985. — 52 с.
 66. МР 71 — 82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) на стадии остановки трещины. — М.: ВНИИНМАШ, 1982. — 27 с.

UDC 620.172.2:620.171

UNIFICATION OF THE METHODS OF TESTING CONSTRUCTION MATERIALS FOR CRACK RESISTANCE: HISTORY OF THE PROBLEM AND FORMATION OF THE REGULATORY STRUCTURE

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

Submitted April 18, 2017.

The article is devoted to the problematic issues regarding unification of the methods of mechanical testing of structural materials for crack resistance and activities of the Scientific and Methodological Commission for Standardization in the Fracture Mechanics of the Scientific and Technical Council of the State Standard of the USSR in connection with the 40th anniversary of its creation. The methodological foundations of tests for crack resistance are considered in connection with the types of limiting states of the materials and structures with due regard for domestic experience in the study of brittle fracture. The results of scientific and organizational activities of the Commission are presented in a historical retrospective relating to the set of goals and scientific prerequisites for developing of technical standards and regulatory documents in the field of experimental methods in fracture mechanics. An emphasis is made on the correlation and succession of the basic methodological principles of testing for crack resistance and determining the characteristics of the mechanical of materials. Brief descriptions of the conceptual and scientific base of GOST 25.506 – 85, methodological instructions and recommendations regulating determination of the fracture toughness characteristics under static, dynamic and cyclic loading, welded joints and at the stage of crack arrest are presented. Developed regulatory and technical documentation formed the base of the regulatory guidelines for methodological documents regarding testing of various construction materials, conditions of crack development, types of loading and extreme states of materials and impacts. Preparation and publication of the All Union State standard (GOST) predetermined the positive result of the initial stage of formation and further fruitful development of combined experimental and computational methods of fracture mechanics.

Keywords: fracture mechanics, methods of testing for crack resistance, limit states, standardization, regulatory and technical documents, characteristics of crack resistance.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu. N., Frolov K. V., Kogaev V. P., et al. Problems of strength of engineering products and standardization / Standarty Kach. 1978. N 5. P. 19 – 21 [in Russian].
2. Makhutov N. A. Design characteristics of brittle fracture resistance and methods of their determination / Zavod. Lab. 1976. Vol. 42. N 8. P. 987 – 995 [in Russian].
3. Makhutov N. A. Mechanical testing and structural strength (overview) / Zavod. Lab. 1977. Vol. 43. N 10. P. 1260 – 1270 [in Russian].
4. Makhutov N. A., Taver E. I. Standardization of methods of mechanical testing for crack resistance / Zavod. Lab. 1984. Vol. 50. N 1. P. 1 – 3 [in Russian].
5. Frolov K. V., Makhutov N. A. Mechanical testing of materials in problems of engineering science / Zavod. Lab. 1988. Vol. 54. N 10. P. 50 – 53 [in Russian].
6. Drozdovskii B. A., Morozov E. M. Estimation methods for fracture toughness / Zavod. Lab. 1976. Vol. 42. N 8. P. 996 – 1004 [in Russian].
7. Makhutov N. A., Taver E. I., Bozrova L. K. On the activities of the scientific and methodological commission on standardization in the field of fracture mechanics / Fiz.-Khim. Mekh. Mater. 1980. Vol. 16. N 3. P. 124 – 126 [in Russian].
8. Makhutov N. A., Panasyuk V. V., Taver E. I. Unification of test methods in fracture mechanics / Unification of methods for testing metals for crack resistance. Issue 2. — Moscow: Izd. standartov, 1982. P. 5 – 10 [in Russian].
9. Makhutov N. A., Koshelev P. F., Chernyaev A. P., et al. Unification of mechanical tests in the field of fracture mechanics / Unification of methods for testing metals for crack resistance. Issue 1. — Moscow: Izd. standartov, 1982. P. 40 – 49 [in Russian].
10. Barenblatt G. I. On some general ideas of the mathematical theory of brittle fracture / Prikl. Matem. Mekh. 1964. Vol. 28. Issue 4. P. 630 – 643 [in Russian].
11. Barenblatt G. I., Vavakin A. S., Gol'dshtein R. V., Entov V. M., Salganik R. L. General scheme of application of quasistatic theory of cracks to the prediction of strength and durability of structural elements. In the collection: Plastic deformation of light and special alloys. Issue 1. — Moscow: Metallurgiya, 1978. P. 170 – 180 [in Russian].
12. Gol'dshtein R. V. Some issues of the fracture mechanics of large-sized structures. In: Mechanics of destruction. Destruction of structures. Ser. New in foreign science. Mechanics. Issue 20. — Moscow: Mir, 1980. P. 228 – 255 [in Russian].
13. Makhutov N. A. Structural strength, resource and technogenic safety. In 2 parts. — Novosibirsk: Nauka, 2005 [in Russian].
14. Moskvichev V. V. The basis of structural strength of technical systems and engineering structures. — Novosibirsk: Nauka, 2002. — 106 p. [in Russian].
15. Kopel'man L. A. Weldment resistance to brittle fracture. — Leningrad: Mashinostroenie, 1978. — 232 p. [in Russian].
16. Applied issues of fracture toughness / Translated from English under the editorship of B. A. Drozdovskiy and E. M. Morozov. — Moscow: Mir, 1968. — 552 p. [Russian translation].
17. Braun U., Srouli D. Tests of high-strength metallic materials on the fracture toughness at planar deformation / Translated from English under the editorship of B. A. Drozdovskiy and E. M. Morozov. — Moscow: Mir, 1972. — 246 p. [Russian translation].
18. Panasyuk V. V., ed. Fracture mechanics and strength of materials: Reference Manual. In 4 volumes. — Kiev: Naukova dumka, 1988 – 1990 [in Russian].
19. Vasil'chenko G. S., Koshelev P. F. Practical application of fracture mechanics for the analysis of structural strength. — Moscow: Nauka, 1974.
20. Botvina L. R. Destruction: kinetics, mechanisms, common patterns. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
21. Crack resistance of materials and structural elements / Proceedings of the All-Union Symposium. — Kiev: Naukova dumka, 1980. — 370 p. [in Russian].
22. Destruction / Under the editorship of G. Lubovits; translated from English. In 7 volumes. — Moscow: Mir, Mashinostroenie, Metallurgiya, 1973 – 1978 [Russian translation].
23. Parton V. Z., Morozov E. M. Mechanics of elastoplastic fracture. — Moscow: Nauka, 1985. — 504 p. [in Russian].
24. Makhutov N. A. Deformation criteria for destruction and calculation of structural elements for strength. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 272 p. [in Russian].
25. Karzov G. P., Leonov V. P., Timofeev B. T. Welded high-pressure vessels. — Leningrad: Mashinostroenie, 1982. — 287 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. **Cherepanov G. P.** Mechanics of brittle fracture. — Moscow: Nauka, 1974. — 640 p. [in Russian].
28. **Broek D.** Basis of fracture mechanics / Translated from English. — Moscow: Vysshaya shkola, 1980. — 368 p. [Russian translation].
29. **Khellan K.** Introduction to the fracture mechanics / Translated from English under the editorship of E. M. Morozov. — Moscow: Mir, 1988. — 364 p. [Russian translation].
30. **Pestrikov V. M., Morozov E. M.** Fracture mechanics. — St. Petersburg: TsOP «Professiya», 2012. — 552 p. [in Russian].
31. **Matvienko Yu. G.** Models and criteria of fracture mechanics. — Moscow: Fizmatlit, 2006. — 328 p. [in Russian].
32. **Panasyuk V. V.** Limit equilibrium of brittle solids with cracks. — Kiev: Naukova dumka, 1968. — 246 p. [in Russian].
33. **Makhutov N. A.** Resistance of structural elements to brittle fracture. — Moscow: Mashinostroenie, 1974. — 200 p. [in Russian].
34. **Davidenkov N. N.** Dynamic tests of metals. — Moscow: ONTI, 1936. — 395 p. [in Russian].
35. **Makhutov N. A., Morozov E. M., Matvienko Yu. G.** Formation and development of tests on the impact strength in the USSR and Russia / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2001. Vol. 67. N 7. P. 42–49 [in Russian].
36. **Fridman Ya. B.** Mechanical properties of metals. — Moscow: Mashinostroenie, 1974 [in Russian].
37. **Drozdovskii B. A., Fridman Ya. B.** Influence of cracks on the mechanical properties of steels. — Moscow: Metalloizdat, 1961. — 260 p. [in Russian].
38. **Shevandin E. M., Razov I. A.** Cold brittleness and extreme plasticity of metals in shipbuilding. — Leningrad: Sudostroenie, 1965. — 336 p. [in Russian].
39. **Georgiev M. N.** Viscosity of steel. — Moscow: Metallurgiya, 1973. — 224 p. [in Russian].
40. **Georgiev M. N.** Crack resistance of railway rails. — Kemerovo: Master-flag, 2006. — 212 p. [in Russian].
41. **Odesskii P. D., Vedyakov I. I.** Impact strength of steels for metal structures. — Moscow: Internet Inzhiniring, 2003. — 232 p. [in Russian].
42. **Uzhik G. V.** Tear resistance and strength of metals. — Moscow: Izd. AN SSSR, 1961. — 255 p. [in Russian].
43. **Koshelev P. F.** Mechanical properties of alloys for cryogenic engineering. — Moscow: Mashinostroenie, 1971. — 384 p. [in Russian].
44. New methods for estimating the resistance of metals to brittle fracture / Translated from English under the editorship of Y. N. Rabotnov. — Moscow: Mir, 1972. — 439 p. [Russian translation].
45. Impact tests of metals / Translated from English by V. M. Markochev under the editorship of B. A. Drozdovskiy and E. M. Morozov. — Moscow: Mir, 1973. — 317 p. [Russian translation].
46. Problems of the fracture of metals. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1975. — 208 p. [in Russian].
47. Problems of the fracture of metals. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1977. — 175 p. [in Russian].
48. Problems of the fracture of metals. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1980. — 246 p. [in Russian].
49. Problems of fracture of metals and fractography. Workshop materials. — Moscow: Izd. MDNTP, 1989. — 138 p. [in Russian].
50. 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].
51. 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].
52. Mechanical tests. Calculations and strength tests. — Moscow: Standartinform, 2005. — 240 p. [in Russian].
53. RD 50-260-81. Methodical guidelines. Calculations and tests for strength in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics (crack resistance) under static loading. — Moscow: Izd. standartov, 1982. — 56 p. [in Russian].
54. **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. Issue 2. — Moscow: Izd. standartov, 1982. P. 10–31 [in Russian].
55. State Standard GOST 25.506-85. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of fracture toughness characteristics (fracture toughness) under static loading. — Moscow: Izd. standartov, 1985. — 62 p. [in Russian].
56. **Markochev V. M., Morozov E. M.** On the criteria for the reliability of the experimental determination of fracture toughness / Fiz.-Khim. Mekh. Mater. 1976. N 2. P. 21–23 [in Russian].
57. **Prokhodtseva L. V., Drozdovskii B. A.** On the criteria for the applicability of the experimental determination of fracture toughness K_{Ic} / Zavod. Lab. 1975. Vol. 41. N 11. P. 1380–1384 [in Russian].
58. **Kudryashov V. G.** The method for evaluating the variety of the determined fracture toughness parameter K_{Ic} / Zavod. Lab. 1975. Vol. 41. N 11. P. 1388–1390 [in Russian].
59. E 813-81 Standard Test Method for J_{Ic} , a Measure of Fracture toughness / 1982 Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: ASTM, 1982. Pt. 10. H. 822–840.
60. **Landes J. D., Begley J. A.** Test results from J -integral studies: an attempt to establish of a J_{Ic} testing procedure / Fracture analysis. ASTM STP. 1974. N 560. P. 170–176.
61. **Harrison J. D.** COD testing and analysis: the present states of the art. — Abington: Weld. Inst., 1981. — 30 p.
62. **Begley J. A., Landes J. D.** The J -integral as fracture criterion / Fracture analysis. ASTM STP. 1972. N 514. P. 1–20.
63. RD 50-433-82. Methodical guidelines. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of fracture toughness characteristics (fracture toughness under dynamic loading). — Moscow: Izd. standartov, 1982. — 52 p. [in Russian].
64. RD 50-345-82. Methodical guidelines. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of fracture toughness characteristics under cyclic loading). — Moscow: Izd. standartov, 1983. — 96 p. [in Russian].
65. MP 170-85. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of fracture toughness (fracture resistance) characteristics of welded joints under static loading. — Moscow: VNIINMASH, 1985. — 52 p. [in Russian].
66. MP 71-82. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of fracture toughness (fracture resistance) characteristics at the stage of crack arrest. — Moscow: VNIINMASH, 1982. — 27 p. [in Russian].